

Міністерство України з питань надзвичайних ситуацій  
та у справах захисту населення від наслідків  
Чорнобильської катастрофи

ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

**М.Ф. Юрим, А.В. Сибірний,  
О.В. Мартиняк, Н.М. Гринчишин**

## **ПРИЛАДИ І МЕТОДИ МОНІТОРИНГУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

Львів – 2009

УДК 551.508+66.02-52(075.8)

ББК 23

Ю 71

Юрим М.Ф., Сибірний А.В., Мартиняк О.В., Гричишин А.М.  
Прилади і методи моніторингу навколишнього середовища: Навчальний посібник. – Львів: ЛДУ БЖД, 2009. – 236 с.

**Рецензенти:** *М.М. Гивлюд*, доктор технічних наук, професор (професор кафедри наглядово-профілактичної діяльності Львівського державного університету безпеки життєдіяльності МНС України);

*П.В. Білей*, доктор технічних наук, професор (завідувач кафедри технології деревообробки і захисту деревини національного лісотехнічного університету України).

У навчальному посібнику висвітлені методи вимірювання параметрів навколишнього середовища, сучасні прилади для здійснення моніторингу навколишнього середовища. Розглядаються сучасні методи оптимізації складних багатофакторних систем при здійсненні моніторингу навколишнього середовища: методи математичної статистики, регресійний аналіз, факторний експеримент, аналітичні та градієнтні методи оптимізації. Наведено приклад їх практичного застосування при здійсненні моніторингу навколишнього середовища при його забрудненні твердими промисловими відходами.

Навчальний посібник призначений для курсантів і студентів вищих навчальних закладів екологічних спеціальностей, наукових та інженерно-технічних працівників науково-дослідних установ і виробничих лабораторій, а також для спеціалістів Міністерства України з питань надзвичайних ситуацій та у справах захисту населення від наслідків Чорнобильської катастрофи, які здійснюють моніторинг навколишнього середовища.

Ілюстрацій -117; таблиць - 22; бібліогр. – 45 назв.

Рекомендовано МНС України як навчальний посібник для курсантів і студентів екологічних спеціальностей вищих навчальних закладів (*Лист № 6 від 20 лютого 2008 року*).

© Юрим М.Ф., 2009

© Сибірний А.В., 2009

© Мартиняк О.В., 2009

© Гричишин А.М., 2009

© ЛДУ БЖД, 2009

## ПЕРЕДМОВА

У зв'язку з розвитком методів моніторингу навколишнього середовища виникла необхідність ознайомлення курсантів і студентів спеціальності "Екологія і охорона навколишнього середовища" Львівського державного університету безпеки життєдіяльності Міністерства України з питань надзвичайних ситуацій та у справах захисту населення від наслідків Чорнобильської катастрофи з сучасними приладами та методами здійснення (проведення) такого моніторингу.

Навчальний посібник написано на основі дисциплін "Моніторинг навколишнього середовища" та "Прилади контролю параметрів навколишнього середовища", що їх викладають автори у Львівському державному університеті безпеки життєдіяльності Міністерства України з питань надзвичайних ситуацій та у справах захисту населення від наслідків Чорнобильської катастрофи.

Прилади згруповані за родом вимірювальної величини, а всередині кожної групи класифіковані за методами вимірювання і конструктивними особливостями.

Автори передбачають, що читачі ознайомлені з дисципліною "Фізика" та "Математика", які передують дисциплінам "Моніторинг навколишнього середовища", та "Прилади контролю параметрів навколишнього середовища".

При написанні навчального посібника використані результати науково-дослідних робіт, виконаних безпосередньо авторами та їх учнями, курсантами і студентами кафедри "Екологічна безпека" Львівського державного університету безпеки життєдіяльності Міністерства України з питань надзвичайних ситуацій та у справах захисту населення від наслідків Чорнобильської катастрофи. Всі зауваження і пропозиції автори приймуть з вдячністю.

## Розділ 1

### ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ВИМІРЮВАННЯ, ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ І ЇХ ПОХИБКИ

#### 1. Основні поняття про вимірювання і засоби вимірювання

##### § 1.1. Основні поняття про вимірювання

Вимірюванням називається процес знаходження дослідним шляхом за допомогою спеціальних технічних засобів співвідношення між вимірюваною величиною і деяким її значенням, прийнятим за одиницю порівняння.

Число, що визначає відношення вимірюваної величини до одиниці вимірювання, називається числовим значенням вимірюваної величини. Якщо  $x$  – вимірювана величина,  $u$  – одиниця вимірювання, а  $q$  – числове значення вимірюваної величини, то

$$x = q \cdot u \quad (1.1)$$

Права частина рівняння (1.1) називається результатом вимірювання. Результат вимірювання – завжди розмірна величина, складається із одиниці  $u$ , яка має свою назву, і числа  $q$ , яке показує, скільки разів дана одиниця вимірювання вміщується у вимірюваній величині.

Якщо у рівнянні (1.1) за одиницю замість  $u$  прийняти іншу величину  $u_1$ , то вона набуває вигляду:

$$x = q_1 \cdot u_1 \quad (1.2)$$

Із рівнянь (1.1) і (1.2) отримаємо:

$$q_1 = q \cdot u / u_1$$

Таким чином, для переходу від результату вимірювання  $q$ , представленого в одиниці  $u$ , до результату  $q_1$ , представленого в іншій одиниці  $u_1$ , необхідно  $q$  помножити на відношення прийнятих одиниць.

За способом одержання числового значення вимірюваної величини розрізняють чотири типи вимірювань: прямі, опосередковані, додані і сумісні.

**Прямими** називають такі вимірювання, при яких значення вимірюваної величини визначають безпосередньо із дослідних даних (вимірювання температури термометром, вимірювання довжини лінійкою і т.п.). Прямі вимірювання проводять такими основними методами: безпосередньої оцінки, диференціальним, порівняння, нульовим.

**Методом безпосередньої оцінки** вимірювана величина перетворюється у вихідну величину приладу, тобто прилади безпосередньо показують (або записують) вимірювану величину. Цей метод широко використовують у приладах контролю навколишнього середовища (пружинні манометри, прилади для визначення об'єму рідини та ін.).

**При диференціальному методі** прилад безпосередньо визначає різницю між вимірюваною і деякою відомою величиною (мірою), після чого вимірювану величину знаходять алгебраїчним додаванням. Диференціальний метод широко використовують у приладах автоматичного аналізу складу і властивостей речовин при наявності "перешкоджаючих" компонентів – шумів, температури, сукупних компонентів у газоаналізаторах.

**Метод порівняння** – це метод порівняння з мірою, при якому вимірювальна величина і величина, відтворена мірою, одночасно впливають на прилад порівняння, за допомогою якого встановлюють співвідношення між цими величинами. Значення вимірюваної величини знаходять після досягнення рівноваги за значенням рівноважної (відомої) величини. Наприклад, на ричажній вазі масу зважуваної речовини знаходять за масою встановлених різноважок.

**Нульовий (компенсаційний) метод** – це метод порівняння з мірою, при якому результуючий ефект впливу величини на прилад порівняння доводять до нуля. До приладів, робота яких базується на компенсаційному методі, відносяться потенціометри, зрівноважувальні мости.

**Опосередкованими** називаються такі вимірювання, при яких вимірювану величину встановлюють на основі відомої залежності між цією величиною і величинами, що підлягають прямим вимірюванням. Приклади опосередкованого вимірювання: визначення густини однорідного тіла за його масою і геометричними розмірами, питомого електричного опору провідника за його опором, довжиною і площею поперечного перетину. Опосередковані вимірювання широко застосовують для контролю виробничих процесів, коли прямі вимірювання неможливі.

У загальному випадку вимірювану величину знаходять за формулою:

$$x = F(x_1, x_2, x_3, \dots),$$

де  $x$  – невідоме значення вимірюваної величини;

$x_1, x_2, x_3, \dots$  – значення величин, виміряних прямим способом.

При доданих вимірюваннях числові значення вимірюваної величини визначають розв'язком системи рівнянь, отриманих із сукупності прямих вимірювань одної, або декількох однозначних величин (наприклад, визначення температурного коефіцієнта лінійного розширення).

Сумісні вимірювання передбачають одночасне вимірювання двох або декількох однозначних величин для знаходження залежності між ними.

Доданими і сумісними вимірюваннями користуються переважно в науково-дослідній роботі.

### § 1.2. Засоби вимірювання і їх основні елементи

**Засоби вимірювань** являють собою сукупність технічних засобів, що використовуються при різних вимірюваннях і мають нормовані метрологічні властивості, тобто відповідають вимогам метрології щодо одиниць і точності вимірювань, надійності і відтворюваності одержаних результатів, а також вимогам до їх розмірів і конструкції.

Основними видами засобів вимірювань є міри, вимірювальні прилади, вимірювальні перетворювачі і вимірювальні установки.

**Мірою** називається засіб вимірювання, призначений для відтворення фізичної величини заданого розміру (наприклад, різноважка – міра маси, температурні лампи – міра яскравості і т.п.).

**Вимірювальним приладом** (або просто приладом) називається прилад вимірювання, який слугує для вироблення сигналу вимірюваної інформації (електричного, пневматичного та ін.) у формі, доступній для безпосереднього сприйняття спостерігачем. За формою надання інформації прилади діляться на аналогові, покази яких є безперервною функцією вимірювальної величини, і цифрові, покази яких є дискретними і представлені в цифровій формі.

**Вимірювальний перетворювач** – засіб вимірювань, призначений для вироблення сигналу вимірювальної інформації у формі, зручній для передавання і подальшого перетворення, обробки і зберігання, але не сприймається безпосередньо спостерігачем.

Залежно від призначення вимірювальні перетворювачі поділяються на такі основні групи.

До первинного перетворювача (датчика) підведена вимірювальна величина, тобто він перший у вимірювальній схемі (наприклад, термоелектричний перетворювач, термометр опору).

Первинні перетворювачі досить різноманітні як за принципом дії, так і за характеристикою вихідних сигналів; їх можливо класифікувати за рядом ознак: за видом контрольованої величини (параметру) – перетворювачі температури, тиску, витрат, густини і т.д.; за принципом дії (електричні, пневматичні і т.д.); за видом і характером вихідного сигналу (неперервні і дискретні).

Важливою характеристикою первинного перетворювача є вид функціональної залежності між вимірюваннями контрольованої величини і вихідним сигналом перетворювача; бажана лінійна залежність. Якщо сигнал електричний, то як канал зв'язку використовують електричні

проводи або кабель. Якщо сигнал пневматичний або гідравлічний, то використовують металеві або поліетиленові трубки.

Найбільше розповсюдження в сучасних системах централізованого контролю отримали електричні та пневматичні перетворювачі, причому, пневматичні системи використовують, в основному, у вибухонебезпечних і пожежонебезпечних виробництвах, де використання електричних передач виключено.

Проміжний перетворювач займає у вимірювальному ланцюгу місце первинного і призначений для здійснення всіх необхідних перетворень (підсилення, випрямлення).

Передавальний перетворювач призначений для дистанційного передавання сигналу вимірюваної інформації.

**Вимірювальні установки** – засоби вимірювань, які складаються зі сукупності функціонально об'єднаних вимірювальних приладів, вимірювальних перетворювачів та інших пристроїв, з'єднаних між собою відповідними кабелями зв'язку, і призначені для вироблення сигналів вимірюваної інформації у формі, зручній для автоматичної обробки, передавання і використання в автоматизованих системах управління.

**Вторинні вимірювальні пристрої** (вторинний прилад) – засіб вимірювань, призначений для роботи в комплекті з вимірювальними приладами (шкальними і безшкальними), а також із деякими видами первинних і проміжних перетворювачів. Один і той же прилад може бути використаний для вимірювання різних параметрів, (різниця полягає лише в градуванні шкали).

Шкали технічних приладів, зазвичай, градуують так, щоб покази їх були чисельно рівні відліку, отже, одиниця вимірювання  $U = 1$ .

За способом відліку вимірювальні прилади діляться на показувальні, самописущі, комбіновані, сумуючі та інтегруючі.

**Показуючі** – це такі прилади, у яких значення вимірювальної величини в момент вимірювання вказуються на відліковому пристрої.

Найбільше застосовують шкальні відлікові пристрої. Шкали виготовляють як нерухомими, так і рухомими (шкала переміщується відносно нерухомого показника). Позначки на шкалах розміщують вздовж прямої лінії або по дузі, окружності, на плоскій або циліндричній поверхні циферблату.

На рис. 1.1. показані найбільш типові шкали вимірювальних приладів.

Початок шкали – позначка, яка відповідає найменшому значенню величини, визначуваній за цією шкалою (нижня межа показів приладу). Кінець шкали – відмітка, що відповідає найбільшому значенню вимірюваної величини (верхня межа показів приладу). Нуль шкали – позначка, яка відповідає нульовому значенню вимірюваної величини. Шкали, нульова

позначка яких співпадає з початком або кінцем шкали, називаються односторонніми. Шкала називається двохсторонньою, якщо нульова позначка не співпадає ні з початком, ні з кінцем шкали (наприклад, манометричний термометр з лімітом показів від  $-50^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$ ). Шкала називається безнульовою, якщо вона не має нульової позначки (наприклад, шкала термометра з лімітом показів від  $+50$  до  $+200^{\circ}\text{C}$ ).

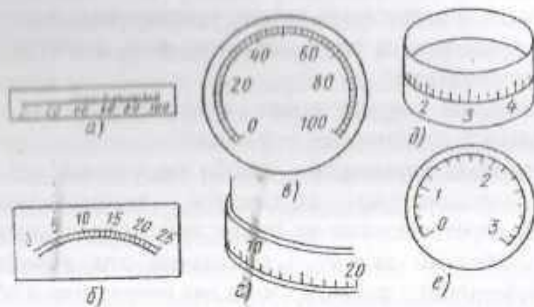


Рис. 1.1. Шкали:

а – пряmlinійна; б – дугова; в – кругова рівномірна;  
г – профільна; д – барабанна; е – кругова нерівномірна.

Положення покажчика визначається кутовим або лінійним його переміщенням від нуля до початку шкали. Залежність між положенням покажчика і відліком називається характеристикою шкали. Характеристика шкали приладів з кутовим переміщенням покажчика описується рівнянням:

$$q = f(\varphi), \quad (1.4)$$

де  $\varphi$  – кут повороту покажчика від нульової позначки шкали (для безнульових шкал від початку шкали);

$q$  – відлік за шкалою.

Для приладів з пряmlinійними шкалами

$$q = f_1(N), \quad (1.5)$$

де  $N$  – лінійне зміщення покажчика (утримувача пера) від нуля шкали (для безнульових шкал – від початку шкали);

$q$  – відлік за шкалою.

Лінійне зміщення покажчика від нульової відмітки дугових і кругових шкал.

$$N = \varphi R_{ш}, \quad (1.6)$$

де  $R_{ш}$  – радіус шкали.

На рис. 1.2. схематично показані відлікові пристрої.

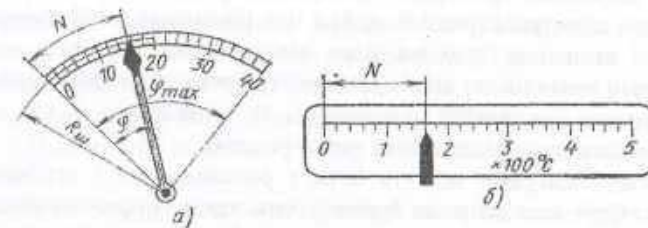


Рис. 1.2. Відлікові пристрої із шкалою:

а – дуговий; б – пряmlinійний

Ціною поділки шкали називається проміжок між осями або центрами двох суміжних позначок. Рівномірні шкали мають однакову ціну поділки шкали. Довжина між поділками нерівномірної шкали неоднакова.

Самопишучі (реєструючі) прилади оснащують засобами, які автоматично записують на паперовій стрічці або на диску теперішні значення вимірюваної величини в часі.

На рис. 1.3 приведені схеми типових реєструючих пристроїв.

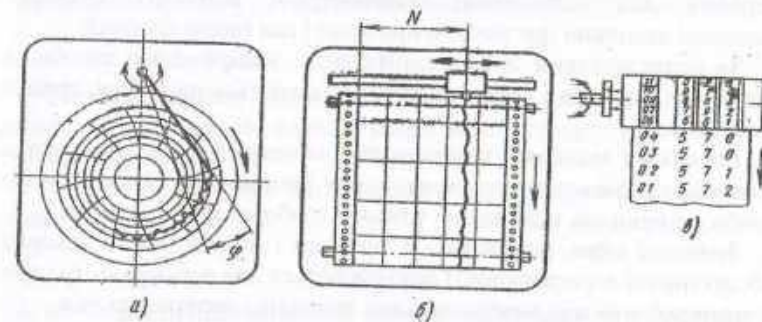


Рис. 1.3. Реєструючі пристрої:

а – із записом у полярних координатах на дисковій діаграмі;  
б – із записом у прямокутних координатах на стрічковій діаграмі;  
в – з пристроєм друкування

В одному випадку на паперовій стрічці (диску) пером викреслюється безперервна лінія, в іншому – на стрічці періодично друкуються числові значення. На одній паперовій стрічці може бути записано декілька кривих. У цьому випадку в прилад вмонтовується автоматичний перемикач, який послідовно підключає до вимірювальної системи один з первинних перетворювачів, розмішених у декількох точках виміру.

Характеристики реєструючих пристроїв аналогічні характеристикам шкалових відлікових пристроїв і описуються рівняннями (1.4) і (1.5). Для реєструючих пристроїв (рис. 1.3, а, б) в цих рівняннях  $\varphi$  і  $N$  означають кут повороту і зміщення тримача пера від нульової позначки лінії сітки діаграми, а  $q$  – відлік по сітці. Для реєструючих пристроїв (рис. 1.3, в) характеристика має вигляд рівняння (1.4), в якому  $\varphi$  – кут повороту вхідного валика, а  $q$  – надруковане число (відлік).

Дискові діаграми можуть бути з рівномірними і нерівномірними поділками. Стрічкові діаграми бувають двох типів: з прямолінійним рухом пера приладу і з рухом пера по дузі круга. В приладах, які переміщують показники з малим зусиллям (самопишучі мілівольметри, самопишучі логоміри), запис проводиться за допомогою допоміжного пристрою (падаючої дужки).

**Комбіновані прилади** одночасно показують і вимірюють вимірювану величину.

**Сумуючі й інтегруючі прилади.** В сумуючих приладах покази функціонально зв'язані із сумою двох або декількох величин, підведених до нього різними каналами. В інтегруючому приладі підведена величина підлягає інтегруванню в часі або замість неї іншою незалежною перемінною.

Вимірювальні прилади можна оснастити також додатковими пристроями для сигналізації (сигналізуючі прилади), регулювання вимірюваної величини (регулюючі прилади) і для інших функцій.

За метрологічним призначенням різні вимірювальні засоби (міри, вимірювальні прилади і перетворювачі) поділяються на робочі, зразкові та еталонні.

**Робочими засобами** вимірювання називаються всі міри, прилади і перетворювачі, призначені для практичних вимірювань. Вони поділяються на засоби вимірювань підвищеної точності (лабораторні) і технічні.

**Зразкові міри,** вимірювальні прилади і перетворювачі (наприклад, термоелектричні перетворювачі) призначаються для перевірки і градуювання за ними робочих мір, вимірювальних приладів і перетворювачів.

**Еталони** слугують для відтворення і зберігання одиниць виміру з найвищою (метрологічною) точністю, доступною при відповідному рівні науки і техніки, а також для перевірки мір, приладів і перетворювачів вищого розряду.

**Перевіркою** називається операція порівняння показів засобів вимірювань із зразковими для визначення їх похибок або поправок до їх показів.

**Градуюванням** називається операція, за допомогою якої поділкам шкали надають значення, виражені в установлених одиницях вимірювань.

### § 1.3. Похибки вимірювальних приладів

Похибкою вимірювання називається відхилення результату вимірювання від дійсного значення вимірювальної величини. За похибку вимірювання не приймають неточність вимірювального приладу, за допомогою якого проводиться вимірювання. Похибкою вимірювального приладу є різниця між показом приладу і дійсним значенням вимірюваної величини.

Похибка вимірювального приладу визначається структурними і конструктивними особливостями самого приладу, властивостями використаних в ньому матеріалів і елементів, особливостями технології виготовлення, градуювання.

Похибки приладів можна класифікувати за різними ознаками: одиниці вимірювання величини; характер зв'язку між величиною похибки і вимірюваною величиною; закономірності появи похибки при багаторазових випробуваннях приладу; умови і причини появи похибки.

**Абсолютна похибка** засобів вимірювання (ЗВ) визначається в одиницях вимірюваної величини  $x$  або вихідного сигналу вимірювального перетворювача. Абсолютна похибка засобів вимірювання в одиницях  $x$  (або похибка, приведена до входу засобу вимірювання) дорівнює різниці між похибками приладу  $x_n$  та істинним значенням вимірюваної величини

$$\Delta = x_n - x \quad (1.3.1)$$

Оскільки дійсне значення вимірюваної величини залишається практично не відомим, то замість нього використовують дійсне значення вимірюваної величини  $x_0$ .

Абсолютна похибка вимірювального перетворювача, приведена до його виходу, становить :

$$\Delta y = y - y_0 \quad (1.3.2)$$

де  $y = f(x)$  – фактичний вихідний сигнал вимірювального перетворювача, відповідний його реальній статичній характеристикі  $y_0 = f(x_0)$  – ідеальний вихідний сигнал вимірювального перетворювача, відповідний його ідеалізованій (заданій) статистичній характеристикі.

При фіксованому значенні вимірювальної величини  $x$  в реальних умовах завжди відбувається зміна вихідного сигналу вимірювального перетворювача на величину  $\Delta y$ , викликана такими джерелами похибок, як неконтрольовані зміни температури, тиску, вологості навколишнього середовища, коливання напруги живлення.

Розпіянувши малий приріст вихідного сигналу  $\Delta y$ , визнаний перерахованими факторами, як диференціал функції  $y = f(x)$ , можна отримати наближений зв'язок між похибками  $\Delta$  і  $\Delta y$ :

$$\Delta y = \frac{dy}{dx} \Delta x = S \Delta x \quad (1.3.3)$$

де  $S = dy/dx$  – чутливість вимірювального перетворювача.

Відносна похибка засобів вимірювання дорівнює відношенню абсолютної похибки  $x$  або  $\Delta y$  до дійсного значення  $x_0$  вимірюваної величини  $x$  або вихідного сигналу вимірювального перетворювача  $y_0$ .

$$\sigma_x = \Delta/x_0 = \Delta (x_n - \Delta) = \Delta/x_n (1 - \frac{\Delta}{x_n}) \approx \Delta/x_n \quad (1.3.4)$$

$$b_y = \Delta/y_0 \approx \Delta_y/y_0 \quad (1.3.5)$$

При виводі співвідношення (1.3.4), (1.3.5) використані такі умови:

$\Delta/x_n \ll 1$  і  $\Delta y/y_0 \ll 1$ , що відповідають точним вимірюванням.

У цьому режимі при обчисленні відносної похибки абсолютну похибку можна віднести до показів приладу.

Установимо взаємозв'язок між величинами  $b_x$  і  $b_y$ . Для цього розділимо обидві частини співвідношення (1.3.3) на вираз  $y(x)$ , який визначає статичну характеристику приладу:

$$\frac{dy}{y} = S \frac{dx}{x} \quad (1.3.6)$$

З врахуванням (1.3.4) співвідношення (1.3.5) можна привести до вигляду  $b_y = S b_x / y$  або  $b_x = b_y y / (x S)$ , де  $b_x$  і  $b_y$  – відносні похибки вимірювального перетворювача відповідно на вході і на виході. Якщо прилад має лінійну статичну характеристику, то  $y = Sx$ ;  $S = y/x$ ;  $b_x = b_y$ .

**Приведена похибка** – відношення абсолютної похибки засобів вимірювання до нормуючого значення  $X_N$ ;  $b_n = \Delta/X_N$ .

Найчастіше нормуюче значення вибирають рівним величині діапазону вимірювань:  $X_N = X_{\max} - X_{\min}$ . Величини  $b_x$ ,  $b_y$ ,  $b_n$ , зазвичай, приводять у відсотках.

У техніці застосовують прилади для вимірювання лише з певною, наперед заданою точністю – основною похибкою, що допускається нормами.

Якщо прилад працює в умовах, відмінних від нормальних, то виникає додаткова похибка, яка збільшує загальну похибку приладу. До додаткових похибок відносяться такі: температура, що викликана відхиленням температури навколишнього середовища від нормального значення, обумовлена відхиленням положення приладу від нормального робочого положення.

За нормальну температуру повітря навколишнього середовища приймають  $20^\circ\text{C}$ , за нормальний атмосферний тиск –  $101,325 \text{ кПа}$ .

Узагальненою характеристикою засобів вимірювання є клас точності, що визначається максимальними значеннями основної і

додаткової похибок, а також іншими параметрами, які впливають на точність засобів вимірювання; значення параметрів встановлено стандартами на окремі види засобів вимірювання. Клас точності засобів вимірювання характеризує їх властивості щодо точності, але не є безпосереднім показником точності вимірювань, виконаних за допомогою цих засобів, тому що точність залежить також від методу вимірювань і умов їх проведення.

Вимірювальним приладам, межі допуску основних похибок яких задані у вигляді приведених (відносних) похибок, присвоюють класи точності, вибрані із ряду наступних чисел:

$$(1; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0) \cdot 10^n,$$

де  $n = 1; 0; -1; -2$  і т.д.

Клас точності вимірювального приладу рівний найбільшому значенню  $\sigma_{\max}$ , наведеному у відсотках:

$$K = \sigma_{\max} \cdot 100 = \{ \Delta_{\max} / (X_{\max} - X_{\min}) \} \cdot 100. \quad (1.3.7)$$

Державними стандартами для різних приладів встановлені різні класи точності, які вказують на циферблаті приладу.

При зміні вимірювальної величини  $x$  величина похибки може змінюватися:  $\Delta = F(x)$ , де  $F(x)$  – деяка функція вимірюваної величини. Залежно від характеру функції  $F(x)$  похибки поділяються на адитивні і мультиплікативні.

**Адитивна похибка** має постійну величину, що не залежить від  $x$ ;  $\Delta = Q = \text{const}$ .

**Мультиплікативна похибка** пропорційна  $x$ ;  $\Delta = vx$ , де  $v = \text{const}$ .

В загальному випадку мультиплікативну похибку можна виразити у вигляді полінома:

$$\Delta = \sum_{i=1}^n B_i X_i$$

Залежно від причини появи виділяють **методичні, інструментальні і суб'єктивні похибки**.

**Методичні похибки** визначаються недосконалістю методу вимірювання, недостатнім врахуванням всіх обставин, які супроводжують вимірювання, а також наближеннями, що допускались при проектуванні приладу. Методичні похибки не залежать від якості виготовлення приладу, вони однакові для всіх зразків даного типу приладів.

**Інструментальні похибки** є наслідком недосконалості конструкції вимірювальних приладів, недодержання технології виготовлення,

недосконалості застосування матеріалів, тертя в механізмах, недосконалості пружних елементів. Ці похибки можуть бути усунені шляхом регулювання приладу. До інструментальних похибок відносяться похибки, викликані зміною зовнішніх умов, наприклад, від температури залежить жорсткість пружин, мембран та інших деталей, розміри деталей передавального механізму приладу, електричний опір провідників, магнітні властивості матеріалів і т.п. В деяких випадках температурні похибки можна розраховувати і внести приладу відповідні поправки. Інструментальні похибки вимірювального приладу складаються з похибок перетворювачів (ланцюгів), з яких складається прилад. У процесі експлуатації приладу інструментальні похибки можуть змінюватися (наприклад, похибки тертя можуть збільшуватися за рахунок забруднення механізму приладу пилом, корозії деталей, порушення умов змащування і т.д.). Для підтримки інструментальної похибки в допустимих межах прилади підлягають перевірці.

**Суб'єктивні похибки** залежать від індивідуальних особливостей оператора, який виконує вимірювання (недостатньо точний відлік показів та ін.).

За закономірностями появи при багатократних випробуваннях вимірювальних приладів розрізняють систематичні і випадкові похибки. Наприклад, вимірювальні прилади підлягають багатократним дослідженням для експериментального визначення похибки, яку в загальному вигляді можна представити у виді такого рівняння:

$$\Delta = F(x).$$

При цьому можливо два випадки:

- 1) похибка  $\Delta$  від досліду до досліду залишається постійною або закономірно змінюється, що складову похибки називають систематичною;
- 2) похибка  $\Delta$  від досліду до досліду змінюється випадково; що складову похибки називають випадковою.

Таким чином, систематичні похибки мають певне значення в кожній точці характеристики вимірювального приладу і повторюються при його багатократних дослідженнях в одних і тих же умовах. Прикладом може слугувати похибка в даній точці шкали вимірювального приладу, викликана відхищенням статичної характеристики від лінійної. До систематичних похибок відносяться також похибки, викликані неправильним встановленням приладу, методичні похибки та ін.

Перед кожним вимірюванням необхідно виявити можливі джерела систематичних похибок і вжити заходів щодо їх усунення або визначити їх величину. В більшості випадків врахувати систематичні похибки надзвичайно важко. Складність завдання полягає в тому, що неможливо запропонувати загальний спосіб розв'язування цієї проблеми. Для

визначення систематичних похибок необхідно їх вивчити, що роблять за допомогою спеціально поставлених дослідів.

Найбільш відповідальні вимірювання виконують різними методами для одержання декількох результатів, незалежних один від одного за джерелами похибок; потім результати порівнюють. Якщо навіть усі систематичні похибки враховані, то і в цьому ідеальному випадку результати вимірювань не забезпечені від впливу випадкових похибок.

Випадковими називають похибки, які не підлягають будь-якій відомій залежності. Вони виникають у результаті впливу на процес вимірювання випадкових факторів (вібрація приладу, вплив сторонніх електромагнітних полів, фізіологічна зміна органів чуття спостерігача і т.д.). Випадкові похибки завжди є в досліді; вони в рівній мірі можуть бути як додатними, так і від'ємними. Випадкові похибки не можуть бути виключені за допомогою дослідів чи розрахунків. Для врахування впливу випадкових похибок на результат вимірювання одну і ту ж величину вимірюють багатократно. В деяких випадках застосовують також закони теорії ймовірності і методи статистики, на основі яких враховують вплив випадкових похибок на результат вимірювання.

За умовами виникнення похибки поділяються на статичні й динамічні.

**Статичні похибки** з'являються при встановленому режимі вимірювання, коли вимірювана величина, вихідний сигнал перетворювача і покази приладу зберігають постійні значення.

**Динамічні похибки** виникають при невстановленому режимі вимірювання. Під динамічною похибкою розуміють ту частину похибки засобу вимірювання, яка додається до статичної похибки в невстановленому режимі вимірювання. Таким чином, загальна похибка в динамічному режимі дорівнює сумі статичної і динамічної похибок.

У більшості випадків статичну похибку засобів вимірювання можна представити у вигляді суми статичної  $\Delta_c$  і випадкової  $\Delta_0$  складових:

$$\Delta = \Delta_c + \Delta_0, \quad (1.3.8)$$

де  $\Delta_c$  – постійна або така, що повільно змінюється величина;  $\Delta_0$  – випадкова величина, середнє значення якої рівне нулю.

Похибка  $\Delta$  як сума постійної і випадкової величин є величиною випадковою, тому для повної і об'єктивної характеристики точності властивостей вимірювальних приладів необхідно користуватися розділом теорії випадкових величин – теорією ймовірності.

У практиці вимірювання зустрічаються різні закони розподілу випадкових похибок, проте найбільше значення має нормальний закон розподілу випадкових величин (закон Гаусса). Головна особливість нормального закону полягає в тому, що він є граничним законом, тобто, до



нього наближаються всі інші засоби розподілу при типових для вимірювань умовах.

Формула, яка визначає густину ймовірностей похибки  $\Delta$ , розподіленої за нормальним законом Гаусса, має такий вигляд:

$$P(\Delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\Delta - M(\Delta))^2}{2\sigma^2}\right], \quad (1.3.9)$$

де  $M(\Delta)$  – математичне сподівання;

$\sigma$  – генеральне середньоквадратичне відхилення випадкової величини.

На рис. 2.1 показаний графік нормального розподілу  $P(\Delta)$ . Із рисунка видно, що крива Гаусса симетрична відносно точки  $M(\Delta)$ . Максимальна густина ймовірностей рівна:

$1/(\sigma\sqrt{2\pi})$  досягається в точці  $M(\Delta)$ . В міру відходу від точки  $M(\Delta)$  вліво або вправо  $P(\Delta)$  асимптотично наближається до нуля. Це свідчить про те, що ймовірність появи малих випадкових похибок  $\Delta_0 = M(\Delta)$  значно більша ніж ймовірність появи великих значень  $\Delta_0$ .

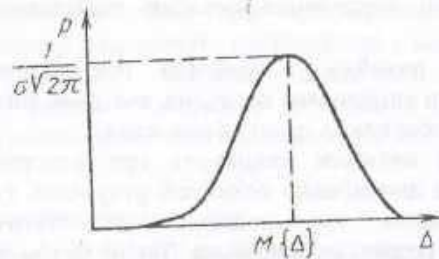


Рис.1.3.1. Крива нормального розподілу випадкових похибок

$M(\Delta)$  є центром симетрії розподілу. Якщо  $M(\Delta)$  змінюється, то крива  $P(\Delta)$  не міняє своєї форми. Таким чином, математичне сподівання характеризує положення розподілу на осі абсцис (похибок). Середньоквадратичне відхилення  $\sigma$  характеризує не положення, а форму кривої розподілу і служить мірою розсіювання похибки.

Розглянемо роль параметрів  $M(\Delta)$  і  $\sigma$  нормального розподілу. Математичне сподівання  $M(\Delta)$  є центром симетрії розподілу. Середньоквадратичне відхилення  $\sigma$  характеризує форму кривої розподілу і служить мірою розсіювання похибки.

Із зменшенням  $\sigma$  збільшується ймовірність малих і зменшується ймовірність великих випадкових похибок (рис. 1.3.2).

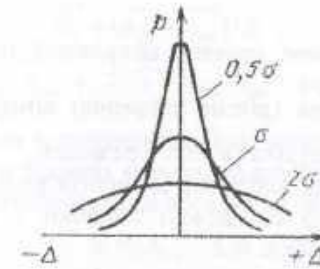


Рис. 1.3.2. Криві нормального розподілу випадкових похибок, що відповідають трьом значенням  $\sigma$  ( $0,5\sigma < \sigma < 2\sigma$ ).

#### § 1.4. Статистичне опрацювання результатів спостережень

Формула (1.3.9) дозволяє теоретично визначити параметри  $M(\Delta)$ ,  $\sigma^2_{\Delta}$  і встановити їх зміст. Визначити вид функції  $P(\Delta)$  і обчислити параметри розподілу можливо лише на основі вичерпного статистичного матеріалу про випадкову величину  $\Delta$  або, якщо використовувати терміни математичної статистики, вибірки безконечно великого розміру.

Проте в реальних умовах при дослідному визначенні похибки і її статистичних параметрів розмір вибірки завжди обмежений. На основі обмеженого експериментального матеріалу можливе лише наближене визначення характеристик похибки вимірювального приладу. Знайдене із дослідних даних наближене значення параметрів розподілу називають їх оцінками.

Нехай виконане  $n$ -кратне вимірювання невідомої величини  $x$  та допомогою вимірювального приладу, систематичні похибки яких виключені ( $\Delta_0=0$ ). Результати спостережень  $x_1, x_2, \dots, x_n$  утворюють виборку розміру  $n$ . Кожний результат  $x_i$  вміщує випадкову похибку  $\Delta_i$ . Використовуючи відомий із теорії ймовірності закон великих чисел, згідно з яким із збільшенням розміру  $n$  вибірки збільшується достовірність середніх значень, за оцінками математичного очікування і дисперсії вимірюваної величини приймемо відповідні середні значення, які можна обчислити за такими формулами:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i = x_0 + \bar{\Delta}_0; \quad (1.4.1)$$

$$\bar{\sigma}^2 = \frac{1}{n-1} \sum (x_i - \bar{x})^2 = \frac{1}{n-1} \sum (\Delta_{oi} - \bar{\Delta}_{oi})^2, \quad (1.4.2)$$

де  $x_i = x_0 + \Delta_{oi}$  – результат  $i$ -го спостереження;  $x_0$  – дійсне значення вимірювальної величини;

$\Delta_0 = \frac{1}{n} \sum \Delta_{0i}$  – вибіркове середнє випадкової похибки;  $\bar{x}$  – оцінка математичного сподівання (дійсне значення) вимірювальної величини;  $\overline{\sigma^2}$  – оцінка дисперсії результатів спостереження.

Із (1.4.2) видно, що вибіркова дисперсія результатів спостережень визначається випадковою складовою похибки і дорівнює вибірковій дисперсії випадкової похибки.

Для характеристики міри розсіювання поруч з  $\overline{\sigma^2}$  використовують також оцінку середньоквадратичного відхилення випадкової величини.

$$\sigma^2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta_{0i} - \Delta_0)^2} \quad (1.4.3)$$

Оцінки (1.4.2) – (1.4.3) наближені і їх точність зростає із збільшенням  $n$ . Так, при  $n \rightarrow \infty$ :  $\Delta_0 \rightarrow 0$ ;  $\bar{x} \rightarrow x_0$ ;  $\overline{\sigma^2} \rightarrow \sigma^2$ . При кінцевому  $n$  оцінки  $\bar{x}$ ,  $\overline{\sigma^2}$  як функції випадкових величин  $x_i$ ,  $\Delta_{0i}$ , також є величинами випадковими. Мірою точності цих оцінок є величини їх дисперсій. Для оцінки  $\bar{x}$ , наприклад, дисперсія вибіркового середнього значення:

$$\sigma_x^2 = \frac{y^2}{n} = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (1.4.4)$$

Таким чином, вибіркове середнє значення  $\bar{x}$  (результат багаторазових вимірювань) є при великих  $n$  значно точнішою оцінкою величини  $x_0$  порівняно з результатом окремого вимірювання. Дисперсія результату багаторазового вимірювання в  $n$  разів менша, а середньоквадратична похибка в  $\Delta n$  менша порівняно з дисперсією однократного вимірювання. Із (1.4.3) випливає, що при багаторазових вимірюваннях зменшується лише випадкова складова похибки засобу вимірювання.

На основі експериментальних даних без попереднього визначення закону розподілу  $P(\Delta)$  можна знайти такі нормовані метрологічні характеристики засобів вимірювання:

1. Систематична складова похибки конкретного екземпляра засобу вимірювання:

$$\Delta_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i \quad (1.4.5)$$

де  $n$  – число дослідів;  $\Delta_i$  –  $i$ -та реалізація похибки засобу вимірювання.

Якщо при наближенні до точки  $x$  діапазону вимірювання приладу із сторони більших і менших значень вимірюваної величини значення  $\Delta_c$  будуть неодинаковими, то систематична похибка буде становити:

$$\overline{\Delta_c} = (\overline{\Delta_{cm}} + \overline{\Delta_{cb}}) / 2 \quad (1.4.6)$$

де  $\overline{\Delta_{cm}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_{mi}$ ;  $\overline{\Delta_{cb}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_{bi}$ ;  $\Delta_{mi}$  –  $i$ -те значення похибки при вимірюванні величини зі сторони менших значень до значення  $x$ ;  $\Delta_{bi}$  – те ж саме, але зі сторони більших значень до значення  $x$ .

2. Варіація, встановлена як абсолютне значення різниці:

$$E = (\Delta_{cm} - \Delta_{cb}) \quad (1.4.7)$$

3. Оцінка середньоквадратичного відхилення  $\sigma(\Delta_0)$  випадкової складової похибки конкретного екземпляра вимірювання:

$$\frac{\sigma}{\sigma(\Delta_0)} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_{mi} - \overline{\Delta_{cm}})^2 + \sum_{i=1}^n (\Delta_{bi} - \overline{\Delta_{cb}})^2}{2n-1} \right]^{1/2} \quad (1.4.8)$$

### § 1.5. Регресійний аналіз результатів вимірювань. Метод найменших квадратів

Для аналізу дослідних даних результатів вимірювань головним завданням є встановлення аналітичного вигляду функціональної залежності  $y = f(x)$ . В більшості випадків вивчення процесу на основі статистичного підходу здійснюють за допомогою рівняння регресії, яке в найпростішому випадку має такий вигляд:

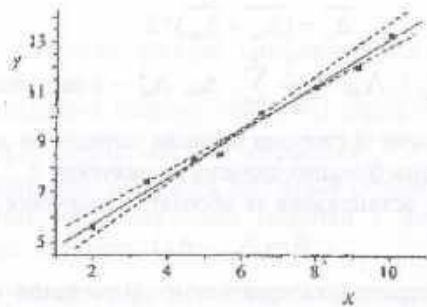
$$y = a_0 x_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n \quad (1.5.1)$$

де  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$  – коефіцієнти рівняння регресії;  $x_0$  – фіктивна змінна, яка дорівнює одиниці в усіх точках.

Для однофакторної залежності, тобто, коли вихідний параметр  $y$  є функцією одної змінної  $x$ , рівняння (1.5.1) перетвориться у звичайне рівняння прямої лінії

$$y = a_0 x_0 + a_1 x_1 \quad (1.5.2)$$

Параметри цього рівняння  $a_1$  і  $a_2$  можна знайти простим графічно-розрахунковим методом. Для цього результати вимірювання у вигляді точок ( $y_i, x_i$ ) наносяться на координатну сітку, через ці точки проводять пряму лінію так, щоб окремі точки були рівномірно розподілені відносно прямої (рис.1.5.1). Параметр  $a_0$  у цьому випадку знаходять як відрізок координати  $y$  за умови  $x = 0$ , а величина  $a_1$  дорівнює тангенсу кута нахилу прямої відносно осі  $x$ .

Рис. 1.5.1. Графік залежності  $y = f(x)$ 

Але з графічного зображення експериментальних даних можна побачити, що внаслідок похибки експерименту простежується певне розсіювання експериментальних даних (точок), так що через них можна провести безліч прямих. Завдання полягає в тому, щоб із цієї множини прямих вибрати одну, яка б з найбільшою достовірністю описувала експериментальні дані. Це забезпечується у тому випадку, коли при заданих значеннях  $x_i$  обчислені за рівнянням (1.5.2) значення параметра  $y$  матимуть найменше відхилення від експериментально знайдених значень  $y_i$ .

Числові значення констант  $v_0$  та  $v_1$  рівняння (1.5.2), які відповідають цій вимозі, можна обчислити за допомогою методу найменших квадратів. Суть цього методу така. У випадку  $n$  взаємозв'язаних пар значень  $(y_i, x_i)$ , можна записати таку систему рівнянь:

$$\begin{aligned} y_1 &= v_0 x_0 + v_1 x_1 \\ y_2 &= v_0 x_0 + v_1 x_2 \\ &\dots \\ y_n &= v_0 x_0 + v_1 x_n. \end{aligned} \quad (1.5.3)$$

У лівій частині кожного рівняння стоять експериментально отримані значення  $y_i$ , а у правій – розраховані  $y_{pi} = v_0 x_0 + v_1 x_i$  величини. Відповідність розрахованих за рівнянням регресії (1.5.2) та експериментально знайдених значень  $y_i$  буде найкращою, якщо сума квадратів

$$\sum_n (y_i - y_{pi})^2 = \sum_n (y_i - v_0 x_0 + v_1 x_i)^2 = \Phi \quad (1.5.4)$$

буде мінімальною. Тобто можна записати:

$$\sum_n (y_i - v_0 x_0 + v_1 x_i)^2 = \Phi = \min \quad (1.5.5)$$

Мінімум функції  $\Phi$  знаходимо, прирівнюючи до нуля частинні похідні

$$\frac{\partial \Phi}{\partial v_0} = 0; \quad \frac{\partial \Phi}{\partial v_1} = 0. \quad (1.5.6)$$

Провівши диференціювання функції (1.5.6) та прирівнюючи до нуля отримані частинні похідні, запишемо:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial v_0} \left[ \sum_n (y_i - v_0 x_0 - v_1 x_i)^2 \right] = -2 \sum_n x_0 (y_i - v_0 x_0 - v_1 x_i) = 0; \quad (1.5.7)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial v_1} \left[ \sum_n (y_i - v_0 x_0 - v_1 x_i)^2 \right] = -2 \sum_n x_i (y_i - v_0 x_0 - v_1 x_i) = 0. \quad (1.5.8)$$

Для частинних похідних вирази (1.5.7) та (1.5.8) дають змогу об'єднати систему рівнянь, у якій число рівнянь рівне числу невідомих коефіцієнтів у рівнянні регресії. Ця система рівнянь має назву системи нормальних рівнянь. Провівши прості алгебраїчні перетворення рівнянь (1.5.7) та (1.5.8), отримаємо систему нормальних рівнянь для лінійної залежності з однією змінною:

$$v_0 \sum_n x_0^2 + v_1 \sum_n x_0 x_i = \sum_n x_0 y_i; \quad (1.5.9)$$

$$v_0 \sum_n x_0 x_i + v_1 \sum_n x_i^2 = \sum_n x_i y_i.$$

Розв'язок системи рівнянь (1.5.9) відносно  $v_0$  та  $v_1$  за умови  $x_0 = 1$  дає формули для розрахунку коефіцієнтів рівняння регресії (1.5.2).

$$v_0 = \frac{\sum_n y_i \sum_n x_i^2 - \sum_n x_i \sum_n x_i y_i}{n \sum_n x_i^2 - (\sum_n x_i)^2}; \quad (1.5.10)$$

$$v_1 = \frac{n \sum_n x_i y_i - \sum_n y_i \sum_n x_i}{n \sum_n x_i^2 - (\sum_n x_i)^2} \quad (1.5.11)$$

У цих рівняннях константи  $v_0$  і  $v_1$  є певною мірою випадковими величинами. Використовуючи критерій Стюдента, можна оцінити довірчий інтервал для  $v_0$  та  $v_1$ . Розраховуючи так звану залишкову дисперсію  $S^2_0(y)$  або дисперсію адекватності, яка характеризує відхилення обчислених значень  $y_{pi}$  відносно експериментальних  $y_i$ :

$$S^2_0(y) = \frac{\sum_n (y_i - y_{pi})^2}{n-2}, \quad (1.5.12)$$

де  $n-2 = f_2$  – число ступенів вільності залишкової дисперсії. Число ступенів вільності у цьому випадку дорівнює числу дослідів мінус число коефіцієнтів рівняння регресії, яке для вищевказаної лінійної залежності рівне двом.

Для констант  $v_0$  та  $v_1$  дисперсії обчислюють, виходячи із закону розподілу похибок, за допомогою наступних рівнянь:

$$S^2_n = \frac{S_0^2(y)}{\sum_n (x - \bar{x})^2} = \frac{nS_0^2(y)}{n \sum_n x_i^2 - (\sum_n x_i)^2}; \quad (1.5.13)$$

$$S^2_n = \frac{S_0^2(y) \sum_n x_i^2}{\sum_n (x - \bar{x})^2} = \frac{nS_0^2(y) \sum_n x_i^2}{n \sum_n x_i^2 - (\sum_n x_i)^2} = \frac{S^2 b_1}{n} \sum_n x_i^2.$$

Зі ступенями вільності  $f_1 = n - 2$ , довірчий інтервал для констант  $v_0$  та  $v_1$  знаходимо за формулами:

$$\Delta v_0 = t(P, f_1) S v_0; \quad \Delta v_1 = t(P, f_1) S v_1, \quad (1.5.14)$$

де  $t(P, f_1)$  – критерій Стьюдента для заданого значення ймовірності  $P$  та числа ступенів вільності  $f_1$ .

При статистичній перевірці адекватності отриманої статистичної моделі, проведеної за допомогою критерію Фішера, передусім треба оцінити дисперсію відтворюваності дослідів  $S^2(y)$ . Для цього проводять декілька серій паралельних дослідів, які реалізують в однакових умовах. Для кожної серії знаходять середнє арифметичне  $\bar{y}$  параметра  $y$ .

$$\bar{y} = \frac{1}{m} \sum_n y_j, \quad (1.5.15)$$

де  $m$  – число паралельних дослідів у серії.

Після цього обчислюють для цих дослідів дисперсію відтворення  $S^2(y)$ :

$$S^2(y) = \frac{1}{m-1} \sum_n (y_j - \bar{y})^2, \quad (1.5.16)$$

де  $m-1 = f_2$  – число ступенів вільності дисперсії відтворення. Остаточне значення дисперсії відтворення знаходять усередненням відповідних значень дисперсії, знайдених у кожній досліджуваній серії.

Враховуючи значення залишкової дисперсії та дисперсії відтворення, розраховують критерій Фішера як співвідношення цих дисперсій:

$$F_{розр} = \frac{S_0^2(y)}{S^2(y)}. \quad (1.5.17)$$

Проводять порівняння отриманого значення  $F_{розр}$  із затабульованим значенням критерію Фішера  $F_{таб}$  для заданого рівня ймовірності  $P$  та ступенів вільності відповідних дисперсій  $f_1$  та  $f_2$ . Якщо виконано умову:

$$F_{розр} \leq F_{таб}(P, f_1, f_2), \quad (1.5.18)$$

тоді одержана модель адекватна і її можна застосувати для подальшого вивчення та оптимізації процесу.

Перевіряючи адекватність рівняння регресії, інколи застосовують також кореляційне співвідношення  $W$  і середню відносну похибку прогнозування  $E$  (%), які виражають такими залежностями:

$$W = \sqrt{1 - \frac{\sum_n (y_i - y_p)^2}{\sum_n (y_i - \bar{y})^2}}; \quad (1.5.19)$$

$$E = \sum_n \left| \frac{y_i - y_p}{y_i} \right| \cdot 100, \quad (1.5.20)$$

де  $y_i$ ,  $y_p$ ,  $\bar{y}$  – відповідно експериментальне обчислене, а також середнє значення параметра  $y$ ;

$n$  – кількість експериментальних значень цього параметра, використаних для перевірки адекватності моделі.

Метод найменших квадратів досить простий і зручний у практичному застосуванні для знаходження лінійних моделей.

Цей метод може бути поширений на деякі нелінійні залежності, які можна перетворити в лінійні, зокрема, гіперболічну залежність:

$y = v_0 + v_1/x$  за допомогою заміни  $z = 1/x$  можна привести до лінійного вигляду

$$y = v_0 + v_1 z.$$

Експоненціальну залежність  $y = a e^{bx}$  можна легко привести до лінійного виду методом логарифмування:

$$\ln y = \ln a + bx. \quad (1.5.21)$$

Логарифмуванням лінеаризується також ступенева залежність  $y = vx^2$ , яка за допомогою заміни  $\ln y = P$ ;  $\ln v = C$ ;  $\ln x = R$  зводиться до лінійного рівняння, що має такий вигляд:

$$P = C + ZR. \quad (1.5.22)$$

Провівши відповідні перетворення, можна привести до лінійного вигляду й складніші залежності, що дає змогу застосувати метод найменших квадратів для оцінки їх параметрів.

## Питання до першого розділу

1. Що називається числовим значенням і результатом вимірювання?
2. Які вимірювання називаються прямими?
3. Що являють собою опосередковані вимірювання?
4. Дайте визначення вимірювального приладу?
5. Що таке вимірювальний перетворювач?
6. Які пристрої називаються вимірювальними установками?
7. Які прилади називаються показуючими приладами?
8. Приведіть типи вимірювальних приладів.
9. Дайте визначення похибки вимірювання?
10. Яку величину називають класом точності вимірювального приладу?
11. Що називається регресійним аналізом результатів вимірювань?
12. Для чого використовуються в статистичній обробці результатів вимірювання критерії Стюдента і Фішера?
13. Для чого слугує в статистичному аналізі результатів вимірювання метод найменших квадратів?
14. Що характеризують математичне сподівання та середньоквадратичне відхилення?
15. В чому полягає суть нормального розподілу Гаусса?

## Розділ 2

### ПРИЛАДИ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ВІДНОСНОЇ ВОЛОГОСТІ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

## 2. Методи і прилади для вимірювання вологості газів

## § 2.1. Психрометричний метод вимірювання відносної вологості

Метод заснований на психрометричному ефекті, тобто на залежності швидкості випаровування вологи в навколишнє середовище від вологості цього середовища. Найпростішим приладом цього методу є психрометр (рис.2.1), який складається із двох термометрів 1 і 3, у одного із яких (вологого) кулька з робочою рідиною обгорнута вологою тканиною 4, яка всмоктує воду із посудини 5. Всі складові психрометра закріплені на підставці 2.

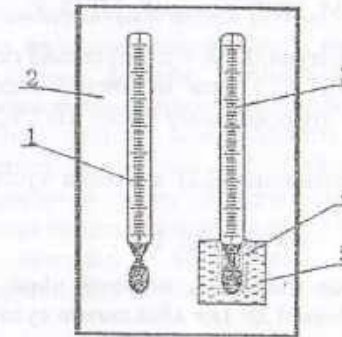


Рис. 2.1. Схема психрометра

1-сухий термометр; 2-підставка; 3-вологий термометр;  
4-волога тканина; 5-посудина з водою

При випаровуванні вологи з поверхні вологого термометра 3 його температура змінюється. В результаті між сухим і вологим термометром створюється різниця температур, яка називається психрометричною різницею. Залежність відносної вологості  $\phi$  від психрометричної різниці ( $t_c - t_n$ ) має такий вигляд:

$$\phi = [P_n A (t_c - t_n)] / P_c, \quad (2.1)$$

де  $P_n$  – тиск насичених парів досліджуваного середовища при температурі вологого термометра, Па;  $t_n$  – температура вологого термометра, °С;

$P_c$  – тиск насичених парів досліджуваного середовища при температурі сухого термометра, Па;  $A$  – психрометричний коефіцієнт, який залежить від конструкції психрометра. Коефіцієнт  $A$  визначають за допомогою психрометричних таблиць, складених для психрометрів певних конструкцій. Маючи покази сухого і вологого термометрів, всі інші параметри навколишнього середовища можна знайти за допомогою I-d діаграми Рамзіна, яка наведена на рис.2.3.

Основними параметрами повітря навколишнього середовища є такі: **Відносна вологість, або ступінь насичення повітря; це відношення маси водяної пари в  $1\text{м}^3$  вологого повітря при заданих умовах до максимально можливої маси водяної пари в  $1\text{м}^3$  повітря при тих же умовах:**

$$\varphi = (q_n / q_h) \cdot 100, \quad (2.2)$$

де  $q_n$  і  $q_h$  – відповідно густина водяної пари в звичайних умовах і в стані 100% насичення повітря вологою,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Відповідно до рівняння Менделєєва – Клапейрона:

$$q_n = P_n \cdot M_n / R \cdot T; \quad q_h = P_h \cdot M_h / R \cdot T, \quad (2.3)$$

де  $T$  – абсолютна температура, К;  $R$  – універсальна газова постійна,  $R = 8314 \text{ Дж} / \text{кмоль} \cdot \text{К}$ ;  $P_n$  – тиск насиченої водяної пари при даній температурі і заданому атмосферному тиску, Па.;  $P_h$  – тиск пари в стані 100% насичення, Па.

Підставивши у рівняння (2.2) значення густин із рівняння (2.3) отримаємо:

$$\varphi = (P_n / P_h) \cdot 100. \quad (2.4)$$

**Вологовміст** – це кількість водяної пари, що знаходиться у вологому повітрі віднесеної до  $1\text{кг}$  абсолютно сухого повітря,  $\text{г}/\text{кг}$  абс. сухого повітря, або  $\text{кг}/\text{кг}$  абс. сухого повітря.

Його розраховують за такою формулою:

$$d = \frac{18}{29} \cdot \frac{\varphi P_h}{C - \varphi P_h} = 0,622 \cdot \frac{\varphi P_h}{C - \varphi P_h}, \quad (2.5)$$

де  $P$  – атмосферний (барометричний) тиск повітря, Па;  
18 і 29 – відповідно молекулярні маси води і повітря,  $\text{кг}/\text{кмоль}$ ;  
 $\varphi$  – відносна вологість повітря, %;  
 $P_h$  – парціальний тиск водяних парів у повітрі у стані 100% насичення його вологою, Па.

Ентальпія вологого повітря дорівнює кількості теплоти, яка міститься в  $1\text{кг}$  вологого повітря і дорівнює сумі ентальпій сухого повітря і води водяної пари, тобто:

$$I = C_{e,n} \cdot t_n + d \cdot i_n, \quad (2.6)$$

де  $C_{e,n}$  – теплоємність сухого повітря,  $\text{Дж}/\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}$ ;

$i_n$  – ентальпія водяної пари,  $\text{Дж}/\text{кг}$ ;

$d$  – вологовміст повітря,  $\text{г}/\text{кг}$  абс. сухого повітря;

$t_n$  – температура повітря,  $^\circ\text{C}$ .

Підставивши числові значення всіх величин у формулу (2.6), отримаємо таке рівняння для розрахунку ентальпії вологого повітря:

$$I = (1000 + 1,97 \cdot 10^3 d) \cdot t_n + 2493 \cdot 10^3 d, \quad (2.7)$$

де 1000 – теплоємність сухого повітря,  $\text{Дж}/\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}$ ;

1,97 – теплоємність перегрітої водяної пари,  $\text{Дж}/\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}$ ;

2493 – прихована теплота пароутворення,  $\text{Дж}/\text{кг}$ ;

$d$  – вологовміст повітря,  $\text{г}/\text{кг}$  абс. сухого повітря;

$t_n$  – температура повітря,  $^\circ\text{C}$ .

Точкою роси називається температура, яку приймає вологе повітря, охолоджуючись при постійному вологовмісті до стану абсолютного насичення вологою. Ізотерма, яка проходить через цю точку, називається температурою точки роси.

Температурою вологого термометра – називається температура, яку приймає вологе повітря, охолоджуючись при постійній ентальпії до стану абсолютного насичення вологою. Маючи будь-яких два параметри вологого повітря, можна знайти всі інші по схемі I-d діаграми яка представлена на рис. 2.2. Найчастіше для цієї мети використовують температури сухого і вологого термометрів вимірюваних за допомогою психрометра представленого на рис. 2.1.

Розглянемо методику визначення параметрів повітря навколишнього середовища за I-d діаграмою.

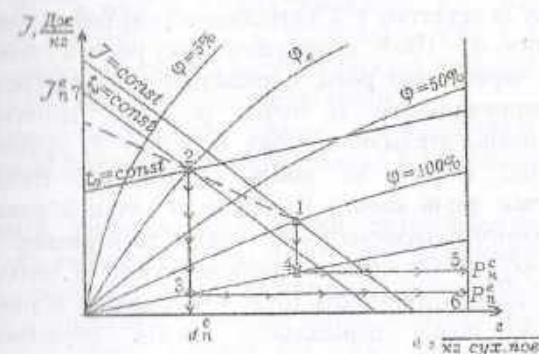


Рис. 2.2. Зміна складу вологого повітря на I-d діаграмі

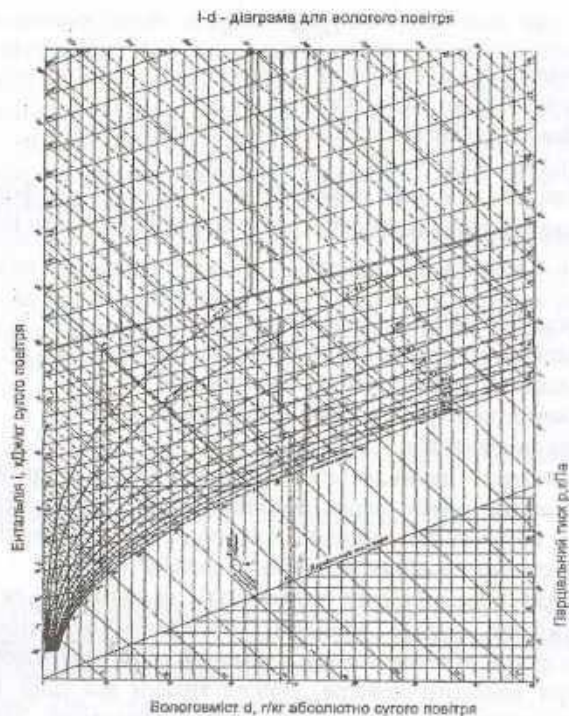


Рис. 2.3. I-d діаграма Рамзіна для вологого повітря

З діаграми видно, що, маючи температуру повітря, тобто температуру сухого термометра  $t_0$  і температуру вологого термометра  $t_m$ , знаходять точку їх перетину т. 2. Опускаючи вниз перпендикуляр із т. 2 до перетину з лінією  $\phi = 100\%$ , отримують точку роси, а ізотерма  $t_n = \text{const}$ , яка проходить через точку роси, називається температурою точки роси. Опускаючи перпендикуляр із точки роси до перетину з лінією парціальних тисків, отримують точку перетину 3, рухаючись від якої паралельно лінії абсцис на шкалі парціальних тисків, знаходять парціальний тиск парів води  $P_n$ . Якщо із точки 2 рухатись по лінії температури вологого термометра  $t_m = \text{const}$  до перетину із  $\phi = 100\%$ , отримують точку 1. Опустивши перпендикуляр із точки 1 на лінію парціальних тисків, отримують точку 4, рухаючись від якої паралельно осі абсцис по шкалі парціальних тисків, отримують значення парціального тиску парів води в стані абсолютного насичення вологою. Аналогічно, маючи точку 2, визначають вологовміст, ентальпію, відносну вологість повітря.

## § 2.2. Електричні психрометри

Психрометричний ефект знайшов своє застосування і в електричних психрометрах з термометрами опору. Психрометрична різниця в таких психрометрах виникає між двома опорними термометрами, один із яких виконує роль сухого, другий – вологого термометра. На рис. 2.2.1 наведена принципова схема електричного психрометра з термометрами опору.

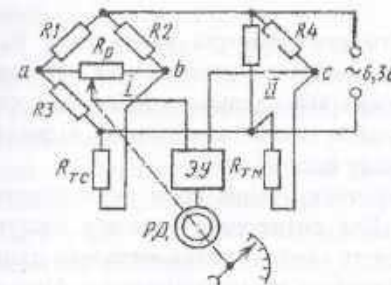


Рис. 2.2.1. Схема електричного психрометра з термометрами опору:  $R_{ТС}$ ,  $R_{ТВ}$  – сухий і вологий термометри опору; РД – реверсивний двигун;  $R_p$  – резистор з бігуном; ЗУ – запам'ятовуючий пристрій;  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$  – постійні резистори; I, II – мости психрометра

Вимірювальна частина приладу складається із двох мостів I та II. Ці мости живляться перемінним струмом напругою 6,3 V від обмотки силового трансформатора електричного підсилювача і мають два загальні плеча  $R_1$  та  $R_3$ . Сухий термометр опору  $R_{ТС}$  включений в плече моста I, вологий  $R_{ТВ}$  – в плече моста II. Міст I утворений постійними резисторами  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_{ТС}$ , а міст II – резисторами  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_4$  та  $R_{ТВ}$ . Різниця потенціалів на вершинах а і в діагоналі моста I пропорційна температурі сухого термометра опору, а різниця потенціалів на вершинах а і с – температурі вологого термометра опору.

Зменшення напруги між точками в і с діагоналі двійного моста пропорційна різниці температур сухого і вологого термометрів опору, тобто  $(t_c - t_b)$ .

Рівновага вимірювальної схеми встановлюється автоматично зміною бігуна резистора  $R_p$ , за допомогою реверсивного двигуна РД. Одночасно переміщується стрілка вимірювального приладу. Шкала ШП приладу відградуєвана в одиницях зміни відносної вологості (%). При від'ємних температурах повітря (не дуже низьких) для змочування мокрого термометра опору застосовують 3% – ний водний розчин формальдегіду.

Переваги електричних психрометрів – достатня точність при додатніх температурах навколишнього середовища і незначна інерційність; недоліки – залежність результатів вимірювання від швидкості руху газоподібного середовища та коливання атмосферного тиску, зменшення чутливості і зростання похибок із зниженням температури середовища.

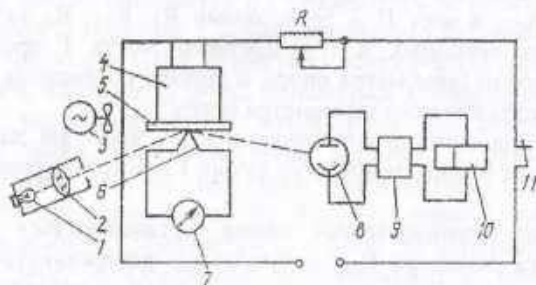
### § 2.3. Конденсаційні гігрометри

Принцип роботи психрометрів цього типу базується на методі точки роси, який передбачає охолодження повітря навколишнього середовища до настання 100% насичення вологою, тобто, до температури точки роси. Цим методом можна вимірювати відносну вологість будь-якого газу при будь-якому тиску.

При постійному тиску точка роси не залежить від температури досліджуваного газу. Для визначення моменту наступання точки роси, зазвичай, використовують охолоджуване металеве дзеркало, температуру якого в момент випадання на ньому конденсату фіксують як точку роси. Робоча поверхня дзеркала повинна бути обезжирена. При наявності в досліджуваному газі пилу, масел, важких вуглеводнів та інших забруднень необхідно передбачити автоматичне очищення поверхні дзеркала перед кожним виміром.

В автоматичних приладах поява точки роси на дзеркальній поверхні визначається, зазвичай, за ослаблення світлового потоку, відбитого від дзеркала і прийнятого фотоприймачем.

На рис. 2.3.1 показана принципова схема конденсаційного гігрометра точки роси.



**Рис. 2.3.1.** Схема конденсаційного гігрометра точки роси  
1-джерело світла; 2-лінза; 3-вентилятор; 4-напівпровідникова батарея; 5-дзеркало;  
6-малоінерційний перетворювач; 7-вторинний прилад; 8-фотоелемент;  
9-електронний блок; 10-поляризоване реле

Охолоджуванем дзеркала слугує напівпровідникова термоелектрична батарея 4, яка працює за принципом ефекту Пельтьє. Цей ефект полягає в підвищенні температури одного спаю і зниження температури другого спаю при проходженні струму в термоелектричному елементах батареї. До холодного спаю напівпровідникового елемента припаяне дзеркало 5. До його поверхні припаяний малоінерційний перетворювач 6, підключений до вторинного приладу 7, шкала якого відградуйована в відсотках вимірювання вологості (%). Сила струму, який проходить через термоелемент, регулюється реостатом R.

Промені світла від джерела 1 через лінзу 2 скеровуються на дзеркало 5 і, відбиваючись від його поверхні, потрапляють на фотоелемент 8. Фотоелемент ввімкнений в електронний блок 9, до виходу якого підключене поляризоване реле 10.

При відсутності конденсату на поверхні дзеркала падаючий на нього світловий потік майже зовсім відбивається і освітлює фотоелемент 8. При цьому спрацьовує реле 10 і замикає контакт 11, який вмикає живлення напівпровідникової батареї 4.

Батарея охолоджує дзеркало 5 до появи на його поверхні конденсату. При температурі точки роси зростає розсіювання світлового потоку, що різко змінює освітленість фотоелемента 8. Струм у реле 10 змінює свій напрям і контакт 11 вимикає живлення батареї 4. Поверхня дзеркала обдувається вентилятором 3, в результаті чого конденсат випаровується, а світловий потік, що попадає на фотоелемент 8, зростає. Цей цикл повторюється.

Існують вологоміри з дещо зміненим принципом дії. В них підтримується постійна температура дзеркала, а конденсат випадає на поверхні дзеркала при зміні тиску газу.

### § 2.4. Сорбційні методи вимірювання вологості

#### 2.4.1. Сорбційно-електролітичні вологоміри (гігрометри)

У цих приладах вологість газів визначають за електричною провідністю ненасичених водних розчинів електролітів, які знаходяться у чутливому щодо вологи елементі.

Схема такого гігрометра показана на рис.2.4.1.

В електролітичному гігрометрі в ролі елемента чутливого до вологи використовується хлористий літій. Насичений розчин хлористого літію нагрівається до температури, при якій парціальний тиск водяної пари над розчином рівний парціальному тиску в навколишньому середовищі. Ось чому, за принципом дії електролітичні гігрометри з підігрівним перетворювачем аналогічні гігрометрам точки роси, але



мають ту перевагу, що нагрівати перетворювач значно легше і простіше, ніж охолоджувати дзеркало в приладах точки роси.

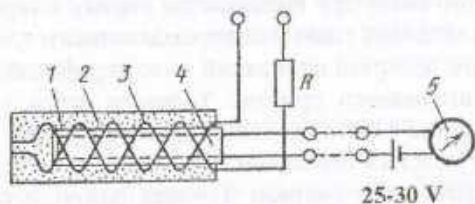


Рис. 2.4.1. Принципова схема електролітичного гігрометра:

1-чутливий елемент; 2-шар скловати; 3-спіральні електроди;  
4-малоінерційний термометр опору; 5-вимірювальний прилад

Чутливий елемент 1 приладу (трубка) являє собою тонкостінну трубку із корозійностійкої сталі, покриту шаром скловати 2, яка просочена розчином хлористого літію.

На скловату намотані ізольовані одна від одної спіралі 3 (електроди) із сітчастою вставкою, яка затримує сильні газові потоки. Всередині трубки 1 поміщається малоінерційний термометр опору 4, до якого під'єднаний вимірювальний прилад 5, шкала якого градуйована в одиницях відносної вологості (%). Срібні спіралі живляться змінним струмом (для запобігання поляризації) напругою 25-30В через резистор R.

Температура хлористого літію неперервно і автоматично встановлюється на точці роси. Це досягається так. При подачі напруги на срібні спіралі через розчин хлористого літію проходить електричний струм, нагріваючи розчин до температури кристалізації хлористого літію; утворення твердої солі призводить до різкого збільшення опору простору між електродами, сила струму і температура перетворювача зменшується доти, поки внаслідок поглинання вологи із навколишнього середовища провідність розчину між електродами знову не підвищиться, що викличе збільшення сили струму і підвищення температури перетворювача. Таким чином, температура в перетворювачі автоматично підтримується на рівні рівноважної, відповідної вологості навколишнього середовища, що оточує перетворювач.

Для точного вимірювання відносної вологості температура досліджуваного газу повинна бути менша ніж рівноважна температура чутливого елемента, але вища ніж точка роси.

Вторинний прилад, під'єднаний до термометра опору (урівноважений міст або логометр), градууюють в одиницях абсолютної вологості. При

завдяки другому термометру опору, який вимірює температуру навколишнього середовища, можливо виміряти відносну вологість.

Електричні гігрометри можна застосовувати для будь-яких газів, що не впливають на розчин хлористого літію. Градування перетворювачів стійке в часі; перетворювачі взаємозамінні. Покази приладів не залежать від тиску. Основний недолік вологомірів з під'єднаними перетворювачами – це малі інтервали їх застосування.

#### 2.4.2. Сорбційно-кулонометричні вологоміри

Призначені для вимірювання абсолютної вологості різних газів. Принцип їх роботи заснований на електролізі вологи в аналізованих газах, а струм, що затрачується на електроліз вологи, пропорційний її концентрації в досліджуваному газі.

На рис. 2.4.2. показана схема кулонометричного вологоміра. У внутрішньому каналі циліндричного пластмасового корпусу 1 розміщені два металеві електроди 2, виконані у вигляді гелікоїдальних відокремлених спіралей. Між електродами нанесена плівка 3 частково гідратованого п'ятиокису фосфору, який має надзвичайно добру здатність до висушування. Через чутливий елемент в напрямку, вказаному стрілками, безперервно проходить аналізований газ із строго постійними витратами. Геометричні розміри чутливого елемента і витрати аналізованого газу вибирають так, щоб волога практично повністю видобувалась із досліджуваного газу. Зазвичай, довжина каналу чутливого елемента декілька десятків сантиметрів, діаметр 0,5±2 мм; діаметр платинових або родієвих електродів не більші, ніж 0,2 мм.

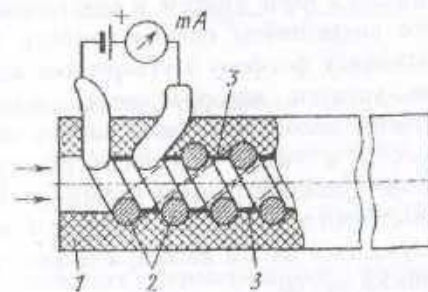


Рис. 2.4.2. Схема кулонометричного вологоміра:

1-пластмасовий корпус; 2-металеві електроди;  
3-плівка п'ятиокису фосфору

Поглинута волога, сполучаючись з речовиною плівки 3, утворює концентрований розчин фосфорної кислоти з високою питомою електричною провідністю.

До електродів під'єднане джерело постійної напруги, яке повинне перевищувати потенціал розкладання води, тому одночасно з поглинанням відбувається її електроліз. Одержані в процесі електролізу кисень і водень виносяться потоком аналізованого газу. При встановленому режимі кількість поглинутої і розкладеної за одиницю часу води однакова і, відповідно до закону Фарадея, сила струму, вимірювана мікроамперметром, включеним послідовно з джерелом живлення, є мірою концентрації вологи в аналізованому газі. При цьому припускають, що сила струму, обумовлена побічними явищами провідності, безмежно мала і нею можна знехтувати. Абсолютна вологість може бути виражена такою залежністю:

$$W = I/Q \cdot E \quad (2.4.1)$$

де  $I$  – сила струму процесу електролізу, А;

$Q$  – витрата аналізованого газу,  $m^3/c$ ;

$E$  – електрохімічний еквівалент, А·с/кг.

Перевага кулонометричних вологомірів – незалежність показів від напруги джерела живлення і складу аналізованого газу. Часткове забруднення плівки сорбента і навіть винесення частки плівки суттєво не впливають на покази приладу. Метод абсолютний і не потребує градування приладу на еталонних газових сумішах.

Суттєве обмеження – вимога відсутності в аналізованих газах слідів компонентів, які мають лужну реакцію. Навіть невеликі домішки аміаку або амінів призводять до швидкого виходу із ладу чутливих елементів приладу. Домішки парів спиртів в аналізованому газі можуть призвести до значного викривлення показів приладу, тому що спирти гідролізуються на п'ятиокису фосфору з утворенням води. Компоненти, які шкодять, можна усунути використовуючи відповідні фільтри. Сорбційно-кулонометричні вологоміри застосовують для вимірювання мікроконцентрації вологи в газах. Різновидністю кулонометричного вологоміра є дифузійний кулонометричний вологомір. Відмінність його від звичайного кулонометричного вологоміра полягає в тому, що із потоку аналізованого газу вилучається не вся волога, а тільки та її частина, яка проникає через дифузійний бар'єр.

Схема такого дифузійного кулонометричного вологоміра наведена на рис.2.4.3. На центральному циліндричному стрижні 1, виготовленому із ізоляційного матеріалу, розмішені два спіральні металеві електроди 2. Між електродами нанесений шар 3 частково гідратованого п'ятиокису фосфору. Міліамперметр під'єднаний безпосередньо до торцевих

металевих вставок 4. На одній осі із стрижнем 1 розмішена прожилка для вологи, перегородка 5 (із полімерних плівок, металокераміки і т.п.), яка утворює дифузійний бар'єр. Деколи використовують і непроникні матеріали (метали, скло та ін.), але тоді в перегородці просвердлюють канали, якими водяні пари дифундують до поверхні чутливого елемента, окритого п'ятиокисом фосфору. Перетворювач можна поміщати безпосередньо в технологічний апарат або трубопровід, через який протікає аналізований газ.

Кількість вологи, що надходить до активної плівки чутливого елемента за одиницю часу, визначається дифузійним опором бар'єру і концентрацією вологи в аналізованому газі. Дифузійні кулонометричні вологоміри порівняно зі звичайними мають ряд суттєвих переваг. Немає необхідності у пристрої для підтримання точних витрат газу. Власне, функцію регулятора витрат у цьому приладі виконує дифузійний бар'єр. Можливість помістити перетворювач безпосередньо в аналізоване середовище дозволяє значно покращити динамічні характеристики приладу, тому що усувається транспортне запізнювання, зв'язане з наявністю комунікацій підведення. Діапазон вимірювання можна розширити в сторону більших концентрацій.

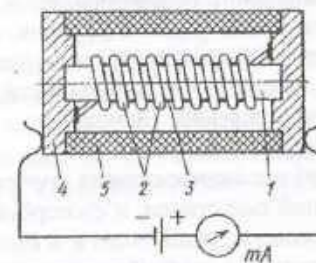


Рис. 2.4.3. Принципова схема дифузійного-кулонометричного вологоміра: 1-циліндричний стрижень; 2-спіральні електроди; 3-гідратований п'ятиокис фосфору; 4-металеві вставки; 5-перегородка.

### 2.4.3. П'єзосорбційні гігрометри

Чутливий елемент п'єзосорбційних гігрометрів являє собою пластину кварцового резонатора, на поверхню якого нанесена плівка гігроскопічної речовини.

У результаті процесів сорбції і десорбції водяних парів плівкою збільшується маса гігроскопічного покриття і, як наслідок цього, змінюється частота коливань п'єзосорбційного чутливого елемента. В

установленому режимі частота коливань є мірою вологості навколишнього середовища.

Зміна маси величини на кварцовій пластині і власної частоти коливань зв'язані рівняннями:

$$\Delta f = f^2 \Delta m / (N \cdot \rho \cdot S), \quad (2.4.2)$$

де  $\Delta f$  – змінна власної частоти коливань, МГц;

$f$  – власна частота коливань, МГц;

$N$  – частотний коефіцієнт;

$\rho$  – густина кварцу, кг/м<sup>3</sup>;

$S$  – площа пластини, м<sup>2</sup>;

$\Delta m$  – змінна маси сорбованої водяної пари, кг.

Відношення  $f^2/(N \cdot \rho \cdot S) = \text{const} = k$  визначається властивостями п'єзометричного матеріалу, тому рівняння (2.4.2) прийме такий вигляд:

$$\Delta f = k \cdot \Delta m. \quad (2.4.3)$$

Конструктивно п'єзосорбційний чутливий елемент досить простий. Метрологічні характеристики п'єзосорбційних чутливих елементів визначаються, головним чином, правильним вибором матеріалу сорбента і технології його нанесення на поверхню п'єзоелемента.

За допомогою кварцового резонатора, що коливається на частоті 15 МГц, можливо визначити зміну  $\Delta m$  на рівні  $10^{-11}$ , що свідчить про надзвичайно високу чутливість п'єзокварцових елементів.

Крім того, до їх переваг необхідно віднести можливість визначення вологості в широкому діапазоні, швидкодію, легкість перетворення частотного виходу в цифрову форму.

При використанні високоефективних сорбентів, таких, як цеоліти, силікагель, сульфирований полістирол, п'єзосорбційний метод придатний для вимірювання мікроконцентрацій вологи в газах. У цьому випадку за чутливістю він порівнюється з сорбційно-кулонометричним методом. Та на відміну від нього може бути застосований для аналізу середовищ, які вміщують компоненти, що реагують з п'ятиокисом фосфору.

Теоретичне визначення ізотерми сорбції води сорбентами має певні труднощі, тому статичні характеристики п'єзосорбційних гігromетрів, як правило, одержують на основі експериментальних даних.

До недоліків п'єзосорбційних гігromетрів необхідно віднести необхідність їх градування на газових сумішах з відомою вологістю, збільшення похибки вимірювання при наявності в аналізованому середовищі домішок, що сорбуються чутливим елементом приладу.

П'єзосорбційні гігromетри широко застосовуються для вимірювання відносної вологості в цехах із виробництва хімічного і

штучного волокна, в камерах штучного клімату, при моніторингу навколишнього природного середовища.

Для вимірювання вологості твердих тіл і сиучих матеріалів використовуються такі методи:

1. **Кондуктометричний метод**, заснований на залежності електричного опору капілярно-пористих твердих тіл від їх вологості;

2. **Дількометричний метод**, заснований на залежності діелектричної проникливості твердих капілярно-пористих матеріалів від їх вологості;

3. **Надвисокочастотний метод** базується на властивості радіохвиль надвисоких частот (НВЧ) охоплювати область дисперсії води;

4. **Оптичний метод**, заснований на вимірюванні потоку випромінювання, який або проходить через тверді матеріали, (метод пропускання) або відбивається від них (метод відбивання);

5. **Метод ядерного магнітного резонансу** (ЯМР) базується на властивості поглинання енергії радіочастотного магнітного поля ядрами водню (протонами) із складу води, що є в досліджуваному матеріалі;

6. **Термовакuumний і теплофізичний метод**, базується на вимірюванні параметрів температурної кривої досліджуваного матеріалу в процесі десорбції вологи у вакуумі.

Усі ці методи мають свої переваги і недоліки і застосовуються для вимірювання вологості твердих сиучих матеріалів, особливо у багатотонажних виробництвах (наприклад, мінеральних добрив, харчових продуктів та ін.); при досліджуванні забруднення повітря навколишнього середовища різними викидами в процесі проведення моніторингу навколишнього середовища та у випадку виникнення надзвичайних ситуацій, як природного, так і техногенного походження.

### Питання до другого розділу

1. Назвіть основні параметри навколишнього середовища.
2. Який ефект називається психрометричним ефектом?
3. Чим відрізняється вологий термометр від звичайного?
4. Для чого використовується I-d діаграма Рамзіна?
5. На чому основана робота електричного психрометра?
6. Поясніть принцип роботи конденсаційних гігрометрів.
7. На чому заснована робота сорбційно-електролітичних гігрометрів?
8. Поясніть роботу сорбційно-кулонометричного вологоміра?
9. Поясніть особливості роботи і будови дифузійного кулонометричного вологоміра.
10. Що являє собою чутливий елемент п'єзосорбційного гігрометра?
11. Назвіть основні методи вимірювання вологості твердих і сігучих матеріалів.

## Розділ 3 ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

### 3. Методи і прилади для вимірювання температури навколишнього середовища

#### § 3.1. Основні поняття, температурні шкали

Температура – важливий параметр навколишнього середовища та всіх технологічних виробничих процесів. Температура тіла характеризує ступінь нагрівання, яка визначається внутрішньою кінетичною енергією теплового руху молекул. Температуру можна визначити як параметр теплового стану. При контакті тіл (газ, рідина, тверде тіло) теплота від одного з них переходить до другого доти, поки значення середньої кінетичної енергії руху молекул цих тіл не зрівняються. Для порівняння ступеня нагрівання тіла використовують зміну будь-якої його фізичної властивості, яка залежить від температури і легко піддаються вимірюванню (наприклад, об'ємне розширення рідини, зміна електричного опору металу і т.д.).

Щоб перейти до кількісного визначення температури, необхідно встановити шкалу температур, тобто, вибрати початок відліку (нуль температурної шкали) та одиницю вимірювання температурного інтервалу (градус).

Температурні шкали, що застосовувались до введення єдиної температурної шкали, представляють собою набір відміток всередині температурного інтервалу, обмеженого двома легковідтворюваними постійними (основними реперними або опорними) точками кипіння і плавлення хімічно чистих речовин. Ці температури приймали рівними довільним числовим значенням  $t^I$  і  $t^{II}$ . Отже, 1 град. =  $(t^{II} - t^I)/n$ , де  $t^I$  і  $t^{II}$  – дві постійні легко відтворювані температури;  $n$  – ціле число, на яке розділений температурний інтервал.

Для розмітки температурної шкали найчастіше використовували об'ємне розширення тіл при нагріванні, а за постійні точки приймали температури кипіння води і танення льоду. На цьому принципі базуються температурні шкали, створені Цельсієм, Кельвіном, Фаренгейтом, Реомором. При створенні цих шкал була прийнята лінійна залежність між об'ємним розширенням рідини і температурою, тобто:

$$dt = R \cdot dV, \quad (3.1.1)$$

де  $R$  – коефіцієнт пропорційності (відповідає відносному температурному коефіцієнту об'ємного розширення).

Інтегрування рівня (3.1.1) дає таке рівняння:

$$t = RV + D, \quad (3.1.2)$$

де  $D$  – постійна інтегрування.

Для визначення постійних  $R$  і  $D$  використовують дві вибрані температури  $t^I$  і  $t^{II}$ . Прийmemo при температурі  $t^I$  об'єм  $V^I$ , а при температурі  $t^{II}$  об'єм  $V^{II}$ , отримаємо:

$$t^I = RV + D; \quad (3.1.3)$$

$$t^{II} = RV^{II} + D. \quad (3.1.4)$$

Віднімаючи (3.1.3) із рівнянь (3.1.2) і (3.1.4), отримаємо:

$$t - t^I = R(V - V^I); \quad (3.1.5)$$

$$t^{II} - t^I = R(V^{II} - V^I). \quad (3.1.6)$$

Розділивши рівняння (3.1.5) на рівняння (3.1.6) і виконавши перетворення, отримаємо:

$$t = t^I + \frac{(V - V^I)}{(V^{II} - V^I)}(t^{II} - t^I), \quad (3.1.7)$$

де  $t^I$  і  $t^{II}$  – температура відповідно танення льоду і кипіння води при нормальному тиску 101325 Па і прискоренні вільного падіння 9,806 м/с<sup>2</sup>;

$V^I$  і  $V^{II}$  – об'єми рідини, що відповідають температурам  $t^I$  і  $t^{II}$ ;

$V$  – об'єм рідини, що відповідає температурі  $t$ .

Рівняння (3.1.7) називається рівнянням шкали температур. У природі немає рідин з лінійною залежністю між коефіцієнтом об'ємного розширення і температурою тому покази термометрів залежать від природи термометричної рідини (ртуті, спирту і т.п.).

Із розвитком науки і техніки виникла необхідність у створенні єдиної температурної шкали, не зв'язаної з будь-якими частковими властивостями термометричної речовини і придатної в широкому діапазоні температур. У 1848 р. Кельвін, виходячи із другого закону термодинаміки, запропонував визначати температуру на основі рівності:

$$T_2/(T_2 - T_1) = Q_2/(Q_2 - Q_1), \quad (3.1.8)$$

де  $T_1$  і  $T_2$  – температура відповідно холодильника і нагрівача;

$Q_1$  і  $Q_2$  – кількість теплоти, відповідно отриманої робочою рідиною від нагрівача і відданої холодильнику (для ідеальної машини, що працює за циклом Карно).

Нехай  $T_2$  рівне температурі кипіння води ( $T_{100}$ ), а  $T_1$  – температура танення льоду ( $T_0$ ); тоді, прийнявши різницю  $T_1 - T_2 = 100$  град і позначивши

кількість теплоти, що відповідає цим температурам, через  $Q_{100}$  і  $Q_0$  отримаємо:

$$T_{100} = Q_{100} 100 / (Q_{100} - Q_0); \quad T_0 = Q_0 \cdot 100 / (Q_{100} - Q_0).$$

При будь-якій температурі нагрівача отримаємо:

$$T = Q \cdot 100 / (Q_{100} - Q_0). \quad (3.1.9)$$

Рівняння (3.1.9) є рівнянням термодинамічної шкали температур, яка не залежить від властивостей термометричної речовини. В Україні передбачено використання двох температурних шкал: термодинамічної і міжнародної практичної.

У термодинамічній шкалі Кельвіна нижньою є точка абсолютного нуля (0, К), а єдиною експериментальною основною точкою – потрійна точка води. Цій точці відповідає значення (273,16 К). Потрійна точка води (температура рівноважного стану води в твердій, рідкій і газоподібній фазах) вища ніж точка плавлення льоду на 0,01 град. Термодинамічну шкалу називають абсолютною, якщо в ній за нуль прийнята точка, яка на 273,16 К нижча, ніж точка плавлення льоду.

Строго кажучи, відтворити шкалу Кельвіна неможливо, оскільки рівняння (3.1.8) її виведене для ідеального циклу Карно. Термодинамічна шкала температур співпадає зі шкалою газового термометра, заповненого ідеальним газом. Відомо, що деякі гази (водень, гелій, азот) в широкому діапазоні температур за своїми властивостями порівняно мало відрізняються від ідеального газу. Так, шкала водневого термометра (з врахуванням поправки на відхилення властивостей реального газу від ідеального) є практично термодинамічною шкалою температур.

Газові термометри – досить точні прилади для вимірювання температур, але робота з ними надзвичайно складна, а діапазон вимірювання температури відносно вузький. Вони не мають широкого практичного застосування. У зв'язку з цим, виникла необхідність розробити таку практичну температурну шкалу, яка, співпадаючи з термодинамічною, була б зручна при вимірюваннях і забезпечувала б надійність їх відтворення.

Такі властивості має міжнародна практична температурна шкала, в основі якої – ряд відтворюваних рівноважних станів, котрим відповідають певні значення температур (основні реперні точки), і еталонні прилади, градуйовані при цих температурах. В інтервалі між температурами основних реперних точок інтерполяцію здійснюють за формулами, що встановлюють зв'язок між показами еталонних приладів і значеннями міжнародної практичної температурної шкали. Основні реперні точки реалізуються як певні стани фазових рівноваг деяких чистих речовин і охоплюють інтервал температур від - 259,34 °С (потрійна точка рівноваги водню) до + 1064,43 °С (точка тверднення золота).

Еталонним приладом, що використовується в проміжку температури від  $-259,34$  до  $+630,74$  °С, є платиновий термометр опору, від  $+630,74$  до  $+1064,43$  °С – термометричний термометр з термоелектродами із платинородію (10 % родію) і платини 90 %. Температуру, більшу, ніж  $1064,43$  °С визначають за міжнародною практичною шкалою відповідно до закону Планка.

Температуру, виміряну за міжнародною практичною шкалою, позначають буквою  $t$ , а числові значення супроводжують знаком °С.

По обох шкалах (термодинамічній і міжнародній) температури можна виразити як в К так і в °С залежно від початку відліку (положення нуля) за шкалою. Температура за термодинамічною шкалою зв'язана з температурою за міжнародною практичною шкалою таким співвідношенням:

$$T = t + 273,16. \quad (3.1.10)$$

У 1948 р. IX Генеральна конференція мір і ваг назвала міжнародну практичну шкалу – шкалою Цельсія.

У деяких країнах Європи, Азії, Америки використовується шкала Фарангейта, в якій нижньою точкою є  $32$  °F, що відповідає  $0$  °С і верхньою – точка  $212$  °F, що відповідає  $100$  °С за шкалою Цельсія. Температура за шкалою Фарангейта зв'язана із температурою за шкалою Цельсія таким співвідношенням:

$$^{\circ}\text{F} = 32 + \frac{9}{5} ^{\circ}\text{C}, \quad (3.1.11)$$

а температура за шкалою Цельсія зв'язана із температурою шкали Фарангейта наступним співвідношенням:

$$^{\circ}\text{C} = \frac{5}{9} (^{\circ}\text{F} - 32). \quad (3.1.12)$$

\* Шкала Реомюра не знайшла практичного застосування і тепер майже не використовується.

### § 3.2. Класифікація приладів для вимірювання температури

Залежно від принципу дії промислові прилади для вимірювання температури діляться на такі групи.

**Манометричні термометри** базуються на зміні тиску робочої речовини при постійному об'ємі зі зміною температури.

**Термоелектричні термометри** оснащені термоелектричним перетворювачем (термопарою), для якого базується на використанні залежності термоелектрорушійної сили від температури.

**Термометри опору** оснащені термоперетворювачем опору, дія якого базується на використанні залежності електричного опору чистого елемента (провідника або напівпровідника) від температури. Найбільше розповсюдження мають такі пірометри випромінювання:

**квазімонохроматичний пірометр**, дія якого базується на використанні залежності температури від спектральної енергетичної яскравості, що теоретично описується для абсолютного чорного тіла рівняннями Планка і Віна;

**пірометр спектрального відношення**, дія якого базується на залежності від температури тіла відношення енергетичних яскравостей в двох або декількох спектральних інтервалах;

**пірометр повного випромінювання**, дія якого базується на використанні залежності температури від інтегральної яскравості випромінювання.

#### 3.2.1. Манометричні термометри

Розрізняють наступні типи манометричних термометрів:

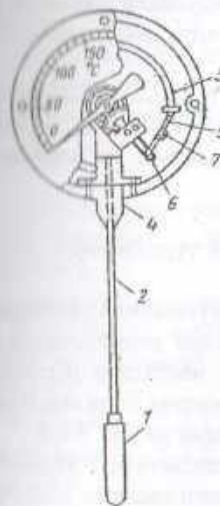


Рис. 3.2.1. Схема манометричного термометра з трубчатим термометром і трубчатим термометром:  
1-термобалон; 2-капілярна трубка;  
3-манометрична пружина; 4-тримач;  
5-повідок; 6-сектор;  
7-біметалевий компенсатор

- газові, в яких вся система заповнена газом під деяким надлишковим тиском;
- рідинні, в яких система заповнена рідиною;
- конденсатні, в яких термобалон частково заповнений рідиною, яка кипить при низькій температурі, а решта простору термобалона заповнена парою цієї рідини.

За конструкцією манометричні термометри всіх типів однакові. Вони бувають показуючими, ресструючими і контактними. Манометричний термометр представлений на рис. (3.2.1.). Він складається із термобалона 1, капілярної трубки 2, манометричної пружини 3.

Манометрична трубка закріплена на корпусі за допомогою тримача 4. Для з'єднання манометричної пружини 3 із сектором 6 служать повідок 5 і біметалевий компенсатор 7.

Уся система приладу (термобалон, капілярна трубка, манометрична пружина) заповнена робочою рідиною.

Термобалон 1 вміщують у зону вимірювання температури. При нагріванні термобалона тиск робочої речовини всередині замкненої системи збільшується. Збільшення тиску сприймається манометричною трубчатого пружиною 3, яка через повідок 5 і компенсатор 7 повертає зубчатий сектор, внаслідок чого стрілка приладу показує відповідну температуру на шкалі приладу.

Термобалон, зазвичай, виготовляють із корозійностійкої сталі, а капіляр – з мідної або сталеві трубки з внутрішнім діаметром 0,15-0,5 мм. Залежно від призначення приладу довжина капілярної трубки може бути різною і знаходиться, зазвичай, в межах такого ряду: 1; 1,6; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 40 і 60 м. Іноді капіляра немає, і термобалон з'єднують безпосередньо з манометричною частиною. Для захисту від механічних пошкоджень капіляр вміщують у захисну оболонку із сталевих плетеного рукава.

У манометричних термометрах застосовують одновиткові (гелікоїдальні) з числом витків від 6 до 9 і спіральні манометричні трубки.

Манометричні термометри широко застосовують в хімічних виробництвах. Вони прості за конструкцією, надійні в роботі, а за відсутності електроприводу діаграми вибухо- і пожежобезпечні.

За допомогою цих приладів можна вимірювати температури в діапазоні від -150 до +600 °С. Згідно зі стандартом, манометричні термометри мають такі класи точності: 1,0; 1,5; 2,5; 4,0.

Для роботи з вторинними приладами виготовляють манометричні термометри з електричною і пневматичною дистанційними передачами показів. У цих приладах температура перетворюється на уніфікований електричний чи пневматичний сигнал.

### § 3.2.2. Контактний манометричний термометр

Прилад призначений для автоматичного регулювання температури в заданому діапазоні її вимірювань. Такі термометри використовуються в пожежо- і вибухонебезпечних виробництвах, де необхідно підтримувати температуру в строго заданому технологічному процесом діапазоні її зміни.

Принципова схема такого термометра показана на рис. 3.2.2.

Контактний манометричний термометр складається з термобалона, капілярної трубки і манометричної пружини (на схемі рисунка 3.2.2. умовно не показані). На стрілці 1 термометра є електроконтакт, який при доторканні до контакту 2 (мінімальної температури) або 3 (максимальної температури) замикає електричну схему однієї з сигнальних ламп 4. Контакти 2 і 3 встановлюють на задану температуру за шкалою 5 приладу ключем, встановленим у гніздо кнопки, яка укріплена в центрі скла приладу. Прилад підключають до електромережі 220 V через клемну коробку 6.

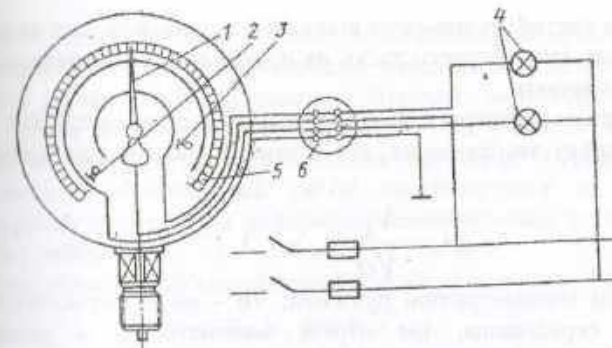


Рис. 3.2.2. Схема контактної манометричної термометричної системи:  
1-стрілка; 2,3-контакти; 4-сигнальні лампи; 5-шкала; 6-клемна коробка

### § 3.2.3. Манометричні газові термометри

Принцип дії манометричних газових термометрів базується на залежності між температурою і тиском газу, який знаходиться в герметично замкнутій термосистемі. Початковий тиск у газових термометрах залежить від температурних меж і складає, зазвичай, 0,98 – 4,9 МПа. Чим вища температура, тим нижчий тиск і навпаки.

Залежність тиску від температури описується таким рівнянням:

$$P_t = P_0 [1 + \beta (t - t_0)] \quad (3.2.3.1)$$

де  $\beta = 1/273,16$  – температурний коефіцієнт розширення газу;

$t_0$  і  $t$  – початкова і кінцева температури;  $P_0$  – тиск робочої речовини при температурі  $t_0$ .

Шкала таких термометрів рівномірна, і це їх перевага.

У діапазоні вимірюваних температур відмінність властивостей реальних та ідеальних газів незначна і враховується при градуванні термометрів.

Із рівняння (3.2.3.1) зміна тиску  $\Delta P = P_t - P_0 = P_0 \beta (t - t_0)$  (3.2.3.2), тоді із рівняння (3.2.3.2) початковий тиск у системі газового термометра становить:

$$P_0 = \Delta P / [\beta (t - t_0)] \quad (3.2.3.3)$$

Газ для заповнення манометричних термометрів повинен бути хімічно інертним, мати незначну в'язкість, малу теплоємність, легко добуватися в чистому вигляді. Всім цим вимогам найбільше відповідає азот. Термометри, заповнені азотом, застосовують у діапазоні температур від 0 до +600 °С.

Якщо в системі термометра відносний початковий тиск великий, то вплив коливань атмосферного тиску на покази приладу невеликий і його можна не враховувати.

Відхилення температури навколишнього середовища від  $+20^{\circ}\text{C}$  викликає похибку вимірювання, яку можна підрахувати за наближеною формулою:

$$\Delta t_m = \frac{V_K}{V\sigma} (t_m - t_o), \quad (3.2.3.4)$$

де  $V_m$  – об'єм манометричної пружини;  $V\sigma$  – об'єм термобалона;  $t_m$  – температура середовища, що оточує манометр;  $t_o$  – температура градуювання приладу, (зазвичай,  $20^{\circ}\text{C}$ ).

Похибка від нагрівання капілярної трубки становить:

$$\Delta t_k = \frac{V_K}{V\sigma} (t_k - t_o), \quad (3.2.3.5)$$

де  $V_k$  – об'єм капілярної трубки;  $t_k$  – температура середовища, яке оточує капіляр.

Похибка від зміни температури для капіляра більша, ніж для манометра. Із формули (3.2.3.5) видно, що похибка зростає пропорційно до об'єму, а отже, і до довжини капіляра. Вона може бути зменшена збільшенням об'єму термобалона при тій же довжині капіляра. Як правило, об'єм термобалона складає 90 % загального об'єму термометра. Користуючись формулою (3.2.3.5), можна підрахувати найбільшу для даного термобалона довжину капіляра, при якій похибка  $\Delta t_k$  не буде перевершувати деяке задане значення для даної різниці температур.

При правильно вибраному співвідношенні об'ємів термобалона, капіляра, трубчатой пружини термометри із задовільною точністю можуть працювати без температурної компенсації.

До специфічних недоліків газових манометричних термометрів належать такі: порівняно велика теплова інерція, обумовлена низьким коефіцієнтом теплообміну між стінками термобалона і газом який його наповнює, а також малою теплопровідністю газу; великі розміри термобалона, що утруднює його встановлення на трубопроводах малого діаметру; необхідність часто перевіряти його. Останнє викликане тим, що в процесі експлуатації газових термометрів можливе порушення герметичності і витікання газу, а це не завжди можна зразу помітити.

### § 3.2.4. Манометричні рідинні термометри

У приладах цього типу всю систему термометра заповнюють рідиною під деяким початковим тиском. До рідин, що їх застосовують для

вимірювання, ставлять певні вимоги: якнайбільший коефіцієнт об'ємного розширення, висока теплопровідність, невелика теплоємність і хімічна інертність до матеріалу термометра. Зазвичай, застосовують силіконові рідини. Межа вимірювання температури – від  $-150$  до  $+300^{\circ}\text{C}$ . При підвищенні температури термобалона від  $t_o$  до  $t$  рідина в ньому розширюється, надлишковий об'єм виштовхується в капіляр і в манометричну трубку. При деформації манометричної трубки її вільний кінець переміщується.

Надлишковий об'єм рідини  $\Delta V$ , який витісняється з термобалона:

$$\Delta V = V_o (\beta - 3\alpha) (t - t_o), \quad (3.2.4.1)$$

де  $\beta$  – температурний коефіцієнт об'ємного розширення рідини;

$\alpha$  – температурний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу термобалона;

$V_o$  – об'єм рідини в термобалоні при температурі  $t_o$ .

Як видно з рівняння (3.2.4.2), зміна об'єму рідини при нагріванні є лінійною функцією температур; тому рідинні термометри, як і газові, мають рівномірну шкалу.

Для того, щоб не допустити закипання рідини, в термометрі забезпечується початковий тиск  $1,47 - 1,96$  МПа.

Завдяки великій теплопровідності рідини термобалон термометра порівняно швидко приймає температуру вимірюваного середовища. Проте, з цієї ж причини, похибки від коливання температури навколишнього середовища у рідинних термометрів більші, ніж у газових. Температурні похибки підраховують за формулами, що використовуються для газових термометрів. При значній довжині капіляра (більше  $0,6-10$  м) для рідинних термометрів застосовують компенсаційні пристрої у вигляді біметалевого компенсатора.

Для рідинних термометрів необхідно також враховувати похибку, що викликана різним щодо висоти розміщення термобалона відносно манометра. Ця похибка повинна бути компенсована установкою стрілки або пера приладу на нуль або на початок шкали за допомогою механічного коректора після монтажу термометра. Рідина практично не стискається, тому зміна атмосферного тиску не впливає на покази приладу.

### § 3.2.5. Манометричні конденсаційні термометри

У конденсаційних термометрах термобалон зазвичай, заповнюють на  $2/3$  об'єму рідиною, яка кипить при низькій температурі. Перед заповненням термометра повітря зі системи випускають. В замкнутій системі термометра завжди підтримується динамічна рівновага процесів, які протікають одночасно: випаровування і конденсації. При підвищенні



температури підсилюється випаровування рідини і збільшується пружність пари, а в зв'язку з цим посилюється також і процес конденсації. Вкінці насичена пара досягає певного тиску, який строго відповідає температурі середовища.

Середовище, що заповнює капіляр і манометричну трубку, служить передавачем тиску незалежно від того, рідке воно чи газоподібне. Оскільки залежність тиску насиченої пари від температури однозначна тільки до критичної температури, то верхня межа шкали термометра повинна бути нижча ніж критична температура цієї рідини. Тиск пари змінюється із температурою, передається через капіляр манометричної пружини. Зміна тиску насиченої пари непропорційна зміні температури, тому шкала конденсаційного термометра нерівномірна. Це один із недоліків конденсаційних термометрів. Зміна температури капіляра і манометричної трубки не впливає на тиск у системі конденсаційного термометра; довжина капіляра термометрів такого типу обмежується, в основному тертям, рідини в капілярі. Для отримання рівномірної шкали конденсаційні термометри деяких типів оснащують спеціальним додатковим пристроєм.

Рідини для заповнення термометрів повинні бути хімічно чисті, а точка їх кипіння – достатньо низька, щоб забезпечити необхідну величину тиску в межах вимірюваних температур. Крім того, рідини не повинні хімічно взаємодіяти з матеріалом термометра. В діапазоні температур від  $-50^{\circ}\text{C}$  до  $+300^{\circ}\text{C}$  для заповнення термобалона використовують різні рідини, які киплять при низькій температурі.

Кількість рідини в термобалоні не має суттєвого значення. Важливо тільки, щоб при найбільш низькій вимірюваній температурі в термобалоні була кількість насиченої пари, не випарованої рідини. Термобалон повинен бути заповнений із таким розрахунком, щоб відкритий кінець капілярної трубки, який входить в нього був у всіх випадках занурений в рідину.

Нижча межа вимірювання температури конденсаційним термометром обмежується певною величиною тиску пари.

Конденсаційні термометри більш чутливі, ніж термометри інших типів. Це пояснюється тим, що тиск насиченої пари дуже швидко змінюється зі зміною температури.

Деформація манометричної трубки пропорційна надлишковому тиску насиченої пари рідини, тобто, різниці тиску пари рідини і атмосферного тиску, тому зміна атмосферного тиску впливає на покази приладу. Для зменшення похибки необхідно, щоб тиск насиченої пари робочої рідини в діапазоні вимірювання температур був значно більший, ніж атмосферний тиск.

### 3.3. Термоелектричні термометри

#### § 3.3.1. Термоелектричний ефект

В основу зміни температури термоелектричними термометрами покладений термоелектричний ефект, який полягає в тому, що в замкненому колі термоелектричного перетворювача (термопари), створеного двома або декількома різномірними провідниками (рис. 3.3.1.), виникає електричний струм, якщо хоч би два місця з'єднання (спаювання) провідників мають різні температури. Спай, який має температуру  $t$ , вважається робочим, а спай, який має температуру  $t_0$  – вільним. Провідники А і В називаються термоелектродами. Термоелектричний ефект пояснюється наявністю в металі вільних електронів, число яких в одиниці об'єму різне для різних металів.

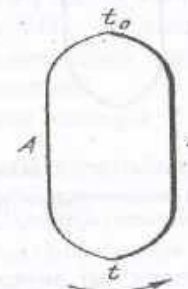


Рис. 3.3.1. Термоелектричне коло із двох різномірних провідників А, В – термоелектроди;  $t$  – температура робочого спаю

Припустімо, що в спаї з температурою  $t$  електрони із металу А дифундують у метал В в більшій кількості, ніж в зворотному напрямку; тому метал А заряджується додатньо, а метал В – від'ємно. Електричне поле, що виникає в місці дотику провідників, перешкоджає цій дифузії, і, коли швидкість дифузії електронів стане рівна їх зворотньому переходу під впливом встановленого електричного поля, настає стан рухомої рівноваги. При такому стані між провідниками А і В виникає деяка різниця потенціалів.

Якщо спаяні однорідні провідники (рис. 3.3.2.), кінці яких нагріті до різних температур, то вільні електрони дифундують із більш нагрітих частин провідників у менш нагріті з більшою інтенсивністю, ніж у зворотньому напрямі. Більш нагріті кінці провідників заряджуються додатньо доти, поки не настане рівноважний стан за рахунок створення різниці потенціалів, яка діє в напрямку, зворотньому дифузії електронів.

Електронна теорія дає лише фізичне (якісне) пояснення термоелектричного ефекту. Кількісне визначення термо-ЕРС на основі цієї теорії неможливе, оскільки число вільних електронів, в одиниці об'єму не піддається кількісній оцінці, і невідомий закон їх зміни зі зміною температури. Із сказаного випливає, що в найпростішому термоелектричному колі, складеному з двох різнорідних провідників А і В (рис. 3.3.1), виникають чотири різні термо-ЕРС: дві термо-ЕРС в місцях спаю провідників А і В; термо-ЕРС на кінці провідника А і термо-ЕРС на кінці провідника В.

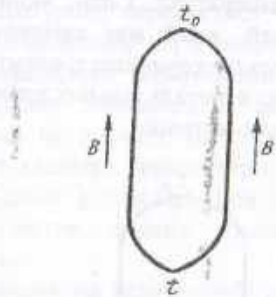


Рис. 3.3.2. Термоелектричне коло із однорідних провідників  
В, В – однорідні термоелектроди (провідники);  
 $t_0, t$  – температури холодного і нагрітого термоелектродів

Враховуючи ці два фактори, які визначають сумарну термо-ЕРС замкнутого кола із двох провідників А і В, спаї яких нагріті до температур  $t$  і  $t_0$ , обходячи коло в напрямку проти годинникової стрілки, отримаємо:

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) + e_{AB}(t_0), \quad (3.3.1)$$

де  $e_{AB}(t, t_0)$  – сумарна термо-ЕРС, що визначається дією обох факторів;

$e_{AB}(t_0)$  – термо-ЕРС, обумовлене контактною різницею потенціалів і різницею температур кінців провідників А і В. Якщо температура спаїв однакова, то термо-ЕРС в колі рівна нулю, оскільки в обох випадках виникають термо-ЕРС, рівні за величиною і протилежно спрямовані. Отже, при  $t = t_0$ :

$$E_{AB}(t_0) = e_{AB}(t_0) + e_{AB}(t_0) = 0, \text{ звідки } e_{AB}(t_0) = -e_{AB}(t_0).$$

Підставивши останній вираз у рівняння (3.3.1) отримаємо:

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0), \quad (3.3.2)$$

звідки випливає, що термо-ЕРС являє собою складну функцію двох перемінних величин  $t$  і  $t_0$ , тобто температур обох спаїв.

Підтримуючи постійну температуру одного із спаїв, наприклад, прийнявши  $t_0 = \text{const}$ , отримаємо:

$$E_{AB}(t, t_0) = f(t). \quad (3.3.3)$$

Якщо для такого термоелектричного перетворювача експериментально, тобто шляхом градуювання, знайдено залежність (3.3.3), то вимірювання температури зводиться до визначення ЕРС термометра.

### § 3.3.2. Увімкнення третього провідника в коло термоелектричного перетворювача

Для увімкнення вимірювального приладу необхідно розірвати електричне коло. Розрив можна провести в спаї з температурою  $t_0$  (рис. 3.3.3.) або в одному із термоелектродів (рис. 3.3.4). Незважаючи на те, що схеми, показані на рис. 3.3.3 і 3.3.4, зовнішньо відрізняються від схеми на рис. 3.3.1, термо-ЕРС, що виникають в термоелектричному перетворювачі (ТЕП), однакові, якщо температури  $t$  і  $t_0$  і температури кінців провідника С також однакові.

Для схеми 3.3.3. можна записати:

$$E_{ABC}(t, t_0) = e_{AB}(t) + e_{BC}(t_0) + e_{CA}(t_0), \text{ якщо } t = t_0,$$

тобто температури спаїв рівні, тоді:

$$E_{ABC}(t, t_0) = e_{AB}(t_0) + e_{BC}(t_0) + e_{CA}(t_0) = 0. \quad (3.3.4)$$

Із рівняння (3.3.4) маємо:

$$e_{BC}(t_0) + e_{CA}(t_0) = -e_{AB}(t_0).$$

Підставивши цей вираз у рівняння (3.3.4), отримаємо рівняння (3.3.2).

Для схеми на рис. 3.3.4 маємо:

$$E_{ABC}(t, t_0) = e_{AB}(t) + e_{BC}(t_1) + e_{CB}(t_1) + e_{AB}(t_0). \quad (3.3.5)$$

Якщо врахувати, що  $e_{BC}(t_1) = -e_{CB}(t_1)$  і  $e_{BA}(t_0) = -e_{AB}(t_0)$ , то рівняння (3.3.5) перетворюється в рівняння (3.3.2).

Із цього випливає, що термо-ЕРС термоелектричного термометра не змінюється від введення його в коло третього провідника, якщо кінці цього провідника мають однакові температури.

Практично це означає, що в коло ТЕП можна вмикати вимірювальні проводи, вимірювальні прилади. Найчастіше всього третій провідник включають за схемою, показаною на рис. 3.3.3. Спосіб виготовлення спаїв ТЕП (зварка, пайка) не впливає на величину термо-ЕРС термометра, якщо розміри їх такі, що температура в усіх точках однакова.

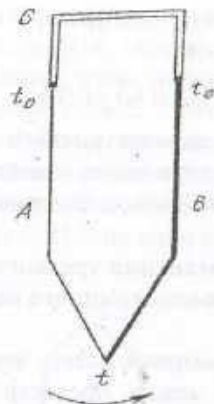


Рис. 3.3.3. Коло з третім провідником С, включеним у спай термоелектроперетворювача А, В – термоелектроди; С – третій провідник;

$t_0, t$  – температури холодного і нагрітого спаїв термоелектроперетворювача

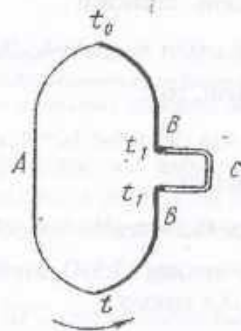


Рис. 3.3.4. Коло з третім провідником С, включеним у термоелектрод термоперетворювача А, В – термоелектроди; С – провідник, включений в термоелектрод В;  $t_1', t_1$  – температури на кінцях провідника С;

$t_0, t$  – температури холодного і нагрітого спаїв термоелектроперетворювача

При різних температурах кінців третього провідника термо-ЕРС термоелектричного термометра зменшується на величину термо-ЕРС "паразитної" пари АС (див. рис. 3.3.3) або ВС (див. рис. 3.3.4) при температурах на кінцях провідника  $t_1$  і  $t_1'$  або  $t_0$  і  $t_0'$ . У зв'язку з цим, в термоелектричному колі бажано застосовувати провідники, які незначно відрізняються за термоелектричними властивостями від термоелектродів ТЕП.

### 3.3.3. Термоелектричні матеріали і термоелектричні перетворювачі

Будь-яка пара різнорідних провідників може утворювати термоелектро-перетворювач (ТЕП). Проте не будь-який ТЕП придатний для практичного застосування, оскільки сучасна техніка ставить до матеріалів термоелектродів певні вимоги: стійкість до впливу високих температур, постійність термо-ЕРС в часі, якнайбільшу величину термо-ЕРС і однозначну залежність її від температури, невеликий температурний коефіцієнт електричного опору і велику електропровідність, відтворюваність термоелектричних властивостей, що забезпечує взаємозамінність термоелектричних термометрів.

Усім вказаним вимогам повністю не відповідає ні один із відомих термоелектродних матеріалів, тому на практиці доводиться користуватися різними матеріалами в різних діапазонах вимірювання температур.

Основні характеристики застосовуваних на практиці термоелектродних матеріалів наведені в табл. 3.3.1.

Таблиця 3.3.1.

Матеріали	Полярність	Термо-ЕРС в парі з платиною при $t=100^{\circ}\text{C}$ , $t_0=0^{\circ}\text{C}$ , мВ	Цигмовий електричний опір при $20^{\circ}\text{C}$ , $\text{m} \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	Температурний коефіцієнт електричного опору, $\text{d} \cdot 10^4, \text{L}^{\circ}\text{C}$
Платина	-	0	0,11	3,9
Платинородій (10 % родія)	+	+0,64	0,18	1,07
Хромель	+	від +2,77 до +3,13	0,67	0,5
Аломель	-	від -1,02 до +1,38	0,33	1
Копель	-	від -3,82 до -4,18	0,47	0,1
Залізо	+	від +1,57 до +1,93	0,0918	25 - 6,57
Мідь	+	+0,76	0,017	4,25
Константан	-	-3,4	0,46	$(1-4) \cdot 10^{-2}$

Для всіх металів і сплавів функційна залежність термо-ЕРС від температури складна і описати її аналітично, фактично, неможливо. Виняток становить лише пара платино-платинородій-платина, для якої

залежність термо-ЕРС від температури в інтервалі від + 300 до 1300 °С при температурі  $t=0^{\circ}\text{C}$  досить точно співпадає з параболою:

$$E(t_0) = \alpha + \beta t + \gamma t^2, \quad (3.3.6)$$

де  $\alpha, \beta, \gamma$  – постійні, які визначаються за температурами твердіння сурми (630,74 °С), срібла (961, 93 °С) і золота (1064, 43 °С).

В Україні відповідно до стандартів прийнято шість типів технічних ТЕР з металевими термоелектродами.

1. Платинородій (90 % Pt + 10 % Rh) платинові ТЕР (тип ТПП). Залежно від призначення ці перетворювачі поділяються на еталонні (зразкові) і робочі. Еталонні ТЕР визначають високі вимоги до чистоти платини, з якої їх виготовляють. Платина повинна відповідати умові:

$R_{100}/R_0 \geq 1,391$ ; де  $R_{100}$  і  $R_0$  – опори платинового дроту при температурі відповідно 100 і 0 °С. Еталонні ТЕР призначені для перевірки зразкових ТЕР, зразкові ТЕР – для перевірки робочих ТЕР.

Платинородій – платинові ТЕР надійно працюють у нейтральному і кислому середовищах, але швидко руйнуються у лужному середовищі, особливо при наявності окислів металу і кремнезему поблизу термометра. Шкідливо впливають на платину пара металів і оксид вуглецю; тому при вимірюваннях необхідна добра ізоляція ТЕР від впливу вимірюваного середовища. ТЕР типу ТПП щодо жаростійкості і постійності термо-ЕРС найкращі з усіх існуючих. При правильній експлуатації вони зберігають постійність градування протягом тривалого проміжку часу. До недоліків ТЕР цього типу необхідно віднести малу термо-ЕРС, що розвивають ці прилади в порівнянні з іншими ТЕР.

2. Платинородій (30 % родію) – платинородієвий (6 % родію) ТЕР типу ТПР. Особливість ТЕР цього типу є те, що вони розвивають дуже малу термо-ЕРС (0,04 мВ при 120 °С і 0,002 мВ при 20 °С), що не потребує введення поправки на температуру вільних кінців.

ТЕР типу ТПП і ТПР платинової групи виготовляють, зазвичай, у вигляді дроту діаметром 0,5 або 1 мм, який ізолюють фарфоровим намистом або трубками.

3. Хромель – алюмелевий (94 % Ni + 2 % Al + 2,5 % Mn + 1 % Si + 0,5 % домішки) ТЕР (тип ТХА) застосовують для вимірювання температур до 1300 °С. Крива залежності термо-ЕРС від температури для ТЕР цього типу близька до прямої. Великий вміст нікелю в сплаві забезпечує стійкість ТЕР проти окиснення і корозії. Відновне середовище шкідливо діє на хромель-алюмелевий ТЕР.

4. Хромель – копелевий (56 % Cu + 44 % Ni) ТЕР (тип ТХК) із всіх стандартних ТЕР розвиває найбільшу термо-ЕРС, що дозволяє виготовляти термоелектричні термометри з вузькою температурною шкалою, наприклад з діапазоном 0-300 °С.

Стандартні ТЕР типу ТХА і ТХК виготовляють із дроту діаметром 0,7 – 1,2 мм та ізолюють керамічним намистом.

5. Вольфрам-реній (5 % ренію) – вольфрам-ренієві (20 % ренію) та ТПР ТЕР застосовують для вимірювання температур до 2300 °С в нейтральному і відновлювальному середовищі, а також у вакуумі. Вказані ТЕР використовують для вимірювання температури розплавлених металів. В особливих випадках застосовують і нестандартні ТЕР. Із них широко застосовують мідь-константанові (60 % Cu + 40 % Ni), залізо-константанові, мідь-копелеві і залізо-копелеві.

Необхідно враховувати, що залізо при наявності вологи може окислюватися, його термоелектричні властивості в зв'язку з цим можуть змінюватися. Нестандартні ТЕР при виготовленні обов'язково градуують.

6. Вольфрам-молібденові ТЕР крім молібдену, вміщують 0,5 % кобальту. Їх недоліки – швидке окиснення, крихкість вольфраму і молібдену при високих температурах, невелика термо-ЕРС, відсутність стандартної характеристики, тобто, необхідність індивідуального градування. ТЕР цього типу застосовують для вимірювання температур до 2300 °С.

На рис. 3.3.5 наведені характеристики стандартних найбільш розповсюджених ТЕР.

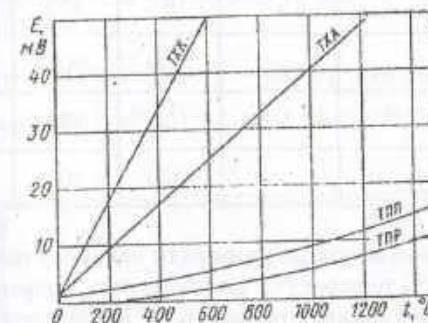


Рис. 3.3.5. Характеристичні криві деяких стандартних термоелектричних перетворювачів

У термоелектрогенераторах, термоохолодильниках, різних вимірювальних приладах застосовують також напівпровідникові ТЕР з термо-ЕРС, в 3-10 разів більшою термо-ЕРС звичайних ТЕР із металів і їх сплавів. Як термоелектродні матеріали в цих ТЕР застосовують ZnSb і CdSb.

У табл. 3.3.2. наведені основні параметри стандартних, найбільш розповсюджених, ТЕР.

Таблиця 3.1

Матеріали термоелектродів	Позначення градування	Нижня температурна межа вимірювань, °С	Верхня температурна межа вимірювань, °С при застосуванні		Термо-ЕРС (t = 100 °С, t <sub>0</sub> = 0 °С) мВ
			довготривалому	короткочасному	
Платинородій (10 % родію) – платина	ПП	-20	1300	1600	0,64
Платинородій (30 % родію) – платинородій (6 % родію)	ПР-30/6	300	1600	1800	0
Хромель-аломель	ХА	-50	1000	1300	4,10
Хромель-копель	ХК	-50	600	800	6,95
Вольфрам-рений (5% ренію) – вольфрам-рений (20% ренію)	ВР-5/20	800	1800	2300	
Вольфрам-рений (10% ренію) – вольфрам-рений (20% ренію)	ВР-10/20	100	1800	2300	
Залізо-копель	-	0	600	800	5,75
Залізо-константан	-	-200	600	800	5,11
Мідь-копель	-	0	400	600	4,75
Мідь-константан	-	-200	300	400	4,16

У випадках, коли необхідно виміряти невелику різницю температур або одержати велику термо-ЕРС, застосовують диференціальні ТЕП термобатарей, що представляють декілька послідовно з'єднаних ТЕП (рис. 3.3.6 і 3.3.7).

Сумарна термо-ЕРС диференціального ТЕП становить:

$$E_{AB}(t_1 t_2) = e_{AB}(t_1) + e_{BC}(t_0'') + e_{CB}(t_0'') + e_{BA}(t_2) + e_{AC}(t_0''') + e_{CA}(t_0''') \quad (3.3.7)$$

Якщо  $t_0' = t_0'' = t_0''' = t_0''''$ , то  $e_{CA}(t_0'') + e_{AC}(t_0''') = 0$  і якщо  $e_{BC}(t_0'') + e_{CB}(t_0'') = 0$ , то підставивши ці вирази в рівняння (3.3.7), отримаємо:

$$E_{AB}(t_1 t_2) = e_{AB}(t_1) + e_{BA}(t_2) = e_{AB}(t_1) - e_{AB}(t_2) \quad (3.3.8)$$

Для збереження умови  $t_0' = t_0'' = t_0''' = t_0''''$  вільні кінці ТЕП виводять на одну загальну панель. Абсолютне значення температури  $t_0$  не впливає на покази диференціального ТЕП.

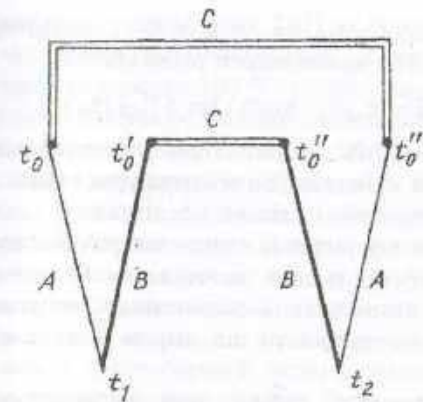


Рис. 3.3.6. Схема диференціального ТЕП

А, В – термоелектроди; С, С' – провідники, включені в термоелектроди А і В;  
 $t_1, t_2$  – температури нагрітих сплавів диференціального ТЕП;  
 $t_0, t_0', t_0'', t_0'''$  – температури холодних сплавів диференціального ТЕП

Термоелементи одного і того ж типу з'єднують у батареї послідовно так, що в з'єднанні завжди є різнірідні термоелементи. Термоелектрорушійна сила термобатарей, що складається із n елементів становить:

$$E = e_{AB}(t_1) + e_{BA}(t_0'') + e_{AB}(t_2) + e_{AB}(t_0''') + e_{AB}(t_3) + e_{BA}(t_0''') + \dots + e_{AB}(t_{n-1}) + e_{AB}(t_0''') + e_{AB}(t_n) + e_{BC}(t_0''') + e_{CA}(t_0''') \quad (3.3.9)$$

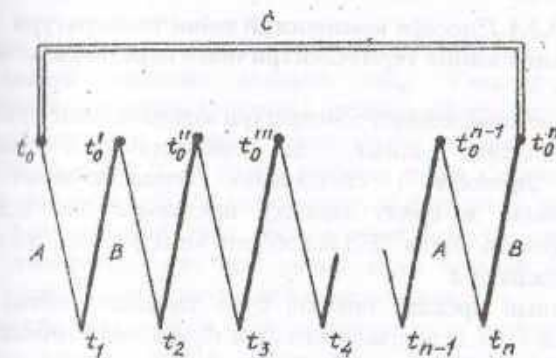


Рис. 3.3.7. Схема термобатарей

А, В – термоелектроди термобатарей; С – провідник, вилучений у коло термобатарей;  
 $t_1, t_2, t_3, t_4, \dots, t_{n-1}, t_n$  – температури нагрітих сплавів термобатарей;  
 $t_0, t_0', t_0'', t_0''', t_0''''$  – температури холодних сплавів термобатарей

Враховуючи, що  $t_1 = t_2 = t_3 = \dots = t_{n-1} = t_n = t$ ,  $e_{CA}(t_0) + e_{BC}(t_0) = -e_{AB}(t_0)$  і  $e_{BA} = -e_{AB}$  рівнянню (3.3.9) можна надати такий вигляд:

$$E = [e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0)] n = n E_{AB}(t, t_0), \quad (3.3.10)$$

де  $E_{AB}(t, t_0)$  – термо-ЕРС одного термоелемента, який складається з термоелектродів А і В з кінцями при температурах  $t$  і  $t_0$ ;

$n$  – число термоелементів, з'єднаних послідовно

Конструктивне оформлення термоелектричних термометрів різне і залежить, в основному, від умов їх застосування. Як правило, робочий спай промислового ТЕП виготовляють зварюванням вольтової дуги. ТЕП із неблагородних металів зварюють під шаром флюсу, а ТЕП платинової групи – без флюсу.

Паїку застосовують тільки при виготовленні нестандартних лабораторних ТЕП із дуже тонкого дроту. Незалежно від конструкції, ТЕП повинні відповідати таким вимогам. Ізоляція термоелектродів повинна виключати можливість короткого замикання та електричних втрат. Електроди повинні бути захищені від механічних пошкоджень і хімічної дії вимірюваного середовища. Термоелектродні проводи повинні бути надійно під'єднані до ТЕП.

Для електричної ізоляції термоелектродів, зазвичай, застосовують фарфор у вигляді коротких одноканальних або двоканальних трубок, намистинок. Одноканальними трубками ізолюють товсті термоелектродні дроти, двоканальними – тонкі, діаметром, меншим, ніж 1 мм. Для агресивних середовищ застосовують захисні трубки із металокераміки, або сталеві захисні трубки покривають шаром тугоплавкої емалі.

#### § 3.3.4. Способи компенсації зміни температури вільних кінців термоелектричного перетворювача

Правильне вимірювання температури можливе лише при постійності температури вільних кінців, що забезпечується застосуванням з'єднувальних проводів і спеціальних термостатуючих пристроїв. З'єднуючі проводи в цьому випадку призначені для віддалення на якнайбільшу відстань кінців ТЕП від об'єкта вимірювання, тобто, із зони де змінюється температура.

З'єднувальні проводи повинні бути термоелектрично подібні до термоелектродів ТЕП, їх доцільно називати термоелектродними проводами.

Як правило, термоелектродні проводи для ТЕП виготовляють з неблагородних металів, з таких що з них виготовлені термоелектроди ТЕП. Виняток складає хромель-алюмелевий ТЕП, для якого, щоб зменшити опір лінії в ролі термоелектродних проводів застосовують мідь разом з константаном.

Для платинородій – платинових ТЕП як термоелектродні проводи використовують мідь в парі з міднонікелевим сплавом (99,4 % Cu + 0,6 % Ni). Ці проводи при температурі 100 °С в парі розвивають таку ж термо-ЕРС, яку розвивають і платинородійовий-платиновий ТЕП. Для ТЕП типу ІІІІ застосовують термоелектричні проводи з міді (98,2 %) й нікелю (1,8%).

Для правильного вимірювання обов'язково повинна бути рівність температур в точках 1 і 2 (рис. 3.3.8). Ця рівність забезпечується тим, що вільні точки розміщені близько одна від другої в головці ТЕП. Як видно із рис. 3.3.8, вільні кінці віддалені від головки ТЕП на довжину термоелектродних проводів, що забезпечує термостатування вільних кінців. На термоелектродних проводах до вимірювального приладу 3 (мільвольтметр) можна застосовувати мідні проводи. Інколи на всьому шляху від ТЕП до вимірювального приладу застосовують термоелектродні проводи, що полегшує введення поправки на температуру вільних кінців.

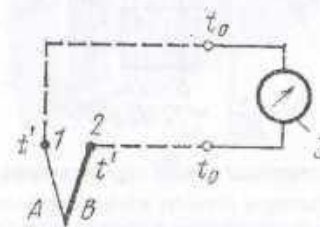


Рис. 3.3.8. Схема ввімкнення з'єднувальних проводів  
1 – 2 – точки рівності температури; 3 – вимірювальний прилад  
A, B – термоелектроди;  $t_0, t_0'$  – температури холодного і нагрітого спай

Проте при цьому необхідно враховувати, що термоелектродні проводи мають відносно великий опір. Основні технічні дані термоелектродних проводів наведені в спеціальній літературі.

У лабораторних умовах температуру вільних кінців, зазвичай, підтримують рівною 0 °С. В цьому випадку місця з'єднання занурюють в пробірку з оливою, а їх, в свою чергу, вміщають у посудину Дюара, наповнену льодом, який тоне. Вільні кінці можуть знаходитись і при кімнатній температурі, але при цьому вони повинні бути занурені в посудину з оливою, температуру якої контролюють.

У виробничих умовах для автоматичного введення поправки на температуру вільних кінців застосовують мостові електричні схеми (рис. 3.3.9).

ТЕП вмикають послідовно з нерівноваженим мостом, три плеча якого – R1, R2 і R3 – виконані із манганіну, а четверте – R4 – із міді. Міст з'єднаний від стабілізованого джерела живлення. Резистор R<sub>d</sub> служить для

приведення подаваної на міст напруги до необхідного значення. При постійній напрузі джерела живлення зміною резистора  $R_d$  можна налаштувати міст для роботи з ТЕП різних градувань. Від ТЕП до компенсаційного моста прокладають термоелектродні проводи, від моста до вимірювального приладу – мідні.

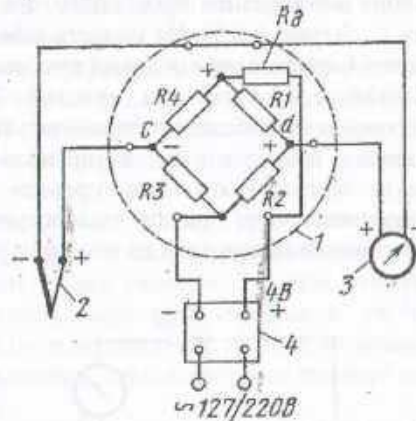


Рис. 3.3.9. Електрична схема автоматичної компенсації температури вільних кінців термометра

1-компенсаційний міст; 2-термометр; 3-мілівольтметр; 4-джерело живлення

При градувальній температурі вільних кінців ТЕП міст знаходиться в рівновазі і різниця потенціалів на вершинах моста  $C$  і  $d$  дорівнює нулю. При зміні температури вільних кінців змінюється опір резистора  $R_4$  і порушується рівновага моста, на його вершинах  $C$  і  $d$  виникає різниця потенціалів. Вона повинна бути рівна за величиною і протилежна за знаком зміні термо-ЕРС перетворювача, викликаной відхиленням температури його вільних кінців від градувальної.

### § 3.3.5. Прилади для вимірювання термоелектрорушійних сил

Для вимірювання термо-ЕРС в комплектах термоелектричних термометрів застосовують магнітоелектричні мілівольтметри і потенціометри. Мілівольтметри поділяють на переносні і стаціонарні, а потенціометри – на лабораторні, переносні й автоматичні. Принцип дії магнітоелектричного мілівольтметра базується на взаємодії провідника, по якому протікає струм, і магнітного поля постійного магніта. Магнітна система мілівольтметра (рис. 3.3.10), зазвичай, складається із підковоподібного магніта, полюсних наконечників і циліндричного осердя.

Навність осердя в мініполюсному просторі магніта зменшує магнітний опір і формує радіальний магнітний потік. В кільцевому магнітному зазорі між полюсними наконечниками і осердям обертається рамка, виготовлена з ізолюваного мідного (рідше алюмінієвого) дроту. Найважливіша рамка кріпиться на кернях, які опираються на підп'ятники з ясеню або рубину. Момент, який протидіє обертанню рамки, створюється пружинами, котрі одночасно служать і для підведення струму до рамки.

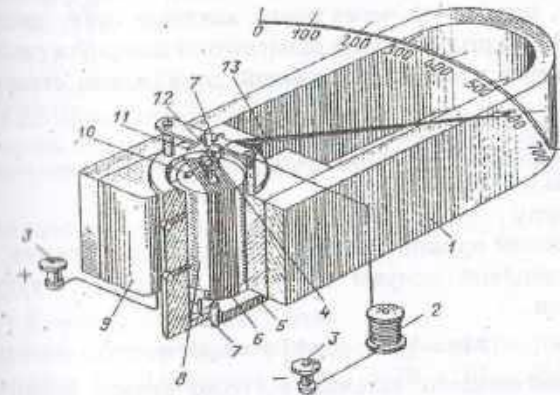


Рис. 3.3.10. Магнітна і рухома система мілівольтметра

1-постійний магніт; 2-магнітна игралька; 3-затискачі; 4-пружина; 5-стовпчик; 6-рамка; 7-агатові підп'ятники; 8-осердя; 9-полюсний наконечник; 10-кротивага; 11-коректор нуля; 12-керні; 13-стрілка

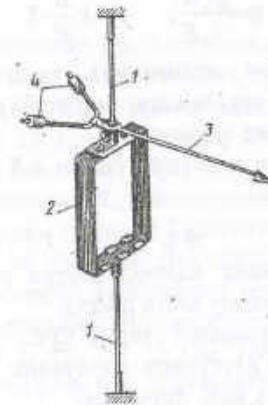


Рис. 3.3.11. Схема кріплення рамки на стрічкових підвісках  
1-стрічка підвіски; 2-рамка; 3-стрілка; 4-противаги

Указуючі мілівольтметри з рамкою на кернах виготовляють як з вертикальною, так із горизонтальною осями обертання. В ресструючих приладах рамка, зазвичай, підвішена на тонких металевих стрічках (рис. 3.3.11), які створюють протидіючий момент і одночасно слугують для підведення струму.

До рамки мілівольтметра кріпиться стрілка, яка має два вусики з різьбою, по яких переміщуються противаги. За допомогою противаг рухому систему зрівноважують так, щоб центр її ваги знаходився на осі рамки. Струм, протікаючи через рамку, викликає появу двох однакових сил, спрямованих в різні боки, які намагаються повернути рамку.

Обертаючий момент, створюваний цими силами, становить:

$$M_i = k_1 B I, \quad (3.3.11)$$

де  $k_1$  – коефіцієнт, який залежить від ширини рамки;

$B$  – магнітна індукція;

$I$  – сила струму.

Протидіючий пружний момент для спіральних пружин і підвісних стрічок пропорційний модулю пружності матеріалу і куту повороту рухомої системи

$$M\phi = k_2 E\phi \text{ або } M\phi = k_2 G \cdot \phi, \quad (3.3.12)$$

де  $k_2$  – постійний множник, залежить від геометричних розмірів;

$E$  – модуль пружності (поздовжній);

$G$  – модуль зсуву.

У момент рівноваги  $M_i = M\phi$  або  $k_1 B I = k_2 E\phi$ . Звідси кут повороту рухомої системи становить:

$$\phi = \frac{k_1 B}{k_2 E} \cdot I = k \frac{B}{E} \cdot I$$

Зміна  $B$  і  $E$  при коливаннях температури навколишнього середовища не впливає на покази мілівольтметра, оскільки обидві величини змінюються майже однаково.

Тоді залежність кута повороту рамки від сили струму може бути виражена такою формулою:

$$\phi \approx I, \quad (3.3.13)$$

із якої випливає, що шкала мілівольтметра рівномірна і чутливість приладу однакова в будь-якому місці шкали.

Похибки при вимірюванні термо-ЕРС мілівольтметром можна проаналізувати виходячи із наступних міркувань: сила струму, який протікає в колі дорівнює:

$$I = E(t_0) / (R_m + R_n + R_t), \quad (3.3.14)$$

де  $R_m$ ,  $R_n$  і  $R_t$  – опори відповідно мілівольтметра, з'єднувальних проводів,

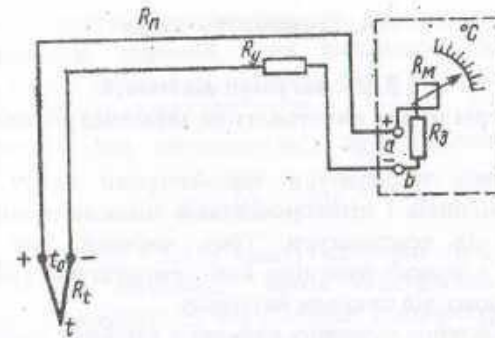


Рис. 3.3.12. Принципова схема термоелектричного термометра  
 $R_m$ ,  $R_n$  і  $R_t$  – опори, відповідно, мілівольтметра, з'єднувальних проводів і термометра;  
 $R_y$  – манганова шпилька;  $t_0$ ,  $t$  – температури холодного і нагрітого сплавів термометра.

Підставивши значення  $I$  із формули (3.3.14) у формулу (3.3.13) отримаємо:

$$\phi = CE(t_0) / (R_m + R_{зов}), \quad (3.3.15)$$

де  $R_{зов} = R_n + R_t$  – опір зовнішнього кола.

Розглянемо схему термоелектричного термометра (рис. 3.3.12).

Із рівняння (3.3.14) маємо:  $E(t_0) = IR_m + IR_{зов}$ , де  $IR_m = U_{ав}$  – значення напруги в колі мілівольтметра, яке вимірюється за показами приладу. Отже,  $U_{ав} = IR_m = E(t_0) - IR_{зов}$ , або

$$U_{ав} = \frac{E(t_0) R_m}{R_m + R_{зов}} = \frac{E(t_0)}{1 + \frac{R_{зов}}{R_m}}. \quad (3.3.16)$$

Із цієї формули випливає, що  $U_{ав}$  завжди менше, ніж термо-ЕРС, що утворює ТЕП. Звідси випливає також, що, чим менше  $R_{зов}$  в порівнянні з  $R_m$ , тим ближче  $U_{ав}$  до  $E(t_0)$ , і що коливання  $R_{зов}$  тим менше будуть впливати на результати вимірювань, чим більший  $R_m$ . Тому опір  $R_m$  роблять завжди досить великим порівняно з рамкою мілівольтметра. Причому при значному збільшенні  $R_m$ , зменшується сила струму і виникають проблеми з конструюванням приладу. Практично, в мілівольтметрах опір  $R_m$  коливається від 100 до 500 Ом. Для отримання правильних показів значення  $R_{зов}$  повинно відповідати розрахунковому. Зазвичай, в приладах вітчизняного виробництва величина  $R_{зов}$  дорівнює одному з таких значень: 0,6; 1,6; 5; 15; 25; 25 Ом. Під цей розрахунковий опір, вказаний на шкалі мілівольтметра, підганяють при монтажі фактичний опір термоелектричного термометра і з'єднувальних дротів. Це виконують за допомогою (зрівнювальної) додаткової манганованої шпильки  $R_y$ , ввімкненої послідовно в ТЕП.



### 3.4. Термометри опору

#### § 3.4.1. Загальні відомості:

##### Матеріали для виготовлення термометрів опору

Вимірювання температури термометрами опору базується на властивості провідників і напівпровідників змінювати свій електричний опір при зміні їх температури. Тому, омичний опір провідника і напівпровідника є деякою функцією його температури, тобто  $R=f(t)$ . Вид цієї функції залежить від природи матеріалу.

Для виготовлення чутливих елементів серійних термометрів опору застосовують чисті метали. До металів висувають такі вимоги:

1. Метал не повинен окиснюватися і вступати в хімічну взаємодію із вимірюваним середовищем, повинен мати високу відтворюваність значень електричного опору в інтервалі робочих температур.

2. Температурний коефіцієнт електричного опору металу

$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dt}$  повинен бути достатньо великий і незмінний. Цей коефіцієнт прийнято визначати таким співвідношенням:

$$\alpha_0 \dots 100 = (R_{100} - R_0) / 100 R_0,$$

де  $R_0$  і  $R_{100}$  – опір зразка даного матеріалу при температурі 0 і 100 °С відповідно.

3. Опір повинен змінюватися зі зміною температури по прямій чи плавній кривій без різних відхилень і явища гістерезису.

4. Питомий електричний опір металу повинен бути достатньо великий: чим більший опір, тим менше металу необхідно для отримання початкового опору термометра.

Вказаним вимогам в певних температурних межах найбільш повно відповідають платина, мідь, нікель, залізо.

Платина. Питомий електричний опір платина становить  $\rho = 0,10$  м.мм<sup>2</sup>/м, а температурний коефіцієнт електричного опору в діапазоні температур від 0 до 100 °С  $\alpha = 3,9 \cdot 10^{-3}$  1/°С.

Зміна опору платини описується рівняннями:

в діапазоні температур від 0 до +650 °С

$$R_t = R_0 (1 + at + bt^2). \quad (3.4.1)$$

в діапазоні температури від - 200 до 0 °С

$$R_t = R_0 [1 + at + bt^2 + C(t-100)t^3]. \quad (3.4.2)$$

де  $R_t$  і  $R_0$  – опори платини при температурі відповідно  $t$  і 0 °С;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – постійні коефіцієнти, значення яких визначають при градуванні термометра по точках кипіння кисню, води, сірки  $a = 3,96847 \cdot 10^{-3}$  1/°С;  $b = -5,847 \cdot 10^{-7}$  1/°С;  $C = -4,22 \cdot 10^{-12}$  1/°С.

Для платини, яка застосовується при виготовленні технічних термометрів

$$R_{100} / R_0 = 1.391.$$

Із рівняння (3.4.1. і 3.4.2) видно, що характеристики платинових термометрів опору нелінійні, проте відхилення від лінійної характеристики не перевищує 5 % в інтервалі температур від 0 до 500 °С і 19 % в інтервалі температур від - 200 до 0 °С.

Мідь. До переваг міді необхідно віднести низьку вартість, легкість отримання її в чистому вигляді, порівняно високий температурний коефіцієнт електричного опору  $\alpha = 4,26 \cdot 10^{-3}$  1/°С і лінійну залежність опору від температури:

$$R_t = R_0 (1 + at). \quad (3.4.3)$$

До недоліків міді належать малий питомий опір ( $\rho = 0,017$  Ом мм<sup>2</sup>/м) і легка окиснюваність при температурі, вищій, ніж 100 °С. Для міді, що використовується при виготовленні термометрів, відношення

$$R_{100} / R_0 = 1,426.$$

Нікель і залізо. Ці метали мають порівняно високий температурний коефіцієнт електричного опору:

$$L_{Ni} = (6,21 \dots 6,34) \cdot 10^{-3} \text{ 1/}^\circ\text{C}; L_{Fe} = (6,25 \dots 6,57) \cdot 10^{-3} \text{ 1/}^\circ\text{C}$$

і відносно великий питомий опір;

$$\rho_{Ni} = (0,118 \dots 0,138) \text{ Ом мм}^2/\text{м};$$

$$\rho_{Fe} = (0,055 \dots 0,061) \text{ Ом мм}^2/\text{м}.$$

Проте їм притаманні й недоліки: нікель і залізо важко отримати в чистому вигляді, що ускладнює виготовлення взаємозамінних термометрів опору; залежності опору заліза і, особливо, нікелю від температури виражаються кривими, які не можуть бути описані у вигляді простих емпіричних формул: нікель, а особливо, залізо, легко окиснюються навіть при низьких температурах. Ці недоліки обмежують застосування нікелю й заліза для виготовлення термометрів опору.

На рис. 3.4.1. показана залежність питомого опору металів від температури.

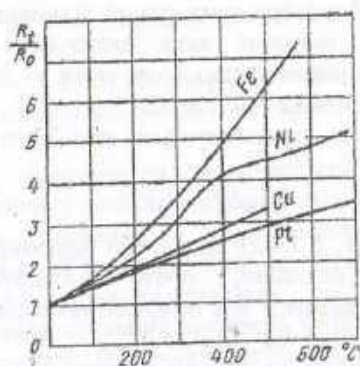


Рис. 3.4.1. Залежність відношення  $R_1/R_0$  для деяких металів від температури

На рис. 3.4.2. показаний чутливий елемент платинового термометра вітчизняного виробництва. Він складається з двох сполучених послідовно платинових спіралей 1, розмішених в каналах керамічного каркасу. До двох верхніх кінців цих спіралей припаяні платинові або іридієвородієві (60 % родію) виводи 2, до яких приварені вивідні провідники, ізольовані керамічним намістом. Для кріплення платинових спіралей і виводів у керамічному каркасі використовують поливу (або термоцемент) 3 на основі окислів алюмінію і кремнію. Простір між платиновими спіралями і стінами каналів каркасу заповнено порошком окису алюмінію, який слугує ізолятором і покращує тепловий контакт між спіралями і каркасом.

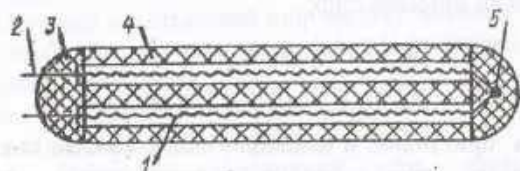


Рис. 3.4.2. Чутливий елемент платинового термометра опорного типу  
1-платинові спіралі; 2-виводи; 3-полива; 4-порошок окису алюмінію; 5-пайка

Для підганяння опорного при  $0^\circ\text{C}$  змінюють довжину нижніх кінців платинових спіралей з наступною пайкою 5. Виготовляють також платинові термометри, у яких керамічний каркас має чотири канали. В чотирьохканальному каркасі монтується два незалежні чутливі елементи.

Чутливий елемент мідного термометра опорного типу являє собою безкаркасну безіндукційну намотку 1 із мідного дроту діаметром 0,08 мм

(рис. 3.4.3), яка покрита фторопластовою плівкою 2. До намотки припаяні два виводи 3. Для забезпечення вібростійкості чутливий елемент знаходиться в тонкостінній металевій гільзі, яка заповнена керамічним порошком і герметизована.

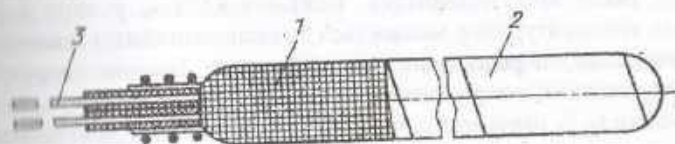


Рис. 3.4.3. Чутливий елемент мідного термометра опорного типу  
1-безіндукційна намотка; 2-фторопластова плівка; 3-виводи

Усі технічні термометри випускають взаємозамінними. Умовні позначення градування термометрів ТСП встановлені такі: гр. 20, гр. 21 і гр. 22. Для термометрів із вказаним градуванням опорний  $R_0$  складає, відповідно, 10, 40 і 100 Ом.

Термометри опорного типу виготовляють із опором  $R_0 = 53$  Ом (градування гр. 23) і  $R_0 = 100$  Ом (градування гр. 24). Для вимірювання низьких температур (до  $-260^\circ\text{C}$ ) створені платинові термометри, гільзи яких для захисту заповнюють гелієм.

Для виготовлення термометрів опорного типу застосовують також напівпровідники (окисли деяких металів). Суттєвою перевагою напівпровідників є великий температурний коефіцієнт електричного опору (від  $3 \cdot 10^{-3}$  до  $4 \cdot 10^{-2} 1/^\circ\text{C}$ ). Внаслідок великого питомого електричного опору напівпровідників із них можливо виготовляти термометри малих розмірів з великим початковим опором, що дозволяє не враховувати з'єднувальні проводи та інші елементи вимірювальної схеми термометра.

У вузькому температурному інтервалі залежність електричного опору напівпровідникового резистора від температури описується рівнянням:

$$R = A \exp(B/T), \text{ або } \ln R = \ln A + B/T, \quad (3.4.4)$$

де  $A$  і  $B$  – постійні коефіцієнти, які залежать від властивостей матеріалу напівпровідника;  $T$  – абсолютна температура терморезистора. Коефіцієнти  $A$  і  $B$  можна визначити з виразу (3.4.4) підставивши в нього два значення опорів резисторів  $R_1$  і  $R_2$  і відповідні температури  $T_1$  і  $T_2$ . Підставивши значення і розв'язавши систему рівнянь, отримаємо:

$$B = \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{R_1}{R_2}; \quad A = R_1 \exp\left(-\frac{B}{T_1}\right). \quad (3.4.5)$$

Для виготовлення напівпровідникових резисторів застосовують оксиди титану, магнію, заліза, марганцю, кобальту, нікелю, міді і кристали деяких металів (наприклад, германію) з різними домішками. Для вимірювання температури найчастіше використовують напівпровідникові резистори типів ММТ-1, ММТ-4, КМТ-1 і КМТ-4, у яких в робочих інтервалах температур опір змінюється за експоненційним законом.

Основною перешкодою, яка обмежує широке впровадження напівпровідникових терморезисторів у промисловість, є погана відтворюваність їх параметрів, що робить неможливою їх взаємозаміну, а також порівняно невисока робоча температура (від -60 до +180°C).

На рис. 3.4.4. показаний стрижневий терморезистор, який являє собою циліндр 1 з контактними ковпаками 2, до яких припаяні виводи 3. Циліндр покритий поливою і обгорнутий металеву фольгою 4. Зверху терморезистор захищений металевим чохлам 5, у верхній частині якого є скляний ізолятор 6.

Напівпровідниковий елемент 1 намістового терморезистора (рис. 3.4.5.) має форму кульки діаметром 0,5 мм, захищеної скляною оболонкою 4. У кульку вмонтовані електроди 2 із платинові дроту діаметром 0,05 мм, з'єднані з нікелевими проводами 3.

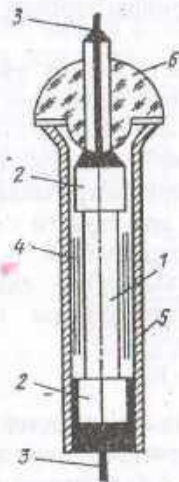


Рис. 3.4.4. Стрижневий напівпровідниковий терморезистор

1-циліндр; 2-контактні ковпаки; 3-виводи;  
4-фольга; 5-металевий чохлам;  
6-скляний ізолятор

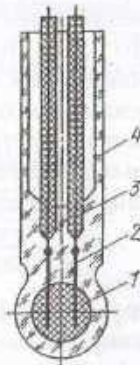


Рис. 3.4.5. Намистовий напівпровідниковий терморезистор

1-напівпровідниковий елемент;  
2-платинові електроди; 3-нікелеві проводи;  
4-скляна оболонка

### 3.5. Вимірювальні прилади термометрів опору

Як вимірювальні прилади термометрів опору застосовують врівноважені мости і логометри (омметри). Для напівпровідникових терморезисторів вимірювальними приладами зазвичай служать неврівноважені мости.

Врівноважені мости поділяються на лабораторні і виробничі. Принципова схема врівноваженого моста постійного струму з термометром опору наведена на рис. 3.5.1.

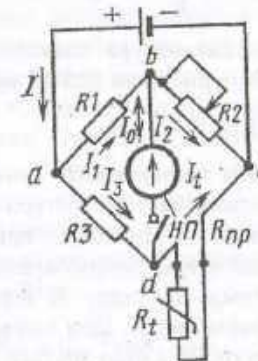


Рис. 3.5.1. Принципова схема

врівноваженого моста з термометром опору

$R_1, R_3$  – резистори з постійним опором;  $R_2$  – перемінний резистор;  
 $R_t$  – резистор термометра;  $R_{np}$  – опір з'єднувальних проводів; НП – нуль-прилад

Міст складається з двох резисторів  $R_1, R_3$  з постійними і рівними опором, перемінного резистора  $R_2$  і термометра  $R_t$ . До опору термометра приєднаний опір  $R_{np}$  двох з'єднувальних проводів. В одну діагональ моста включено джерело живлення, в другу нуль – прилад НП.

При рівновазі моста, яка досягається переміщенням бігуна по резистору  $R_2$ , сила струму в діагоналі моста  $I_0 = 0$ . В цьому випадку потенціали на вершині моста в і d рівні, струм від джерела живлення розгалужується на дві вітки  $I_1$  і  $I_3$ , зменшення напруги на резисторах  $R_1$  і  $R_3$  однакове, тобто:

$$R_1 I_1 = R_3 I_3, \quad (3.5.1)$$

де  $R_i$  – опір резистора  $R_i$  ( $i = 1, 2, \dots$ ). Зменшення напруги на плечах моста в і d також однакове, тобто:

$$R_2 I_2 = (R_t + 2R_{np}) I_t. \quad (3.5.2)$$

Розділивши рівність (3.5.1.) на (3.5.2), отримаємо:

$$\frac{R_1 I_1}{R_2 I_2} = \frac{R_1 I_3}{I_1 (R_1 + 2R_{np})} \quad (3.5.3)$$

При  $I_0=0$ ,  $I_1 = I_2$  і  $I_3 = I_1$ , тоді рівняння (3.5.2) набуде вигляду:

$$R_1(R_1 + 2R_{np}) = R_2 R_3 \quad (3.5.4)$$

З рівняння (3.5.3) знайдемо значення опору термометра:

$$R_1 = R_2 \frac{R_3}{R_1} - 2R_{np} \quad (3.5.5)$$

Якщо вважати, що температура навколишнього середовища не змінюється, тоді  $2R_{np} = \text{const}$ , а рівняння (3.5.5) набуде вигляду:

$$R_1 = R_2 \cdot k - R_1 \quad (3.5.6)$$

При зміні опору  $R_1$  міст можна зрівноважити зміною опору КПП  $R_2$ .

У випадках, якщо коливання температури середовища, що оточує з'єднувальні проводи значне і похибка при вимірюваннях може перевершити допустиме значення, застосовують трипровідну систему проводів, яка полягає в тому, що одну із вершин моста переносять безпосередньо до головки термометра. При такому з'єднанні опір одного проваду  $R_{np}$  додається до опору  $R_1$ , а опір другого – до опору КПП  $R_2$ .

Рівняння рівноваги моста має вигляд:

$$R_1 + R_{np} = (R_2 + R_{np}) \frac{R_3}{R_1} \quad (3.5.7)$$

У випадку симетричного моста, коли  $R_1 = R_3$  отримаємо:

$R_1 + R_{np} = R_2 + R_{np}$ , тобто, зміна опору провідників з'єднання не впливає на результат вимірювання.

### 3.6. Пірометри випромінювання

#### § 3.6.1. Теоретичні основи вимірювання температури

Принцип дії пірометрів випромінювання базується на використанні теплового випромінювання нагрітих тіл.

Променева енергія виділяється нагрітим тілом у вигляді хвиль різної довжини. При порівняно низьких температурах (до 500 °C), нагріте тіло випромінює інфрачервоні промені, які не сприймаються оком людини. В міру підвищення температури колір тіла змінюється від темно-червоного до білого, який вміщує хвилі всіх довжин, що сприймаються оком. Одночасно з підвищенням температури нагрітого тіла і зміною його кольору швидко

зростає спектральна енергетична яскравість (СЕЯ), тобто випромінювання певної довжини (яскравості), а також помітно збільшується сумарне (інтегральне) випромінювання. Вказані властивості нагрітих тіл використовують для вимірювання їх температури і відповідно до цих властивостей параметри випромінювання поділяються на квазімонохроматичні, спектрального відношення і повного випромінювання.

У природі не існує абсолютно чорних тіл, але є тіла, близькі до абсолютно чорного тіла. Так, тіло, покрите чорною шорсткою фарбою (нафтовою сажею), поглинає 96 % всієї променевої енергії. Властивостями абсолютно чорного тіла наділяється також поверхня отвору в замкнутому об'ємі (топки печей, топки парових котлів) з непрозорими і рівномірно нагрітими стінками. Це пояснюється тим, що всі промені, які потрапляють у такий отвір ззовні, практично повністю поглинаються всередині тіла після декількох багаторазового відбивання від його внутрішньої поверхні.

СЕЯ і інтегральне випромінювання залежать від фізичних властивостей речовин; тому шкали пірометрів градуують за випромінюванням абсолютно чорного тіла.

Зростання СЕЯ підвищенням температури різне для хвиль різних довжин і в області порівняно невисоких температур для абсолютно чорного тіла описується рівнянням Віна:

$$E_{0\lambda} = C_{1\lambda}^{-5} \exp - \frac{C_2}{\lambda T}, \quad (3.6.1)$$

де  $E_{0\lambda}$  – СЕЯ абсолютно чорного тіла для хвилі довжиною  $\lambda$ ;

$T$  – абсолютна температура тіла К;  $C_1$  і  $C_2$  – константи випромінювання, числові значення яких залежать від прийнятої системи одиниць;  $C_1 = 2\pi^5 h^6 C^3 / 15$  ( $h$  – постійна Планка,  $C$  – швидкість світла, м/с);  $C_2 = NhCR$  ( $N$  – постійна Авогадро);  $R$  – універсальна газова постійна, Дж/кмоль К). Оскільки СЕЯ неоднакова для різних довжин хвиль, рівняння Віна застосовують у пірометрії для хвилі певної довжини (зазвичай, для червоного світла довжиною хвилі 0,65 або 0,66 мкм).

Рівнянням Віна можна користуватися до температури приблизно 3000 К. При більш високих температурах СЕЯ абсолютно чорного тіла описується рівнянням Планка:

$$E_{0\lambda} = C_{1\lambda}^{-5} (\exp \frac{C_2}{\lambda T} - 1)^{-1}, \quad (3.6.2)$$

де всі позначення ідентичні позначенням рівняння (3.6.1).

При підвищенні температури абсолютно чорного тіла область спектра, наділена максимальною енергією, зміщується в напрямку малих довжин хвиль (рис. 3.6.1). Це явище приводить до поступової зміни кольору тіла і зростання його яскравості в міру підвищення температури.

Кількість енергії, що випромінюється абсолютно чорним тілом, характеризується площею між віссю абсцис і кривою розподілу енергії по спектру.

Користуючись законом зміщення Віна, за розміщенням максимуму можливо визначити абсолютну температуру тіла. Цей метод використаний у пірометрах спектрального відношення (кольорові).

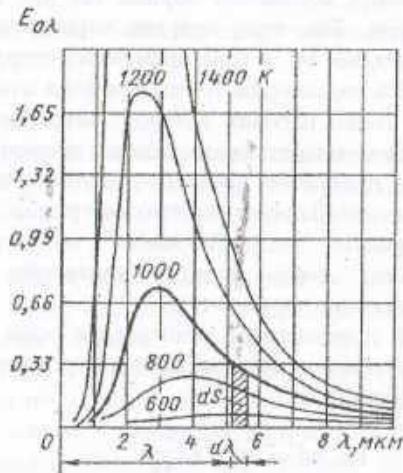


Рис. 3.6.1. Залежність спектральної енергетичної яскравості абсолютно чорного тіла від довжини хвилі

Під кольоровою температурою розуміють температуру абсолютно чорного тіла, за якої відношення енергетичних яскравостей при двох довжинах хвиль  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$  рівне відношенню відповідних енергетичних яскравостей фізичного тіла. Якщо  $E_{0\lambda_1(Ty)}$  і  $E_{0\lambda_2(Ty)}$  енергетичні яскравості реального тіла при дійсній температурі  $T$  для хвиль з довжиною відповідно  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$ , а  $E_{\lambda_1(T)}$  і  $E_{\lambda_2(T)}$  – енергетичні яскравості реального тіла при дійсній температурі  $T$  для хвиль з довжиною відповідно  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$ . Тоді відповідно до визначення кольорової температури повинна зберігатися рівність:

$$\frac{E_{0\lambda_1(Ty)}}{E_{0\lambda_2(Ty)}} = \frac{E_{\lambda_1(T)}}{E_{\lambda_2(T)}} \quad (3.6.3)$$

Використовуючи рівняння (3.6.1) і (3.6.3) з урахуванням, що  $C_\lambda = E_\lambda/E_{0\lambda}$ , можна отримати співвідношення між кольоровою температурою  $Ty$  реального тіла і його дійсною температурою  $T$ :

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{Ty} - \frac{\ln(C_{\lambda_1}/C_{\lambda_2})}{C_2(1/\lambda_2 - 1/\lambda_1)} \quad (3.6.4)$$

де  $C_{\lambda_1}$  і  $C_{\lambda_2}$  – ступінь чорноти фізичного тіла для променів з довжиною хвилі відповідно  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$ .

Із рівняння (3.6.4) видно, що для абсолютно чорних тіл, у яких  $C_{\lambda_1} = C_{\lambda_2} = 1$ , а також для реальних тіл, у яких монохроматичні коефіцієнти чорноти  $C_{\lambda_1}$  і  $C_{\lambda_2}$ , виміряні при довжинах хвиль  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$ , рівні, кольорова температура співпадає з їх справжньою температурою. Для тіл, у яких  $C_\lambda$  зростає з ростом довжини хвилі, кольорова температура менша, ніж дійсна, а у тіл з  $C_\lambda$  які зменшуються з ростом довжини хвилі, кольорова температура більша ніж істинна.

Інтегральне випромінювання абсолютно чорного тіла описується рівнянням Стефана-Больцмана.

$$E_0 = C_0 (T/100)^4, \quad (3.6.5)$$

де  $C_0$  – константа випромінювання абсолютно чорного тіла;  $T$  – абсолютна температура випромінюючої поверхні, К.

Інтегральне випромінювання реального тіла, нагрітого до температури  $T$  описується таким рівнянням:

$$E = \epsilon C_0 (T/100)^4, \quad (3.6.6)$$

де  $\epsilon = E/E_0$  – ступінь чорноти тіла для всіх довжин хвиль.

Інтегральне випромінювання абсолютного чорного тіла при співпаданні його температури з температурою  $Ty$  становить:

$$E_0 = C_0 (Ty/100)^4 \quad (3.6.7)$$

Зрівнявши праві частини рівнянь (3.6.6) і (3.6.7) з урахуванням того, що  $E = E_0$ , отримаємо формулу для визначення дійсної температури реального тіла

$$T = Ty \sqrt[4]{1/\epsilon}, \quad (3.6.8)$$

де  $Ty$  – умовна температура, виміряна пірометром повного випромінювання.

### § 3.6.2. Квазімонохромні пірометри

Принцип дії квазімонохромних пірометрів заснований на порівнянні яскравості монохромного випромінювання двох тіл: еталонного і тіла, температуру якого вимірюють. В ролі еталонного тіла, зазвичай, використовують нитку лампи розжарювання, яскравість випромінювання якої регулюють.

Найбільш розповсюдженим приладом цієї групи є квазімонохромний (оптичний) пірометр із зникаючою ниткою (рис. 3.6.2).

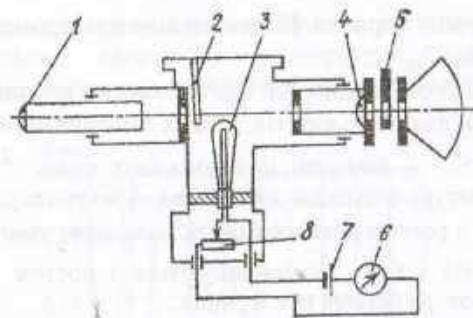


Рис. 3.6.2. Принципова схема квазімонохромного (оптичного) пірометра із зникаючою ниткою  
1-трубка з лінзою; 2-поглинаючий фільтр; 3-лампа розжарювання; 4-об'єктив з лінзою; 5-світлофільтр; 6-мілівольтметр; 7-джерело струму; 8-реостат

Пірометр являє собою телескопічну трубку з лінзою 1 об'єктива і лінзою 4 окуляра. В середині телескопічної трубки у фокусі лінзи об'єктива знаходиться лампа розжарювання 3 з підковоподібною ниткою. Лампа живиться від джерела струму 7 через реостат 8. В коло живлення лампи включений мілівольтметр 6, конструктивно об'єднаний з трубкою телескопа.

Шкала мілівольтметра відградуєвана в градусах температури. Для одержання монохромного світла окуляр оснащений червоним світлофільтром 5, що пропускає тільки промені певної довжини хвилі. В об'єктиві знаходиться сірий поглинаючий фільтр 2, який слугує для розширення діапазона вимірювань. Об'єктив і окуляр прилада можуть переміщуватися вздовж осі в телескопічній трубці, що дозволяє одержати чітке відображення розпеченого тіла і нитки лампи. При підготовці оптичної системи до вимірювання трубку спрямовують на тіло і пересувають об'єктив до одержання чіткого зображення тіла і нитки лампи (у вигляді різкої чорної підкови). Ввімкнувши джерело струму, реостатом регулюють яскравість нитки доти, поки середня частина її не зіллється з розпеченим тілом. У цей момент за шкалою мілівольтметра відраховують температуру тіла. Лампа з вольфрамовою ниткою протягом тривалого часу зберігає пригадану їй залежність яскравості нитки від сили струму який протікає нею, якщо температура не перевищує  $1400^{\circ}\text{C}$ . Нагрівання до температури, вищої, ніж  $1400^{\circ}\text{C}$ , приводить до розплавлення вольфрамової нитки і зміни її опору; випаруваний вольфрам осідає на стінках колби лампи, утворюючи темний наліт, тому яскравість лампи змінюється.

Межу вимірювання підвищують введенням сірого фільтра, який в одиницькій мірі поглинає енергію хвиль усіх довжин. Скло сірого світлофільтра вибирають такої оптичної густини, щоб при яскравості випромінювання, вищій ніж  $1400^{\circ}\text{C}$ , нитка лампи розжарювання нагрівалася до температур випромінювання не вищих, ніж  $1400^{\circ}\text{C}$ . Відповідно з цим, мілівольтметр оснащують двома шкалами: верхньою – для вимірювання температур від  $800$  до  $1400^{\circ}\text{C}$  з виведеним сірим фільтром і нижньою – для температур, вищих, ніж  $1300^{\circ}\text{C}$  з введеним сірим світлофільтром. Пірометри цього типу працюють з ефективною довжиною хвилі  $0,65$  або  $0,66$  мкм.

На відміну від пірометрів із зникаючою ниткою, фотоелектричні пірометри дозволяють записувати покази температури і передавати їх на віддалі. Ці прилади можна застосовувати для вимірювання температур при процесах, які швидко протікають.

Принцип дії таких пірометрів заснований на властивості фотоелемента змінювати фотострум залежно від світлового потоку, який падає на нього. У фотоелектричних пірометрах використовується та ж лінійка спектра (середня довжина хвилі  $0,65$  мкм), що і в пірометрах із зникаючою ниткою. Одержуваний фотострум, що характеризує температуру випромінювача, дуже малий, тому для його підсилення застосовують електронні підсилювачі.

На рис. 3.6.3. показана принципова схема фотоелектричного пірометра (типу ФЕП), в якому використовується від'ємний зворотній зв'язок за світловим потоком.

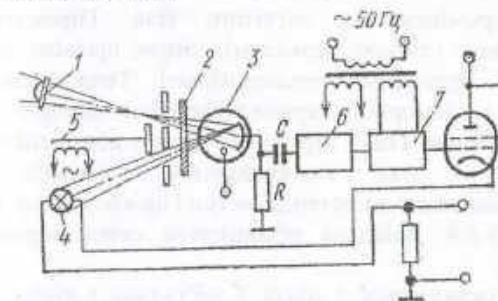


Рис. 3.6.3. Принципова схема фотоелектричного пірометра типу ФЕП  
1-лінза; 2-червоний фільтр; 3-фотоелемент; 4-лампа розжарювання; 5-заслінка; 6-модулятор світла; 7-касета фільтра; 8-електронна лампа

Світловий потік від тіла, що його випромінює, контролюється лінзою 1 і через верхній отвір касети червоного світлофільтра 2 потрапляє на фотоелемент 3. На фотоелемент через нижній отвір касети потрапляє також світловий потік від лампи розжарювання 4. Почергове освітлення

фотоелемента то від тіла випромінювання, то від лампи розжарювання забезпечується віброуючою з частотою 50 Гц заслонкою 5 модулятора світла 6, встановленою перед касетою фільтра 7.

Конфігурацію віброуючої заслонки і отворів у касеті світлофільтра вибрано так, що на фотоелемент потрапляють синусоїдально мінючіс, світлові потоки обох джерел випромінювання. При цьому, фази обох світлових потоків зсунуті на  $180^\circ$ .

Підсумковий, струм, який маємо на виході фотоелемента, створює на резисторі R синусоїдальне падіння напруги, яка через конденсатор С подається на трикаскадний електронний підсилювач напруги 6. Перемінна складова фотоструму, пропорційна різниці світлових потоків, підсилюється підсилювачем і подається через фазочутливий детектор 7 та електронну лампу 8. Струм цієї лампи є вихідним параметром. В анодне коло електронної лампи ввімкнена лампа 4 від'ємного зворотнього зв'язку.

Від'ємний зворотний зв'язок у світловому потоці, охоплюючи фотоелемент і електронний підсилювач, забезпечує роботу пірометра, яка мало залежить від зміни коефіцієнтів підсилення окремих каскадів і чутливості фотоелемента, а також від зміни температури датчика і напруги джерела живлення. Межа вимірювань пірометра - 800 - 4000  $^\circ\text{C}$ .

### § 3.6.3. Пірометри повного випромінювання

Пірометри повного випромінювання вимірюють температуру по потужності випромінювання нагрітого тіла. Пірометр оснащений оптичною системою (лінзою, зеркалом), збирає промені, що їх випускає нагріте тіло, на будь-якому теплоприймачі. Теплоприймач, зазвичай, складається із мініатюрної термоелектричної батареї (із декількох послідовно сполучених ТЕП), термометра опору або напівпровідникового терморезистора. В ролі вимірювальних приладів застосовують мілівольтметри, автоматичні потенціометри і врівноважені мости.

На рис. 3.6.4. показана принципова схема пірометра повного випромінювання.

Пірометр складається з лінзи 1 об'єктива і лінзи 2 окуляра. На шляху променів лінзи 1 встановлена діафрагма 3, а у фасаді лінзи об'єктива – термоелектрична батарея 4. Робочі спай ТЕП прикріплені до хрестоподібної пластинки із платинової фольги, покритої платиновою чорнотою для кращого поглинання променів, що падають. Вільні кінці ТЕП термометрів закріплені на пластинці зі слюди, а з'єднувальні проводи виведені до клем, що знаходяться в корпусі телескопа. Перед окулярною лінзою розміщене кольорове скло 5 для захисту очей при установці пірометра.

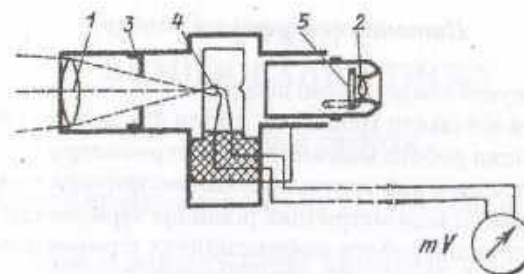


Рис. 3.6.4. Принципова схема пірометра повного випромінювання з термобатареєю у скляному балончику:

1,2-лінзи; 3-діафрагма; 4-термоелектрична батарея; 5-кольорове скло

Температура робочих кінців термобатареї не повинна перевищувати  $250^\circ\text{C}$ . Для зменшення числа променів, падаючих на термобатарею слугує діафрагма 3.

Пірометри цього типу дозволяють вимірювати температуру від 100 до 4000  $^\circ\text{C}$  ( залежно від модифікації приладу).

## Питання до третього розділу

1. Назвіть існуючі температурні шкали?
2. Як перейти від шкали Цельсія до шкали Фаренгейта і навпаки?
3. Який принцип роботи манометричних термометрів?
4. Для чого призначений контактний манометричний термометр?
5. Які особливості манометричних рідинних термометрів?
6. Поясніть принцип роботи конденсаційних термометрів.
7. Який ефект називається термоелектричним?
8. У чому суть роботи термопар?
9. Які типи термопар використовують в промисловості.

## Розділ 4

### ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ

## 4. Основні поняття

## § 4.1. Одиниці вимірювання тиску та співвідношення між ними

Тиск – один із найважливіших параметрів навколишнього середовища. Від його величини залежить перебіг усіх метеорологічних явищ в атмосфері, його вплив на всі живі організми біосфери досить відчутний.

Таблиця 4.1.

Співвідношення між одиницями тиску різних систем

Одиниця тиску	Коефіцієнт переведення				
	кг/см <sup>2</sup> або мм вод. ст.	1 кг/см <sup>2</sup> або ат (технічна атмосфера)	1,013 кг/см <sup>2</sup> або атм (фізична атмосфера)	мм рт.ст.	Н/м <sup>2</sup> або Па
1 кг/см <sup>2</sup> або 1 мм вод. ст.	1	10 <sup>-4</sup>	0,09868 × 10 <sup>-3</sup>	73,556 × 10 <sup>-3</sup>	9,80665
1 кг/см <sup>2</sup> або 1 ат (технічна атмосфера)	10 <sup>4</sup>	1	0,9678	735,56	98066,5
1,013 1 кг/см <sup>2</sup> або 1 атм. (фізична атмосфера)	10332	1,0332	1	760,0	101325
1 мм рт.ст.	13,6	1,36 × 10 <sup>-3</sup>	1,316 × 10 <sup>-3</sup>	1	133,322
1 $\frac{H}{M}$ або 1 Па	0,101	10,2 × 10 <sup>-6</sup>	10,13 × 10 <sup>-6</sup>	7,50 × 10 <sup>-3</sup>	1

Під тиском, у широкому значенні, розуміють ліміт відношення нормальної складової сили до площі, на яку діє ця сила. При рівномірному розподілі сил тиск рівний частці від ділення нормальної складової сили тиску на площу, на яку діє ця сила. Розрізняють абсолютний і надлишковий тиск. Абсолютний тиск  $P_a$  – параметр стану речовини (газів, рідин і парів). Надлишковий тиск  $P_n$  – різниця між абсолютним  $P_a$  і атмосферним тиском  $P_b$  (тобто, тиском навколишнього середовища):

$$P_n = P_a - P_b \quad (4.1)$$



Якщо абсолютний тиск нижчий ніж атмосферний, тоді:

$$P_v = P_b - P_a, \quad (4.2)$$

де  $P_v$  – тиск (розрідження), вимірюваний вакууметром.

У табл. 4.1 наведені співвідношення деяких одиниць тиску, які застосовуються найчастіше.

#### § 4.2. Класифікація приладів для вимірювання тиску

Прилади для вимірювання тиску, зазвичай, класифікують за принципом дії і за родом вимірюваної величини.

За принципом дії прилади для вимірювання тиску поділяються на такі:

- **рідинні**; в їх основі врівноважування вимірюваного тиску гідростатичним стовпчиком рідини;
- **деформаційні (пружинні)**, які вимірюють тиск за величиною деформації різних пружних елементів, або за силою, яку вони створюють;
- **електричні**, базуються на перетворенні тиску в будь-яку електричну величину, або на вимірюванні електричних властивостей матеріалу під дією тиску.

За родом вимірюваної величини прилади для вимірювання тиску і розрідження поділяються на такі:

- **манометри** – для вимірювання абсолютного і надлишкового тиску;
- **вакуумметри** – для вимірювання розрідження (вакууму);
- **мановакууметри** – для вимірювання надлишкового тиску і вакууму;
- **мікроманометри** – для вимірювання малих надлишкових тисків;
- **мікроманометри** – для вимірювання малих тисків і розріджень;
- **диференційні манометри** – для вимірювання різниці двох тисків, ні один з яких не є тиском навколишнього середовища;
- **барометри** – для вимірювання атмосферного тиску. Для опису приладів найбільш зручна класифікація за принципом дії.

#### § 4.3. Рідинні прилади

Рідинні прилади відрізняються простотою конструкції і відносно високою точністю вимірювань, їх широко застосовують, як для лабораторних, так і для технічних вимірювань. Рідинні прилади слугують для градування і перевірки приладів інших систем, вимірювання

невеликих надлишкових тисків, розріджень, різниці тисків, а також атмосферного тиску.

#### § 4.3.1. Прилади з видимим рівнем

Двотрубний U-подібний прилад (рис. 4.3.1) являє собою скляну трубку 1, вигнуту у вигляді букви U. Трубка закріплена на дошці 2 зі шкалою, розміщеною між вітками трубки. Трубка приладу заповнена рідиною (ртуттю, водою, спиртом).

Система знаходиться в рівновазі, якщо гідростатичний тиск стовпа рідини у відкритому коліні врівноважується тиском у другому коліні, тобто:

$$P_{as} = P_{bs} + Hsg (\rho - \rho_1) \quad (4.3.1)$$

де  $P_a$  – абсолютний тиск в апараті, або трубопроводі  $P_a$ ;  $P_b$  – атмосферний тиск,  $P_a$ ;  $s$  – площа січення трубки,  $m^2$ ;  $H$  – різниця рівнів рідини в обох колінах або висота врівноважуючого стовпчика рідини,  $m$ ;  $\rho$  – густина рідини в манометрі,  $kg/m^3$ ;  $\rho_1$  – густина середовища, що оточує манометр,  $kg/m^3$ ;  $g$  – прискорення вільного падіння,  $m/s^2$ .

Із рівняння (4.3.1) маємо:

$$P_a = P_b + H \cdot g (\rho - \rho_1), \quad (4.3.2)$$

$$\text{або } P_n = P_a - P_b = H \cdot g (\rho - \rho_1).$$

Якщо над рідиною в приладі знаходиться газ, тоді

$$P = P_a - P_b = H \cdot g \cdot \rho.$$

Якщо тиск у просторі, з яким з'єднаний прилад, нижчий ніж атмосферний, то рідина в трубках переміститься в зворотньому напрямку і висота її буде відповідати розрідженню (вакууму). Приєднавши два вільні кінці трубки приладу до двох посудин з різними тисками, можливо за різницею рівнів у приладі визначити різницю тисків. Прилад наповнений рідиною до нульової позначки шкали.

Для визначення висоти стовпчика рідини необхідно робити два заміри (зниження в одному коліні, підйому в другому) і сумувати заміряні величини, тобто,  $H = h_1 + h_2$ .

**Однотрубний (чашковий) прилад** являє собою модифікацію двотрубного, одне із колін якого замінено широкою посудиною (чашкою).

Посудина 1 (рис. 4.3.2) сполучена із вертикальною скляною трубкою 2. Резервуар, у якому вимірюють тиск, під'єднують до чашки, а резервуар, в якому вимірюють розрідження – до трубки. Величину тиску чи розрідження констатують за висотою стовпчика рідини у вертикальній трубці приладу.

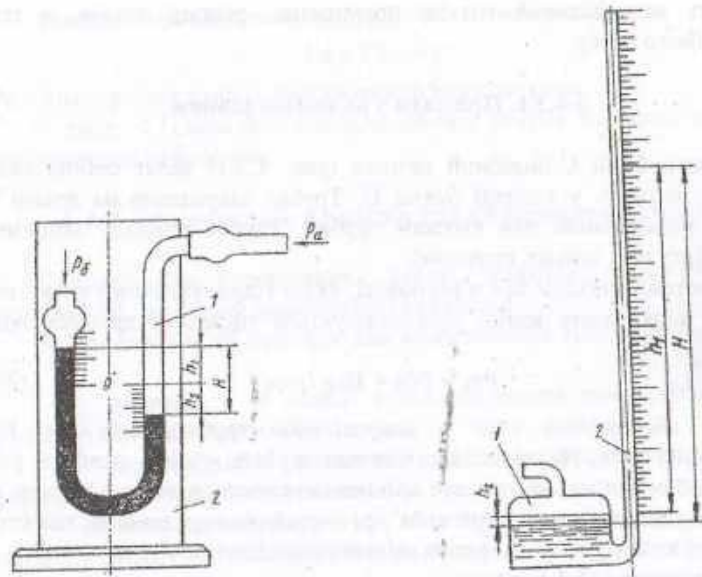


Рис. 4.3.1. Схема двотрубного U-подібного манометра  
1-скляна трубка; 2-дошка зі шкалою

Перевага чашкового приладу полягає в одному відліку положення меніска рідини в трубці. Проте при цьому виникає похибка через зниження рівня рідини в чашці, що змінює положення нуля шкали. При підйманні рідини в трубці на висоту  $h_1$  рідина в чашці опуститься на висоту  $h_2$ . Ці величини зв'язані рівністю:

$$h_1 s = h_2 \cdot S, \quad (4.3.3)$$

де  $s$  і  $S$  – площа перерізу відповідно трубки і чашки,  $m^2$ .

$$\text{Звідси} \quad h_2 = h_1 \cdot s/S. \quad (4.3.4)$$

Справжня висота стовпчика рідини буде такою:

$$H = h_1 + h_2 = h_1 \cdot s/S = h_1 (1 + s/S). \quad (4.3.5)$$

Тиск буде такий:

$$P = h_1 g (1 + s/S) \cdot (\rho - \rho_1). \quad (4.3.6)$$

Отже, похибка вимірювання залежить від відношення площі перерізу трубки і чашки, вона може бути дуже мала. Площі чашки і

трубки вибирають, звичайно, так, щоб відношення  $s/S$  можна було нехтувати. В основному, для чашкових манометрів  $s/S \leq 14400$ . При цьому без внесення суттєвої похибки можна вважати  $P = h_1 g (\rho - \rho_1)$ .

Верхня межа вимірювання тиску рідинними приладами обмежується їх можливими габаритними розмірами. На практиці дво- і однотрубні манометри виготовляють для вимірювання тисків не більших, ніж 0,196 МПа.

Манометр з нахиленою трубкою застосовують для вимірювання тиску невеликих числових значень. Схема такого манометра показана на рис. 4.3.3.

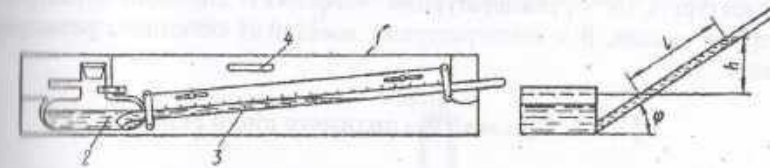


Рис. 4.3.3. Схема мікроманометра з нахиленою трубкою  
1-дошка кріплення; 2-скляна посудина з рідиною; 3-скляна трубка; 4-рівнемір

Прилад складається зі скляної посудини 2, до якої під деяким кутом  $\varphi$  до горизонту припаяна скляна трубка 3. Посудина з трубкою закріплені на дерев'яній дошці 1 зі шкалою. Шкала виготовлена рухомою, щоб при заповненні приладу, рідиною можна було сумістити нуль шкали з меніском рідини в трубці. Кінець трубки під'єднаний до об'єму, в якому вимірюють розрідження. Для точності встановлення приладу в горизонтальній площині він оснащений рівнеміром 4. Внаслідок нахилу трубки висота стовпчика рідини врівноважуючого тиск  $h = l \sin \varphi$ , де  $l$  – переміщення меніску рідини в трубці відраховане по шкалі. Тиск

$$P = l \cdot \sin \varphi g (1 + s/S (\rho - \rho_1)). \quad (4.3.7)$$

Мікроманометри з нахиленою трубкою виготовляють, як правило, для вимірювання тиску 157-980 Па. Похибка таких приладів не перевищує  $\pm 1,5\%$  максимального значення шкали. При необхідності вимірювати тиски або розрідження в більш широких межах використовують мікроманометри з перемінним кутом нахилу трубки.

При точних вимірюваннях рідинними приладами необхідно ввести поправку на величину прискорення вільного падіння і на температуру. Поправка на прискорення вільного падіння має такий вигляд:

$$h_n = h_1 \cdot g_1/g_n. \quad (4.3.8)$$

де  $h_n$  – висота стовпчика рідини при нормальному прискоренні

$g_n = 9,80665 \text{ м/с}^2$ ;  $h_1$  – спостережна висота стовпчика;  $g_1$  – прискорення вільного падіння в тій чи іншій місцевості.

Поправку на температуру вводять для врахування зміни густини рідини і зміну довжини шкали при зміні температури. Сумарна температура становить:

$$h = h_1 \frac{1 + \alpha(t - 20)}{1 + \beta(t - t_0)}, \quad (4.3.9)$$

де  $h$  – висота стовпчика рідини при нормальній температурі  $t_0$  (для ртуті  $t_0 = 0^\circ\text{C}$ , для води  $t_0 = 4^\circ\text{C}$ );  $h_1$  – спостережна висота стовпчика рідини при температурі  $t$ ,  $\alpha$  – температурний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу шкали;  $\beta$  – температурний коефіцієнт об'ємного розширення рідини.

### § 4.3.2. Прилади без видимого рівня рідини

Для технічних вимірів рідинні прилади виконують у вигляді так званих комбінованих рідинно-механічних приладів. До них належать поплавкові, кільцеподібні і дзвоноподібні.

Поплавкові прилади – це U-подібні рідинні прилади, у яких одне з колін розширене і в нього вміщений поплавок, зв'язаний зі стрілкою, що рухається вздовж шкали. Поплавкові прилади найчастіше використовують як диференційні манометри (дифманометри) для вимірювання різниці тиску.

На рисунку 4.3.4 приведена схема поплавкового дифманометра.

Якщо в лівому коліні тиск  $P_1$ , а в правому  $P_2$ , то при  $P_1 > P_2$  рівень рідини в лівому коліні понизиться на висоту  $h_2$ , а в правому підвищиться на висоту  $h_1$ . Різниця тисків  $P_1 - P_2$  зрівноважується стовпчиком рідини висотою:

$$H = h_1 + h_2, \quad (4.3.10)$$

Умова рівноваги виражається формулою:

$$P_1 - P_2 + Hg(\rho - \rho_1). \quad (4.3.11)$$

У посудинах циліндричної форми  $h_2 \pi D^2/4 = h_1 \pi d^2/4$ , звідки

$$h_1 = h_2 D^2/d^2, \quad (4.3.12)$$

тоді  $H = h_2(1 + D^2/d^2)$ . Замінивши  $H$  його виразом, отримаємо:

$$P_1 - P_2 = h_2 g(1 + D^2/d^2)(\rho - \rho_1). \quad (4.3.13)$$

Для такого приладу вираз  $1 + D^2/d^2$ , а також різниця густин  $\rho - \rho_1$  – постійні.

Виразивши ці величини постійними коефіцієнтами  $k$  і  $k_1$ , отримаємо:

$$P_1 - P_2 = k k_1 h_2, \quad (4.3.14)$$

тобто, різницю тисків можливо виразити величиною переміщення.

При незмінних розмірах широкого коліна зміною діаметра і висоти вузького коліна можна у певних межах змінити границі вимірювання різниці тисків. Із сумісного розв'язку рівнянь (4.3.10) і (4.3.12) знайдемо:

$$d = D \sqrt{h_2(H - h_2)}. \quad (4.3.15)$$

Із рівняння (4.3.15) визначають необхідний діаметр вузького коліна при заданих значеннях  $H$ ,  $h_2$  і  $D$ .

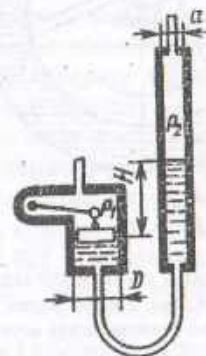


Рис. 4.3.4. Схема поплавкового диференційного манометра

Іноді поплавкові дифманометри виготовляють із контактним пристроєм (для сигналізації), виконаним у вигляді ртутно-скляних перемикачів.

При необхідності передавання показів на відстань, більшу, ніж 50 м, а також у випадках, коли прилади встановлюють на щитах управління, застосовують дифманометри з електричною або пневматичною передачею.

Прилади з пневматичною передачею застосовують у вибухо- і пожежонебезпечних виробничих умовах.

Поплавкові манометри мають різні межі вимірювання тисків і їх різниці, і вони розраховані на різні статичні тиски. Прилади з різними межами вимірювань відрізняються тільки внутрішнім діаметром колін і його висотою.

Кільцеві прилади призначені для вимірювання малих тисків. Кільцевий прилад (рис. 4.3.5) складається із пустотілого замкнутого кільця 1, розділеного вверху перегородкою 2, кільце підвішене на ножовій опорі 3

в геометричному центрі. По обидва боки від перегородки в кільце входять трубки 4 і 5, призначені для сполучення кільця з простором, у якому вимірюють тиск або розрідження. До нижньої частини кільця прикріплений вантаж 6. Пустотіла частина кільця до половини заповнена рідиною (водою, ртуттю).

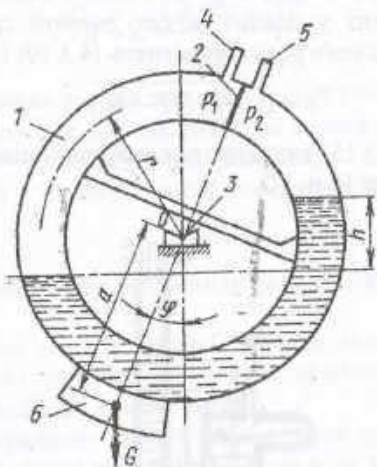


Рис. 4.3.5. Схема кільцевого манометра  
1-пустотіле замкнуте кільце; 2-перегородка; 3-ножова опора;  
4,5-трубки; 6-рівноважний вантаж

При сполученні обох пустот кільця з просторами, в яких тиск рівний  $P_1$  і  $P_2$  (причому  $P_1 > P_2$ ), рівень рідини в лівій частині понижується, а в правій, відповідно, підвищується; різниця рівнів пропорційна різниці тисків

$$P_1 - P_2 = h \cdot \rho \cdot g, \quad (4.3.16)$$

де  $\rho$  – густина рідини, якою заповнене кільце.

У той же час, сила від різниці тисків  $P_1 - P_2$ , яка діє на перегородку, створює обертаючий момент:

$$M_p = (P_1 - P_2) S r, \quad (4.3.17)$$

де  $S$  – площа перерізу перегородки;  $r$  – радіус перерізу.

Під дією цього моменту кільце обертається навколо точки опори за годинниковою стрілкою. Поворот кільця створює протидіючий момент:

$$M_G = G a \sin \varphi, \quad (4.3.18)$$

де  $G$  – сила ваги вантажу;  $a$  – відстань від центра опори до центра ваги вантажу;  $\varphi$  – кут повороту кільця.

При врівноваженні обох моментів (без урахування протидіючого моменту від спіральних трубок підведення) кільце зупиняється в новому положенні рівноваги ( $M_p = M_G$ ):

$$P_1 - P_2 = \frac{G \cdot a}{S \cdot r} \sin \varphi. \quad (4.3.19)$$

Оскільки сила ваги вантажу і геометричні розміри кільця постійні, з рівняння (4.3.19) можна подати у такій формі:

$$P_1 - P_2 = k \sin \varphi. \quad (4.3.20)$$

Вимірюваний тиск (або різниця тисків) пропорційна синусу кута повороту кільця, тому шкала приладу нерівномірна. Крім того, за конструктивними можливостями кут повороту кільця неможливо зробити більшим, ніж  $60^\circ$ , що обмежує шкали при безпосередньому сполученні кільця із стрілкою шкали. Для збільшення довжини шкали між стрічкою приладу і кільцем вводять передачу, збільшуючи переміщення стрілки і одночасно вирівнюючи шкалу приладу.

Прилади кільцевого типу виготовляють показуючими, показуючо-записуючими із дистанційним передаванням показів. Найбільш можлива верхня межа вимірювання визначається, в основному, розмірами кільця, густиною рідини в кільці і, зазвичай, складає 33,325 кПа для приладів із ртутним заповненням і 2,425 кПа для пустотілих кілець з водяним, або масляним заповненням. Межі вимірювань змінюють заміною рівноважного вантажу.

Прилади з водяним і масляним заповненням призначені для роботи з надвисоким тиском до 49 кПа; прилади з ртутним заповненням – до 980-9700 кПа. Основна похибка приладів не перевищує 1,1;-1,5% верхньої межі вимірювання.

У приладах низького тиску вимірюване середовище підводиться по гумових трубках, які утворюють дуже легкий протидіючий момент, яким можна знехтувати. В приладах середнього тиску вимірюване середовище підводиться по двох бронзових або сталевих спіральних трубках, витки яких спрямовані протилежно. Зусилля, які виникають у спіралях, при повороті кільця, діють в протилежні сторони і взаємно врівноважуються.

Переваги кільцевих приладів перед поплавковими полягають у відсутності ущільнюючих пристроїв в передавальному механізмі (особливо важливо для приладів високого тиску) і в незалежності чутливості приладу від зміни густини робочої рідини і середовища над нею. До недоліків кільцевих приладів можна віднести такі: наявність трубок для підведення середовища, які можуть вносити похибку у вимірювання.

Дзвоноподібні прилади використовують для вимірювання малих тисків і розріджень (тягоміри і тискоміри) в ролі диференційних

манометрів. Прилад (рис. 4.3.6) складається із посудини 1 з рідиною, в яку занурений дзвін 2. Під дзвоном введена трубка 3 для сполучення підзвонного простору з об'ємом в якому вимірюють тиск або розрідження.

Якщо під дзвоном створюється тиск, то він піднімається, оскільки на нього діє додаткова сила, спрямована догори і рівна  $PS$  ( $P$  – надлишковий тиск під дзвоном,  $S$  – площа поперечного перерізу поверхні сферичної частини дзвона).

Щоб перетворити цю систему у вимірювальний прилад, необхідно забезпечити однозначність залежності переміщення дзвона від тиску під ним. Для цього в систему повинна бути введена перемінна протидіюча сила, функціонально залежна від переміщення дзвона. В існуючих дзвоноподібних приладах для створення протидіючої сили використовують архімедову силу ваги вантажу або силу стискування пружини.

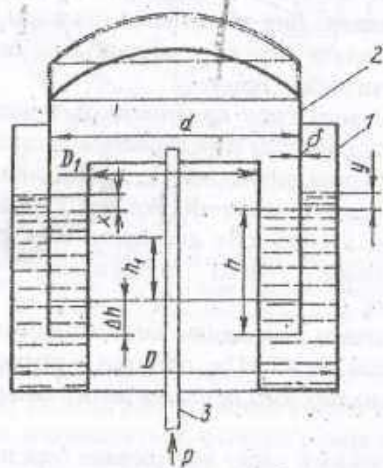


Рис. 4.3.6. Принципова схема дзвоноподібного приладу  
1 – посудина з рідиною; 2 – дзвін; 3 – трубка

Найбільш простий випадок – використання дзвона з товстими стінками (врівноваження архімедової сили).

Прийmemo такі позначення:  $G$  – сила ваги дзвона;  $d$  і  $\sigma$  – внутрішній діаметр і товщина стінок дзвона;  $\rho$  – густина робочої рідини;  $h$  і  $h_1$  – глибина занурювання дзвона при тиску, відповідно,  $P = 0$  і надлишковому  $P$ ; решта величин – див. рис. 4.3.6.

Умова рівноваги дзвона при  $P = 0$  і  $\sigma \ll d$

$$G - \pi(d + \delta) \cdot \delta \cdot h \cdot \rho \cdot g = 0, \quad (4.3.21)$$

при тиску, рівному  $P$ ,

$$G - \pi(d + \delta) \cdot \delta \cdot h_1 \cdot \rho \cdot g = P \cdot \pi \cdot d^2 / 4. \quad (4.3.22)$$

Після віднімання рівняння (4.3.22) із рівняння (4.3.21) отримано:

$$h - h_1 = \frac{P}{\rho g} \frac{d^2}{4(d + \delta)\delta}. \quad (4.3.23)$$

Із рис. 4.3.6 маємо:

$$h - h_1 = x + \Delta h \quad \text{і} \quad (x + y)\rho \cdot g = P, \quad (4.3.24)$$

або

$$y = P / \rho \cdot g - x. \quad (4.3.25)$$

Зі зниженням рівня  $x$  під дзвоном і підвищенням –  $y$  рівня ззовні дзвона можна записати такі залежності:

$$x(d^2 - D^2) = y[D^2 - (d + 2\delta)^2]. \quad (4.3.26)$$

Підставивши значення  $y$  в рівняння (4.3.25), отримаємо:

$$x(d^2 - D^2) = (P / \rho \cdot g) [D^2 - (d + 2\delta)^2] - x[D^2 - (d + 2\delta)^2], \quad (4.3.27)$$

відси:

$$x = \frac{P}{\rho g} \frac{D^2 - (d + 2\delta)^2}{D^2 - 4\delta(d + \delta) - D_1^2}. \quad (4.3.28)$$

З урахуванням  $x$  із рівнянь (4.3.24) і (4.3.23) отримаємо:

$$\Delta h = \frac{P}{\rho g} \left[ \frac{d^2}{4(d + \delta)\delta} - \frac{D^2 - (d + 2\delta)^2}{D^2 - 4\delta(d + \delta) - D_1^2} \right]. \quad (4.3.29)$$

Із цього рівняння видно, що переміщення дзвона залежить тільки від надлишкового тиску, геометричних розмірів дзвона і не залежить від маси дзвона.

Для цього приладу його геометричні розміри, а також густина зовнішньої рідини – постійні величини, тому останнє рівняння можна подати в такому вигляді:

$$\Delta h = k \cdot p. \quad (4.3.30)$$

На рис. 4.3.7 показана принципова схема дзвоноподібного приладу із врівноваженим вантажем. Штриховими лініями показано положення дзвона при  $P_1 - P_2 = 0$ ; для цього положення рівняння рівноваги моментів має такий вигляд:

$$G_1 - Sh_0(\rho_1 - \rho_2) r_1 = G \cdot r \cdot \sin \alpha, \quad (4.3.31)$$

де  $G_1$  – сила ваги дзвона;  $S$  – площа поперечного перерізу його стінок;  $h_0$  – початкова глибина занурення дзвона;  $\rho_1$  і  $\rho_2$  – густина, відповідно, робочої рідини і середовища, яке знаходиться над нею;  $G$  – сила ваги вантажу;  $\alpha$  – початковий кут між важелем вантажу  $G$  і вертикаллю.

Із рівняння (4.3.31) визначають початковий кут  $\alpha$ . При  $\rho_2 > \rho_1$

$$[S_1(P_1 - P_2) - G_1 + (h_0 - H + y)s[g(\rho_1 - \rho_2)]r_1] \sin \varphi = G \sin(\varphi - \alpha), \quad (4.3.32)$$

де  $S_1$  – площа дна дзвона;  $H$  – висота підйому дзвона;  $y$  – висота підйому рідини ззовні дзвона;  $\varphi$  – кут повороту важелів  $r_1$  і  $r$ .

Рівність об'ємів рідини, що опустилася всередині дзвона на відстань  $x$  і піднялася ззовні його на величину  $y$  при врахуванні об'єму рідини, звільненої стінками дзвона при підйомі, має такий вигляд:

$$(h - y)(s_1 - s) = HS + y(\Phi - s_1 - S), \quad (4.3.33)$$

де  $h = (P_1 - P_2) / (\rho_1 - \rho_2)g$  – площа поперечного перерізу трубки всередині дзвона;  $\Phi$  – площа поперечного перерізу посудини.

Розв'язавши рівняння (4.3.31), (4.3.32) і (4.3.33), знайдемо залежність кута  $\varphi$  від різниці  $P_1 - P_2$  і конструктивних розмірів дзвона:

$$\frac{Gr}{r_1(\rho_1 - \rho_2)g} \cos \alpha \cdot \tan \varphi + \frac{S(\Phi - S)}{\Phi - s - S} r_1 \sin \varphi = \frac{S_1(\Phi - S) - Ss}{\Phi - s - S} h. \quad (4.3.34)$$

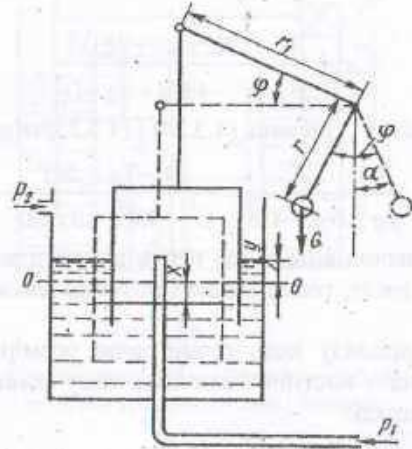


Рис. 4.3.7. Принципова схема дзвоноподібного приладу з врівноважуючим вантажем:

$G$  – врівноважувальний вантаж;  $P_1$ ,  $P_2$  – врівноважувальні тиски

Позначимо постійні величини:

$$k_1 = \frac{Gr}{r_1(\rho_1 - \rho_2)g}; \quad k_2 = \frac{S(\Phi - S)}{\Phi - s - S} r_1; \quad k_3 = \frac{S_1(\Phi - S) - Ss}{\Phi - s - S}. \quad (4.3.35)$$

Через те, що в дзвоноподібних приладах з врівноважуючим вантажем товщина стінок мала, а отже, і мала площа  $S$ , коефіцієнтом  $k_2$  можна знехтувати, тоді:

$$\tan \varphi = k_3 h / (k_1 \cos \alpha). \quad (4.3.36)$$

Врівноважування пружиною застосовують у диференціальних манометрах. Чутливим елементом дифманометра є тонкостінний дзвін 1, частково занурений у рідину і підвішений на пружині 2 (рис. 4.3.8). Оскільки густина матеріалу дзвона, зазвичай, більша ніж густина робочої рідини, то в початковому стані ( $P_1 - P_2 = 0$ ) пружина дещо розтягнута і врівноважує різницю між силою ваги дзвона і гідростатичним тиском рідини на його стінки.

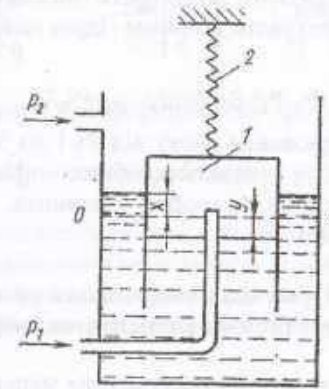


Рис. 4.3.8. Схема дзвоноподібного дифманометра

із врівноважуючою пружиною:

1 – тонкостінний дзвін; 2 – врівноважуюча пружина.

У мірі збільшення перепаду тиску починається підйом дзвона, під час якого пружина 2 спочатку переходить із розтягнутого стану в нейтральний, а потім – у стиснутий.

Диференціальне рівняння переміщення дзвона  $dH$  при зміні перепаду тиску на величину  $d$  ( $\rho_1 - \rho_2$ ) виглядає так:

$$d(P_1 - P_2) S_1 = Z dH + s[(dH - dx)](\rho_1 - \rho_2)g, \quad (4.3.37)$$

де  $Z$  – жорсткість пружини (решту позначень відповідають прийнятим на рис. 4.3.8).

Тоді маємо:

$$d(\rho_1 - \rho_2) = dh(\rho_1 - \rho_2)g, \quad (4.3.38)$$

а рівняння рівності об'ємів матиме такий вигляд:

$$dy(s_1-s) = dx(\phi-s_1-S) + Sdh, \quad (4.3.39)$$

де  $dy = dh - dx$ .

Розв'язавши рівняння (4.3.38), (4.3.39), і проінтегрувавши, отримаємо диференціальне рівняння в межах від  $P_1 - P_2 = 0$  до  $P_1 - P_2$ , тобто залежність переміщення дзвона від зміни тиску:

$$H = \frac{P_1 - P_2}{(\rho_1 - \rho_2)g} \frac{\frac{S_1 - S}{S} \frac{\phi - S}{\phi - s - S} + 1}{(\rho_1 - \rho_2)g (\phi - s)S} \quad (4.3.40)$$

Якщо в рівнянні (4.3.40) помножити чисельник і знаменник на  $S$  і прийняти  $S=0$ , тобто, знехтувати впливом гідростатичного тиску на стінки дзвона, то знайдемо:

$$H = (P_1 - P_2) S_1 / Z = h(\rho_1 - \rho_2)g S_1 / Z. \quad (4.3.41)$$

Верхні межі вимірювання тиску від 98,1 до 392,4 Па. Передавання показів на відстань у дзвоноподібних приладах здійснюється електричними (диференційно-трансформаторними, феро-динамічними) і пневматичними системами.

#### 4.4. Прилади вимірювання тиску з пружними чутливими елементами (деформаційні)

Диференційні манометри, вакууметри, мановакууметри, тягоміри, тискоміри, диференційні манометри і барометри складають широкую групу приладів для технічних вимірювань.

Межі вимірювання, класи точності, допустима температура похибка і деякі інші параметри окремих видів приладів встановлюються стандартами. Дія деформаційних приладів заснована на використанні деформації або згинаючого моменту різних пружних елементів, що сприймають вимірюваний тиск середовища і перетворюють його в переміщення або зусилля. Перевага деформаційних приладів – простота конструкції, надійність, універсальність, портативність і великий діапазон вимірюваних величин. Деформаційні прилади виготовляють різних класів точності.

За видом чутливого елемента деформаційні прилади поділяються на такі групи: прилади з трубчатою пружиною (рис. 4.4.1, а), мембранні прилади, в яких пружним елементом служить мембрана (рис. 4.4.1, в), anerоїдна або манометрична коробка (рис. 4.4.1, г, д), блок anerоїдних або манометричних коробок (рис. 4.4.1, е, ж); пружинно-мембранні з пластичною мембраною (рис. 4.4.1, з) і прилади з пружиною мембраною (сильфоном) (рис. 4.4.1, и); пружинно-сильфонні (рис. 4.4.1, к).

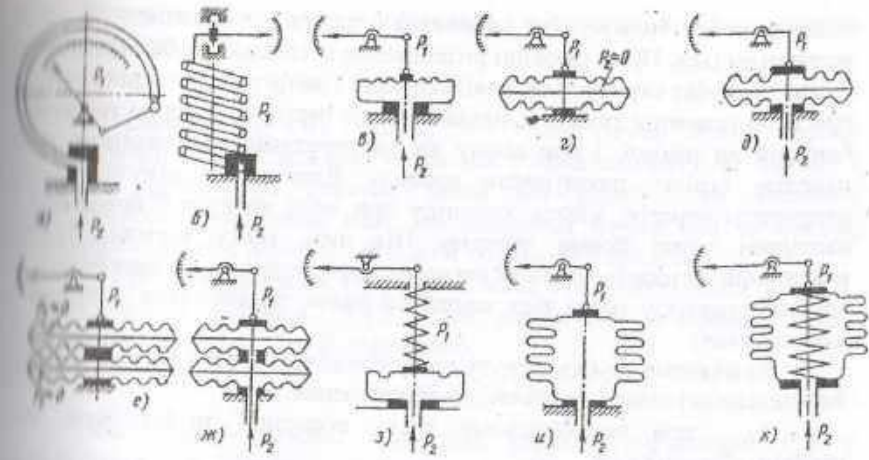


Рис. 4.4.1. Деформаційні прилади

#### § 4.4.1. Прилади з трубчатими пружинами

Найбільш широко застосовують прилади (манометри, вакууметри, мановакууметри і дифманометри) з одновитковою трубчатою пружиною. Основна деталь приладу з одновитковою трубчатою пружиною – вигнута по дузі кола трубка 1 еліптичного, або плоскоовального сечення (рис. 4.4.2).

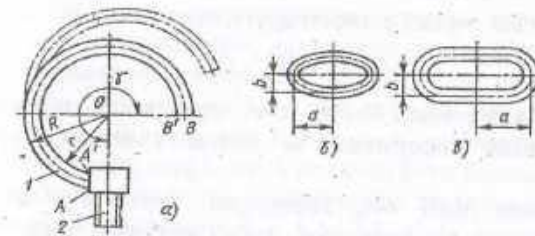


Рис. 4.4.2. Прилад з одновитковою трубчатою пружиною  
1-трубка; 2-тримач.

а) схема трубчатої пружини; б) еліптичний переріз; в) плоскоовальний поперечний переріз

Одним кінцем трубка 1 закріплена в тримачі 2, який закінчується штуцером з різьбою для приєднання до простору, в якому вимірюється тиск. В середині тримача 2 є канал, що сполучається з внутрішньою порожниною трубки. Якщо в трубку подати рідину, газ або пару під

надлишковим тиском, то кривизна трубки зменшиться і вона розпрямляється. При створенні розрідження всередині трубки кривизна зростає і трубка скручується, оскільки один кінець трубки закріплений, а при зміні кривизни трубки її вільний кінець переміщується по траєкторії, близькій до прямої, і при цьому діє на передавальний механізм, який повертає стрілку показуючого приладу. Властивість зігнутої трубки некрутлого перерізу міняти кривизну при зміні тиску в її порожнині є наслідком зміни форми перерізу. Під дією тиску верхньої трубки еліптичний чи пласкоовальний перерізи, деформуючись, наближаються до круглого перерізу (мала вісь еліпса чи овала збільшується, а велика зменшується).

Розглянемо трубку, зігнуту по дузі кола так, що велика вісь перерізу паралельна осі кільця. Зробимо два припущення:

- 1) при надлишковому тиску всередині трубки мала вісь перерізу збільшується.
- 2) при деформації довжина трубки залишається постійною, тобто, дуги АВ і А'В' зберігають первинну довжину. Перше припущення можна застосовувати без суттєвої похибки, тому воно не викликає сумніву. Друге припущення теж можна застосовувати без відчутної похибки, оскільки на практиці розкручування трубки дуже мале, а зміна довжини трубки зовсім мала і нею можна знехтувати.

Позначимо  $OA=R$ ;  $OF^1 = r < AOB = \gamma$ . Ці ж величини після деформації позначимо, відповідно,  $R^1$ ,  $r^1, \gamma^1$ . Тоді згідно з другим припущенням:

$$R\gamma = R^1\gamma^1 \quad \text{і} \quad r\gamma = r^1\gamma^1.$$

Віднявши від першої рівності другу, отримаємо:

$$(R-r)\gamma = (R^1-r^1)\gamma^1. \quad (4.4.1)$$

Але оскільки різниці  $R-r$  та  $R^1-r^1$  представляють собою малі осі еліпса до і після деформації, то згідно з першим припущенням  $(R^1-r^1) > (R-r)$ .

Позначивши малі осі, відповідно, через  $v$  і  $v^1$ ; одержимо в  $\gamma = v^1\gamma^1$ ; але  $v < v^1$ ; отже,  $\gamma > \gamma^1$ , тобто, під дією тиску кут прогину трубки зменшується і вона розпрямляється. Якщо прийняти, що  $v < v^1 + x$  і  $\gamma^1 = \gamma - \beta$ , то отримаємо:

$$v\gamma = (v+x)(\gamma - \beta). \quad (4.4.2)$$

Розв'язавши це рівняння відносно  $\beta$ , отримаємо:

$$\beta = x\gamma / (v+x). \quad (4.4.3)$$

Величина  $x$  дуже мала в порівнянні з  $v$ , тому без помітної похибки можна прийняти, що

$$\beta = x\gamma / v. \quad (4.4.4)$$

Із рівняння (4.4.4) видно, що зміна кута згину трубки обернено пропорційна збільшенню малої осі і початковому куту вигину і обернено пропорційна довжині малої осі еліпса. Цей висновок підтверджується практикою тому, що насправді трубка тим чутливіша, чим менша мала вісь перерізу і більший початковий кут згину трубки.

При розрідженні всередині трубки мала вісь зменшується, тобто,  $x$ , і отже, кут в рівнянні (4.4.3) стає від'ємною величиною, тому, підставивши  $\beta$  у вираз  $\gamma^1 = \gamma - \beta$ , отримаємо:

$$\gamma^1 = \gamma + x\gamma / (v-x). \quad (4.4.5)$$

Отже, при створенні всередині трубки розрідження кут  $\gamma$  збільшується, а трубка скручується. Наведені розмірковування встановлюють лиш кількісну сторону явища і не можуть служити основою для розрахунку, оскільки величина  $x$ , будучи функцією форми, розмірів трубки і властивостей матеріалу, залишається невідомою.

Переміщення вільного кінця до певної межі пропорційне тиску  $\Delta p = kP$ . При подальшому підвищенні тиску лінійна залежність порушується – деформація починає рости швидше, ніж збільшується тиск. Максимальний тиск, при якому ще зберігається лінійна залежність між переміщенням кінця трубки і тиском, називається межею пропорційності трубки.

Межа пропорційності – це найважливіша характеристика трубки. При переході за межу пропорційності трубка набуває залишкової деформації і стає непридатною для вимірювання. Щоб не допустити виникнення залишкової деформації, найбільший робочий тиск  $P_{max}$  (розрідження або різниця тиску) призначають нижчим, ніж межа пропорційності  $P_n$ . Відношення  $P_n / P_{max} = k$  називається коефіцієнтом запасу. У всіх випадках коефіцієнт  $k$  повинен бути більшим, ніж одиниця. Для максимального збільшення довговічності трубки і зниження впливу пружного наслідку приймають  $k = 1,5 \dots 2,5$ . Крім того, для збільшення надійності, зазвичай, вибирають манометри так, щоб найбільший вимірювальний статичний тиск не перевищував 0,65-0,75 верхньої межі вимірювань за шкалою.

Механічні характеристики трубки, тобто, межа пропорційності і переміщення вільного кінця залежить від ряду факторів, із яких найважливішими є відхилення осей перерізу трубки, товщина її стінок, модуль пружності матеріалу і радіус дуги згинання трубки.



надлишковим тиском, то кривизна трубки зменшиться і вона розпрямляється. При створенні розрідження всередині трубки кривизна зростає і трубка скручується, оскільки один кінець трубки закріплений, а при зміні кривизни трубки її вільний кінець переміщується по траєкторії близькій до прямої, і при цьому діє на передавальний механізм, який повертає стрілку показуючого приладу. Властивість зігнутої трубки некруглого перерізу міняти кривизну при зміні тиску в її порожнині є наслідком зміни форми перерізу. Під дією тиску верхньої трубки еліптичний чи плоскоовальний перерізи, деформуючись, наближаються до круглого перерізу (мала вісь еліпса чи овала збільшується, а велика зменшується).

Розглянемо трубку, зігнуту по дузі кола так, що велика вісь перерізу паралельна осі кільця. Зробимо два припущення:

1) при надлишковому тиску всередині трубки мала вісь перерізу збільшується.

2) при деформації довжина трубки залишається постійною, тобто, дуги  $AB$  і  $A^1B^1$  зберігають первинну довжину. Перше припущення можна застосовувати без суттєвої похибки, тому воно не викликає сумніву. Друге припущення теж можна застосовувати без відчутної похибки, оскільки на практиці розкручування трубки дуже мале, а отже зміна трубки зовсім мала і нею можна знехтувати.

Позначимо  $OA=R$ ;  $OF^1 = r < AOB = \gamma$ . Ці ж величини після деформації позначимо, відповідно,  $R^1$ ,  $r^1, \gamma^1$ . Тоді згідно з другим припущенням:

$$R\gamma = R^1\gamma^1 \quad \text{і} \quad r\gamma = r^1\gamma^1.$$

Віднявши від першої рівності другу, отримаємо:

$$(R-r)\gamma = (R^1-r^1)\gamma^1. \quad (4.4.1)$$

Але оскільки різниці  $R-r$  та  $R^1-r^1$  представляють собою малі осі еліпса до і після деформації, то згідно з першим припущенням  $(R^1-r^1) > (R-r)$ .

Позначивши малі осі, відповідно, через  $v$  і  $v^1$ ; одержимо  $v\gamma = v^1\gamma^1$ ; але  $v < v^1$ ; отже,  $\gamma > \gamma^1$ , тобто, під дією тиску кут прогину трубки зменшується і вона розпрямляється. Якщо прийняти, що  $v < v^1 + x$  і  $\gamma^1 = \gamma - \beta$ , то отримаємо:

$$v\gamma = (v+x)(\gamma - \beta). \quad (4.4.2)$$

Розв'язавши це рівняння відносно  $\beta$ , отримаємо:

$$\beta = x\gamma / (v+x). \quad (4.4.3)$$

Величина  $x$  дуже мала в порівнянні з  $v$ , тому без помітної похибки можна прийняти, що

$$\beta = x\gamma / v. \quad (4.4.4)$$

Із рівняння (4.4.4) видно, що зміна кута згину трубки прямопропорційна збільшенню малої осі і початковому куту вигину і обернено пропорційна довжині малої осі еліпса. Цей висновок підтверджується практикою тому, що насправді трубка тим чутливіша, чим менша мала вісь перерізу і більший початковий кут згину трубки.

При розрідженні всередині трубки мала вісь зменшується, тобто,  $x$ , і отже, кут  $v$  в рівнянні (4.4.3) стає від'ємною величиною, тому, підставивши  $\beta$  у вираз  $\gamma^1 = \gamma - \beta$ , отримаємо:

$$\gamma^1 = \gamma + x\gamma / (v-x). \quad (4.4.5)$$

Отже, при створенні всередині трубки розрідження кут  $\gamma$  збільшується, а трубка скручується. Наведені розмірковування стосуються лише кількісну сторону явища і не можуть служити основою для розрахунку, оскільки величина  $x$ , будучи функцією форми, розмірів трубки і властивостей матеріалу, залишається невідомою.

Переміщення вільного кінця до певної межі пропорційне тиску  $P$  в кр. При подальшому підвищенні тиску лінійна залежність порушується – деформація починає рости швидше, ніж збільшується тиск. Максимальний тиск, при якому ще зберігається лінійна залежність між переміщенням кінця трубки і тиском, називається межею пропорційності трубки.

Межа пропорційності – це найважливіша характеристика трубки. При переході за межу пропорційності трубка набуває залишкової деформації і стає непридатною для вимірювання. Щоб не допустити виникнення залишкової деформації, найбільший робочий тиск  $P_{\max}$  (протяження або різниця тиску) призначають нижчим, ніж межа пропорційності  $P_p$ . Відношення  $P_p / P_{\max} = k$  називається коефіцієнтом запону  $Y$  всіх випадках коефіцієнт  $k$  повинен бути більшим, ніж одиниця. Для максимального збільшення довговічності трубки і зниження впливу пружного наслідку приймають  $k = 1.5 \dots 2.5$ . Крім того, для збільшення надійності, зазвичай, вибирають манометри так, щоб найбільший вимірюваний статичний тиск не перевищував 0,65-0,75 верхньої межі вимірювань за шкалою.

Механічні характеристики трубки, тобто, межа пропорційності і переміщення вільного кінця залежить від ряду факторів, із яких найважливішими є відхилення осей перерізу трубки, товщина її стінок, модуль пружності матеріалу і радіус дуги згинання трубки.

Збільшення відношення осей при інших рівних умовах підвищує чутливість і знижує межу пропорційності.

Зазвичай, відношення осей для трубок, розрахованих на малий середній тиск,

знаходиться в межах  $a/b = 1,5 \dots 4,5$ . Збільшення товщини стінок різко підвищує межу пропорційності.

У манометрах високого тиску (вище, ніж 98 МПа) застосовують товстостінні, із легованої сталі, трубчасті пружини круглого перерізу з каналом, вісь якого зміщена відносно осі пружини в бік центру кривизни останньої (рис. 4.4.3). Завдяки ексцентричному каналу надлишковий тиск на заглушку вільного кінця трубки створює момент, який викликає зменшення кривизни трубки і переміщення її вільного кільця.

Манометри з трубчастою пружиною (рис. 4.4.3) виготовляють для тиску до 1000 МПа.

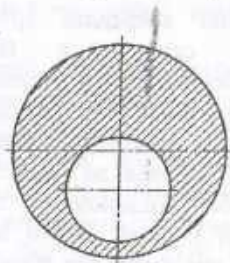


Рис. 4.4.3. Поперечний переріз трубчастої пружини манометра високого тиску

Переміщення вільного кінця трубки під дією тиску невелике, тому для збільшення точності і наочності показів приладу вводять передавальний механізм, який збільшує масштаб переміщення кінця трубки. Зазвичай, застосовують зубчато-секторні передавальні механізми.

За конструкцією вакуумметри і мановакуумметри з одновитковою трубчастою пружиною не відрізняються від манометра.

Робочі прилади з круговою шкалою виготовляють так, що вони показують без додаткових пристроїв, а також вони бувають з контактним пристроєм – електричним або пневматичним перетворювачами для телепередавання. Показуючі прилади застосовують найчастіше як місцеві прилади. Електроконтактні манометри використовують для сигналізації про досягнення мінімального чи максимального робочого тиску або для двопозиційного регулювання. Електроконтактний манометр за принципом дії аналогічний показуючому манометру з одновитковою пружиною. Контактний манометр може працювати тільки при плавній (без пульсацій) зміні тиску.

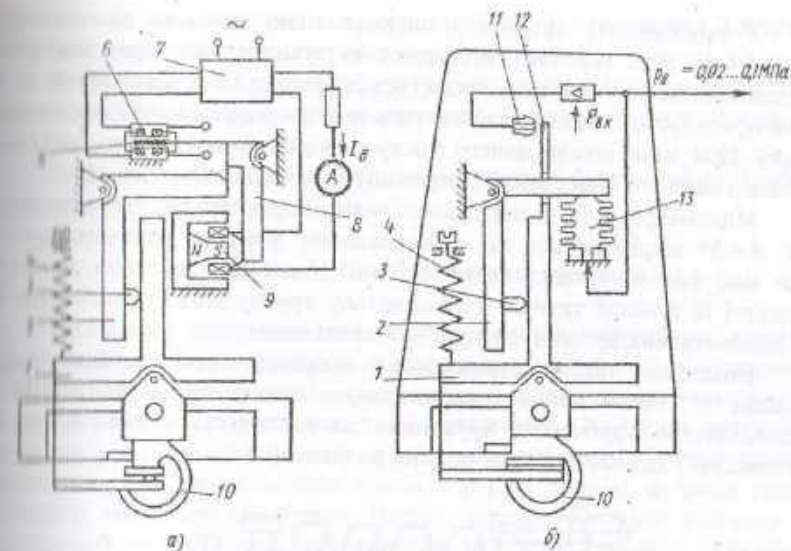


Рис. 4.4.4. Принципові схеми манометра з передачею показів на відстань із електричним (а) та пневматичним (б) перетворювачем  
1,2-важелі; 3-рухома опора; 4-пружинний коректор нуля; 5-прапорець;  
6-індикатор розмежування; 7-підсилювач; 8-важіль врівноваження;  
9-магнітоелектричний механізм; 10-манометрична пружина;  
11-сольно; 12-заслонка; 13-сифон зворотного зв'язку

У пружинному манометрі з електричним перетворювачем (рис. 4.4.4) тиск перетворюється на манометричній пружині 10 в пропорційне зусилля  $F$ . Останнє через важільний передавальний механізм, що складається з важелів 1, 2 і 8, автоматично врівноважується зусиллям зворотного зв'язку, створюваним у магнітоелектричному механізмі 9 зворотного зв'язку при взаємодії струму, який протікає в рухомій шпальці, з полем постійного магніту. При зміні вимірюваного тиску переміщується важільний механізм і зв'язаний з ним прапорець 5 індикатора розмежування 6. Сигнал розбалансування, який виникає в індикаторі, підсилюється електричним підсилювачем 7 і надходить у силовий пристрій зворотного зв'язку і одночасно в лінію дистанційної передачі; він є мірою вимірюваного параметра.

На заданий діапазон вимірювань прилад налаштовують зміною передавального відношення важільного механізму. Для цього переміщують рухома опору 3 вздовж важелів 1 і 2. Передаточне відношення можна змінювати в межах 1:10. Нульове значення вихідного сигналу встановлюють пружинними коректорами нуля 4.

У пружинному приладі з пневматичною силовою компенсацією (рис. 4.4.4 б) тиск теж перетворюється на зусилля, яке через важільний передавальний механізм, що складається із важелів 1 і 2, автоматично врівноважується зусиллям, яке розвиває тиск повітря у сильфоні 13 зворотного зв'язку. При зміні вимірюваного тиску переміщуються важелі системи і зв'язана з важелем 1 заслонка 12 переміщується відносно сопла 11.

Манометри з багатовитковою (гелікоїдною) трубчатою пружиною (рис. 4.4.5) відрізняються від одновиткових формою робочого органу, який має вигляд циліндричної спіралі з шістьма-десятьма витками, звернутої із пласкої трубки. Гелікоїдальну трубку можна розглядати як ряд одновиткових пружин, сполучених послідовно.

Внаслідок такого переміщення вільного кінця трубки значно більшим є переміщення одновиткового манометра. Манометри з гелікоїдальною трубчатою пружиною застосовують, в основному, як самопишучі і для передавання показів на відстань.

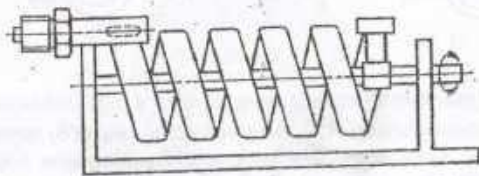


Рис.4.4.5. Схема багатовиткової трубчатої пружини

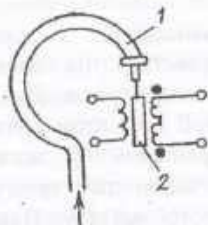


Рис.4.4.6. Схема безшкального приладу з диференційно-трансформаторним датчиком  
1-одновиткова трубчата пружина; 2-серцевина перетворювача

В них, як правило, використовують електричні системи теплопередачі. Максимальний тиск, вимірюваний манометрами такого типу, становить 15,6 МПа. На рис. 4.4.6 наведена схема безшкального манометра (вакуумметра, мановакуумметра) з диференційно-трансформаторним перетворювачем тиску в уніфікований вихідний сигнал перемінного струму. Тиск сприймається одновитковою трубчатою

пружиною 1, переміщення вільного кінця якої передається серцевині диференційно-трансформаторного перетворювача.

У приладах з відліковими пристроями тобто, в показуючих вільний кінець трубчатої пружини сполучений секторним передавальним механізмом з показуючою стрілкою.

Залежно від верхньої межі вимірювання застосовують трубчаті пружини різноманітної жорсткості.

#### § 4.4.2. Мембранні і сильфонні прилади

Прилади з чутливим елементом у вигляді гофрованих мембран, мембранних коробок і мембранних блоків застосовують для вимірювань невеликих надлишкових тисків і розріджень (манометри, мікроманометри і тягоміри), а також перепадів тисків (дифманометри). Величина прогинання мембрани – це складна функція діючого на неї тиску, її геометричних параметрів (діаметра, товщини, числа і форми гофрів), а також модуля пружності матеріалу мембрани. Число, форма і розміри залежать від призначення приладу, меж вимірювання та інших факторів. Гофрування мембрани збільшує її жорсткість, тобто, зменшує прогинання при однаковому тиску. Через складність розрахунку в більшості випадків характеристику мембрани підбирають досвідним шляхом.

Для збільшення прогинання в приладах малих тисків (розріджень) мембрани попарно з'єднують (зварюванням або пайкою) в мембранні коробки, а коробки – в мембранні блоки. Мембранні коробки можуть бути анероїдні (див. рис. 4.4.1, г) і манометричні (рис. 4.4.1, д) Анероїдні коробки застосовують у барометрах і герметизують їх, після чого заповнюють повітрям або іншим газом при малому тиску, як правило, 1,33 Па.

Деформація анероїдної коробки відбувається під дією різниці тиску навколишнього середовища і тиску в порожнині коробки. Оскільки тиск у порожнині коробки дуже малий, то можна вважати, що її деформація визначається атмосферним тиском. Деформація анероїдної або манометричної коробки рівна сумі деформацій мембран, що її складають. Пружинно-мембранні прилади (рис. 4.4.1,з) відрізняються тим, що мембрана, яка сприймає тиск, виконана з гнучкого матеріалу (гнучка мембрана), а тиск врівноважується циліндричною гвинтовою пружиною. Гнучкі мембрани, зазвичай, виготовляють із гуми на тканинній основі, тканини з газонепроникним просочуванням або особливих пластмас. Гнучкі мембрани застосовують у тягомірах і мікроманометрах, міноманометрах і дифманометрах. Неметалеві мембрани, як правило, оснащують жорстким центром.

До недоліків мембранних приладів належить невеликий хід рухомого центру чутливого елемента, значне відхилення жорсткості

мембрани від розрахункової і трудність у регулюванні жорсткості мембран. Ці недоліки мембранних чутливих елементів ліквідовуються в приладах, побудованих за схемою силової або пневматичної компенсації.

Чутливим елементом сифонних приладів є циліндрична тонкостінна посудина з кільцевими складками (гофрами), яка називається сифоном (рис. 4.4.7). Сифони виготовляють із латуні, берилієвої бронзи і корозостійкої сталі (зазвичай, марки 12Х18Н9Т). Під дією навантаження (зовнішнього або внутрішнього тиску) довжина сифона змінюється, збільшуючись чи зменшуючись залежно від прикладеної сили.

У межах робочого діапазону тисків деформація сифона приблизно пропорційна діючій силі, тобто, характеристика сифона близька до лінійної. В межах прямолінійної характеристики відношення діючої сили до викликаної нею деформації постійне і називається жорсткістю сифона.

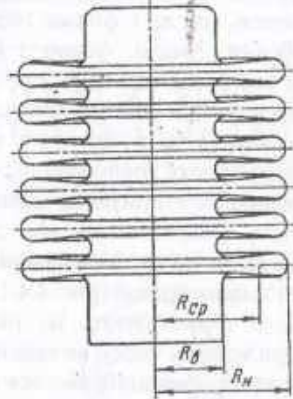


Рис.4.4.7. Сифонний чутливий елемент

Для переходу від характеристики навантаження до характеристики тиску вводять поняття "ефективна площа сифона"  $Se_{\text{сф}}$ .

Ефективну площу сифона визначають як відношення сили  $F$  до тиску  $P$ , тобто,  $Se_{\text{сф}} = F/P$ . Радіус ефективної площі, як показує досвід, зовсім близький до середнього радіуса сифона, тобто:

$$R_{\text{ср}} = (R + R_{\text{вн}})/2, \quad (4.4.6)$$

де  $Se_{\text{сф}} = \pi R_{\text{ср}}^2$ ;  $R$ ,  $R_{\text{вн}}$  – зовнішній і внутрішній радіус сифона.

Суттєвими недоліками сифонів є значний гістерезис і деяка нелінійність характеристики. Для збільшення жорсткості, зменшення впливу гістерезиса і нелінійності часто всередині сифона вміщують

гвинтову циліндричну пружину (див. рис. 4.4.1, к). В цьому випадку характеристика сифона змінюється, бо до жорсткості сифона додається жорсткість пружини. Жорсткість пружини, звичайно, в декілька разів перевищує жорсткість сифона, завдяки чому різко зменшується вплив гістерезису сифона і деякої нелінійності його характеристики. Розрахункові формули основних розмірів сифонів досить складні і не завжди підтверджуються досвідом. Зазвичай, діаметр сифонів у межах 10-80 мм; робочий хід 5-10 мм. Відносно великий хід сифонів дозволяє використовувати їх в самопишучих приладах.

На рис. 4.4.8 показано сифонний манометр (МС) із записом на циліндричній діафрагмовому папері. Вимірюваний тиск через штуцер приладу передається капіляром 2 в кожух 3 сифона. При цьому дно сифона 1 переміщується догори і його рух через штовхач 4, колінчастий важіль 5 і тягу 6 викликає поворот важеля 7 з пером для запису показів або стрілки, якщо прилад показуючий.

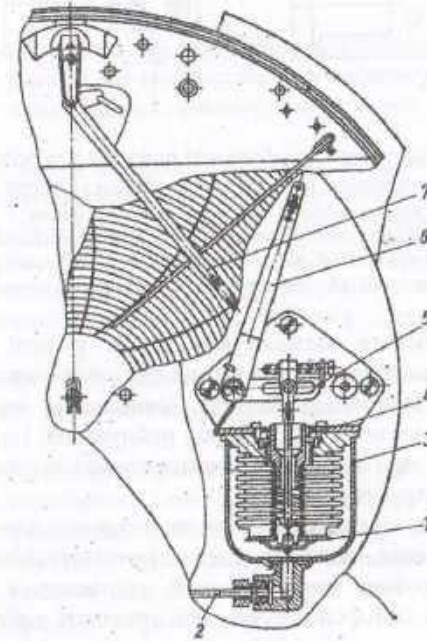
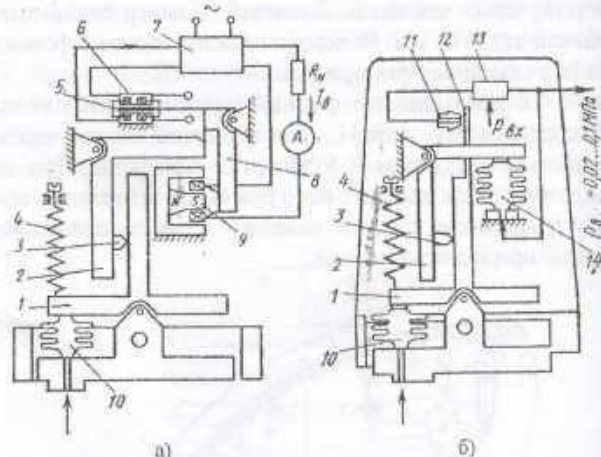


Рис.4.4.8. Сифонний манометр  
1-сифон; 2-капіляр; 3-кожух сифона; 4-штовхач;  
5-колінчастий рычаг; 6-тяги; 7-важіль з пером

Сильфонний манометр служить вторинним приладом у системах з пневматичним передаванням показів на відстань. Аналогічно виготовляють самопишучі вакуумметри і мановакуумметри.

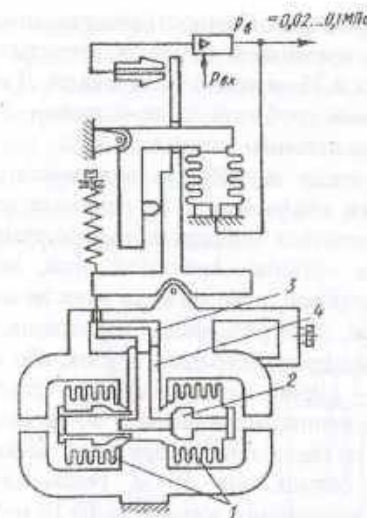
На рис. 4.4.9 показані принципові схеми сильфонних приладів з електричним і пневматичним перетворювачами. Принцип їх дії аналогічний приладам, що показані на рис. 4.4.4.



**Рис. 4.4.9.** Принципові схеми сильфонного приладу з передаванням показів на відстань з електричним (а) і пневматичним (б) перетворювачами  
1, 2 і 8 – важелі; 3 – рухома опора; 4 – пружина коректора нуля; 5 – пророгіць;  
6 – індикатор розбалансування; 7 – електронний підсилювач;  
9 – магнітоелектричний механізм; 10 – сильфонний чутливий елемент;  
11 – сопло; 12 – заслінка; 13 – підсилювач; 14 – сильфон зворотного зв'язку

Сильфонні прилади застосовують також у ролі диференційних манометрів. У дифманометрах, призначених для вимірювання перепаду тиску в високих статичних тисках, у випадку виникнення перенавантаження необхідний надійний захист сильфонів від руйнування. Перенавантаження можливе, наприклад, при порушенні герметичності корпусу приладу або при розриві одного із трубопроводів.

Для захисту від перенавантаження застосовують здвоєні сильфони (рис. 4.4.10), порожнини яких заповнені кремнійорганічною рідиною і сполучаються між собою каналом, який закривається клапаном при зростанні деформації сильфонів вище, ніж гранична робоча деформація. При односторонньому перенавантаженні клапан закривається і подальша деформація сильфонів стає неможливою, оскільки рідина, яка заповнює порожнини сильфонів, практично нестискувана. Для виводу штока 2 цієї його переміщенні слугує важіль 4, пропущений через упільнюваний металеву мембрану 3.



**Рис. 4.4.10.** Принципова схема сильфонного дифманометра зі здвоєними сильфонами та з пневматичним перетворювачем  
1-здвоєні сильфони; 2-шток; 3-мембрана; 4-важіль

Така конструкція вимірюваного блока забезпечує також захист від входу вимірюваного середовища в атмосферу при руйнуванні мембрани 3, що виконує важіль 4 виводу штока 2 із порожнини робочого тиску, що особливо важливо при вимірюванні тиску агресивних, токсичних і вибухонебезпечних середовищ. Перетворення перепаду тисків в дифманометрі в пневматичний сигнал аналогічне розглянутому вище.

#### 4.5. Основні відомості про вибір, встановлення і захист від агресивних середовищ приладів тиску

Різні умови вимірювання тиску, розрідження і специфічні умови встановлення їх у виробничих і науково-дослідних установах не дозволяють дати вичерпні рекомендації щодо вибору, встановлення та експлуатації приладів. Проте для всієї різноманітності випадків вимірювання можна вказати деякі загальні вимоги, виконання яких повинно забезпечити достовірність вимірювань у будь-яких умовах.

До початку вимірювань необхідно знати приблизну їх величину, характер вимірювання, межі коливань, фізико-хімічні властивості середовища, необхідну точність вимірів та інше. Знаючи ці умови, можна об'єктивно вибрати тип приладу.

Для забезпечення заданої точності вимірювання і достатньо довгого терміну використання пружинних приладів допустимий робочий тиск не повинен перевищувати 0,75 верхньої межі шкали. Для інших приладів (не пружинних) допустимий робочий тиск повинен бути по можливості ближчий до граничного значення шкали приладу.

Місце відбору тиску на об'єктах вимірювання необхідно обирати так, щоб на результати вимірювання не впливала динамічна дія потоку і завихрення, які утворюються поблизу місцевих опорів (колін, трійників, вентилів, регулюючих органів). Імпульсні лінії, які сполучають місце відбору тиску з манометрами, повинні мати ухил не менший, ніж 1:50 в бік місця відбору, якщо контролюване середовище – газ чи пара (виключаються рідинні корки) всередині трубок, або в сторону манометра, якщо середовище – рідина (виключаються газові корки). Довжина імпульсних ліній не повинна перевищувати 30 м, якщо вимірюваний тиск не більший, ніж  $9,8 \cdot 10^2$  Па, а при вимірюванні більш високих тисків висота має бути не більша, ніж 50 м. Рекомендується застосовувати з'єднувальні трубки з внутрішнім діаметром 10–12 мм, але не менше, ніж 8 мм. Перед пружинним манометром обов'язково встановлюють триходовий кран, за допомогою якого манометр плавно вводять у роботу, проводять перевірки нульової точки шкали і показів манометра в робочій точці (підключенням контрольного приладу), а також продувають імпульсні лінії.

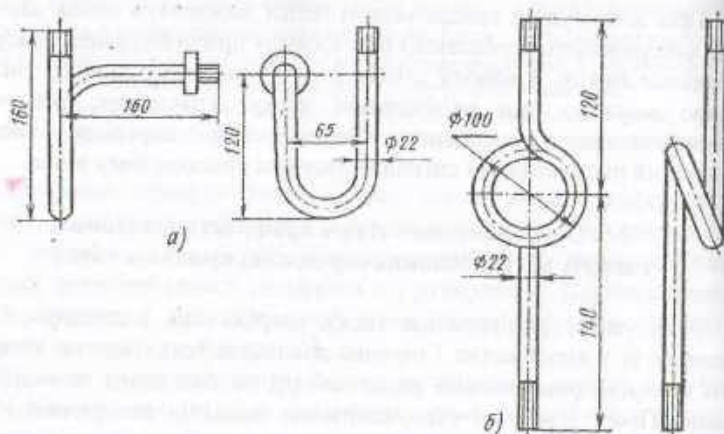


Рис. 4.5.1. Типи сифонних трубок

У хімічній промисловості манометри часто встановлюють на теплообмінниках, випарних, екстракційних і дистильційних апаратах, автоклавах, сушильних і т.п. В таких випадках необхідний захист

приймальної частини манометра (пружини, мембрани) від дії високої температури газу чи пари. Для цього перед манометром встановлюють, так само, сифонну трубку у вигляді букви U (рис. 4.5.1), (рис.4.5.1, а). При вимірюванні тиску нагрітого газу сифонну трубку заповнюють водою, якщо рідина, газ, пара або її конденсат хімічно активні щодо матеріалу приймальної частини приладу, то перед манометром встановлюють мембранний пристрій (рис. 4.5.1, а) або розділюючу посудину (рис. 4.5.2, б), заповнені інертною рідиною.

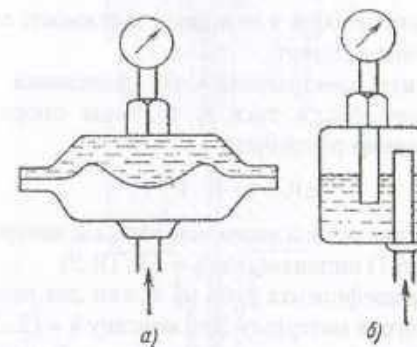


Рис. 4.5.2. Схема розділюючих пристроїв

Тиск контролюваного середовища передається манометру через розділюючу рідину або розділюючу мембрану. Розділююча рідина не повинна хімічно взаємодіяти із вимірюваним середовищем або мішуватися з ним, вона мусить бути нейтральна до матеріалу з'єднувальних трубок, розділюючих пристроїв і манометра. Залежно від властивостей вимірюваного середовища і умов експлуатації як розділюючі рідини застосовують воду, технічні мастила, гліцерин, водні розчини гліцерину, етиленгліколь, чотирихлористий вуглець, гас та ін. Для захисту від нагрівання манометр повинен бути або віддалений від апарата, або закритий екраном, що поглинає теплові промені.

#### 4.6. Електричні манометри і вакуумметри

Для приладів цієї групи базується на прямому або опосередкованому перетворенні тиску в електричний параметр, функційно зв'язаний з тиском.

Ці прилади застосовують, в основному, в лабораторних дослідженнях та для науково-дослідних вимірювань.

### § 4.6.1. Манометри опору

Дія приладів базується на вимірюванні електричного опору провідника під дією зовнішнього надлишкового тиску. Електричними провідниками принципово можуть служити будь-які метали і сплави, а також напівпровідники.

Проте для використання в манометрах опору, найкращим сплавом є манган, оскільки він має малий температурний коефіцієнт електричного опору.

Недолік мангану полягає в невеликій залежності електричного опору від тиску (малий  $\rho'$ зоекофіцієнт).

Якщо позначити електричний опір провідника, який підлягає дії тиску,  $R$ , зміну опору  $\Delta R$ , а тиск  $P$ , то зміна опору буде відповідати лінійному закону за таким рівнянням:

$$\Delta R = k \cdot R \cdot P, \quad (4.6.1)$$

де  $k$  –  $\rho'$ зоекофіцієнт величина якого залежить від матеріалу  $\text{см}^2/\text{Н}$ .

Із рівняння (4.6.1) випливає, що  $k = \Delta R / (R \cdot P)$

Значення  $\rho'$ зоекофіцієнта різні не тільки для різних матеріалів, але навіть для одного і того ж матеріалу. Для мангану  $k = (2 \dots 2,5) \cdot 10^7 \text{ см}^2/\text{Н}$ .

Мала величина  $\rho'$ зоекофіцієнта обумовлює доцільність застосування манганових манометрів тільки для вимірювання високих і надвисоких тисків. Одна з конструкцій манганового манометра показана на рис. 4.6.1. Приймальною частиною є одношарова шпилька 1 діаметром 8 мм із манганового дроту діаметром 0,05 мм, намотаного біфілярно. Опір котушки 150-200 Ом. Один кінець обмотки припаяний до гайки 2, другий – до мідного стрижня 3. Стрижень 3 проходить через канал у гайці 2. Центральне положення стрижня в каналі забезпечують ебонітові втулки 4 і 5. Ущільнення стрижня виконане із фібрових і гумових кілець 6, стиснуто гайкою 7. Гайка 2 вкручена в корпус 8, який оснащений ніпелем для приєднання до апарата або трубопроводу, в якому вимірюється тиск.

Для вимірювання опору можна використовувати будь-який вимірювач електричних опорів, наприклад, електронний врівноважений міст.  $\rho'$ зоекофіцієнт для різних зразків мангану непостійний, тому механічні манометри опору після виготовлення необхідно калібрувати.

За температурними даними лінійна залежність опору мангану від тиску перевірена до 3000 МПа. Точність вимірювань тиску мангановим манометром залежить, в основному, від точності вимірювання опору шпильки. Якість калібрування точності визначення калібрувальних тисків. Похибка вимірювання, звичайно, не перевищує  $\pm 1\%$  ліміту шкали. Окрім металевих датчиків, у манометрах опору застосовують напівпровідникові чутливі елементи, придатні для вимірювання тиску, не вищого ніж 7,84 МПа.

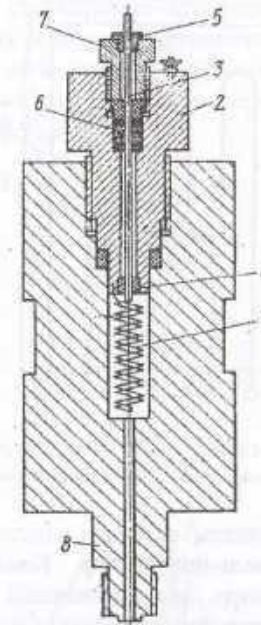


Рис. 4.6.1. Мангановий манометр опору

1-одношарова шпилька; 2-гайка; 3-мідний стрижень; 4,5-ебонітові втулки; 6-гумові кільця; 7-гайка; 8-корпус

На рис. 4.6.2 показаний інший чутливий елемент манометра опору – тензометричний перетворювач. Принцип його дії полягає в перетворенні деформації, або пропорційної йому деформації у зміну опору дроту, наклеєного на поверхню тіла, що деформується.

Тензор являє собою тонкий дріт 1 (діаметром 0,01-0,05 мм), наклеєний на ізоляторну основу 2 (папір чи пластмасу). Як матеріал для дроту, зазвичай, використовують такі сплави: мідно-хромозалізонікелеві та ін. До кінців дроту припаюють виводи. В такому вигляді датчик тензора наклеюють на поверхню деталі, що підлягає деформації.

При вимірюванні тиску зміна опору визначається за формулою (4.6.1), де  $k$  – коефіцієнт тензочутливості. Опір  $R$  чутливого елемента становить, як правило, 80-600 Ом при температурі 20 °С.

До переваг тензорів належать такі: лінійність характеристики  $R(P)$ , мала інерційність, можливість розміщення в труднодоступних місцях і достатньо мала похибка, яка не перевищує  $\pm 2\%$ . Недоліки – мала чутливість і залежність від температури.

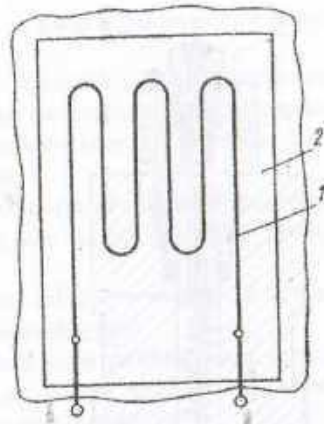


Рис. 4.6.2. Схема тензометричного перетворювача  
1-тонкий дріт; 2-ізоляційна основа

Вимірювальним приладом слугують мостові схеми, в одне плече яких ввімкнений вимірювальний тензор. Компенсаційний тензор не підлягає деформації і служить для компенсації температурних впливів середовища. Прилади, у яких є перетворювачі з наклеєними терморезисторами, мають невеликий клас точності, оскільки неможливо одержати безгістерезисне з'єднання, яке не має залишкових деформацій. Більш точними є прилади з напівпровідниковими тензорами, які мають атомний зв'язок на підкладці з пружним елементом (наприклад мембраною).

#### § 4.6.2. П'єзоелектричні манометри

Дія п'єзоелектричних манометрів базується на властивостях деяких кристалічних речовин створювати електричні розряди під дією механічної сили. Це явище називається п'єзо ефектом, характерне для кристалів кварцу, турмаліну, сегнетової солі, титану, барію і деяких інших речовин. Особливістю п'єзо ефекту є його безінертність. Заряди виникають миттєво в момент прикладання сили. Ця обставина робить п'єзоелектричні манометри незамінними при вимірюванні і дослідженні швидкоплинних процесів, зв'язаних зі змінами тиску (індикація швидкохідних двигунів, вивчення явища кавітації, вибухових реакцій).

Для виготовлення п'єзоелектричних датчиків найбільш широко застосовують кварц, який поєднує добрі п'єзоелектричні властивості з великою механічною міцністю, високими ізоляційними властивостями і незалежністю п'єзометричної характеристики в широких межах змін температур. Кварц  $\text{SiO}_2$  кристалізується в гексагональній системі.

Примому, елементарною структурною коміркою є шестигранна призма (рис. 4.6.3). В кристалах кварцу розрізняють поздовжню вісь Z, що називається оптичною, вісь xx, яка проходить через ребра призми (електрична вісь) і вісь yy, що проходить через середину протилежних граней (механічна або нейтральна вісь).

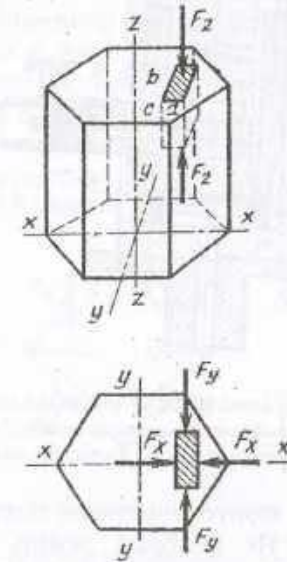


Рис. 4.6.3. Схема кристалу кварцу

Якщо з кристалу кварцу вирізати паралелепіпед так, щоб його грані були розташовані перпендикулярно до осей yy і xx, то він буде мати п'єзометричні властивості. Сили, прикладені до паралелепіпеда в напрямі осей yy, не викликають електризації, а розтягуюча або стискуюча сили  $F_x$ , прикладені в напрямку електричної осі, викликають появу різномісних зарядів на гранях, перпендикулярних до цієї осі (поздовжній п'єзо ефект).

Заряд, який виникає на гранях:  $qx = kF_x$  або  $qx = kP_x S_x$ , де  $P_x$  і  $F_x$  – тиск і сила, що діють на грань;  $S_x$  – площа грані;  $k$  – постійна величина, так званий, п'єзоелектричний модуль. При прикладанні сили  $F_y$ , що діє в напрямку нейтральної осі, на гранях вс виникнуть заряди протилежного знаку порівняно з силою, яка діє вздовж осі x.

П'єзометрична постійна кварцу практично не залежить від температури до  $500^\circ\text{C}$ . При температурі, вищій, ніж  $500^\circ\text{C}$  вона швидко змінюється і при температурі  $780^\circ\text{C}$  стає рівною нулю, тобто, кварц втрачає п'єзометричні властивості.



Корпус 1 датчика п'єзометричного манометра (рис. 4.6.4) закручений у гайку 2, оснащену ніпелем для з'єднання з об'єктом вимірювання.

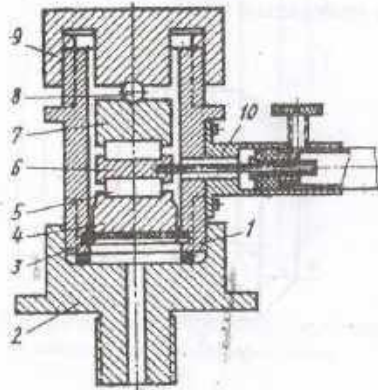


Рис. 4.6.4. Схема п'єзокварцового манометра  
1-корпус; 2-гайка; 3-мембрана; 4-металева шайба; 5-кварцова пластинка;  
6-плитка; 7-металева шайба; 8-сталеві кулька; 9-гайка

У нижній частині корпус герметично закритий мембраною 3, яка утворює дно корпусу. На мембрані лежить металеві шайба 4 з циліндричною витяжкою для кварцової пластини 5. На кварцовій пластині розміщена плитка 6, на ній – друга кварцова пластинка, покрита металевією шайбою 7. В центрі верхньої плоскості шайби 7 знаходиться сталеві кулька 8. Пакет із кварцових пластин і сталевих шайб притиснутих гайкою 9, утворюють накриття датчика. Кварцеві пластини розміщені так, щоб грані з від'ємним зарядом були повернуті до середньої плитки, а грані з додатним зарядом – до шайби 4 і 7. До середини плитки 6 припаяний провідник, що виходить з корпусу через отвір у стінці, через втулку 10 і бурштиновий ізолятор.

Електростатичні заряди, які виникають на гранях кристала зберігаються (при відсутності втрати) під час дії сили і зникають у момент припинення її дії. Оскільки заряди, які виникають дуже малі, то безпосереднє вимірювання їх неможливе. Для того, щоб використати такі прилади, в яких не витрачаються заряди, що виникають застосовують лампові вольтметри постійного струму на електрометричних лампах разом із шлейфовими чи катодними осцилографами, а також електростатичні вольтметри. П'єзокварцові манометри дозволяють вимірювати тиск до 100 МПа; похибка вимірювання  $\pm 1,5 - 2\%$ .

### § 4.6.3. Теплопровідні манометри

При низькому тиску, коли довжина вільного пробігу молекул співпадає з геометричними розмірами системи, теплопровідність газу залежить від тиску. Цю залежність використовують у теплопровідних манометрах, використовуваних для вимірювання тиску газу в межах від 0,0133 до 1333 Па. Манометр складається із нагрівача і вимірювача температури, уміщених в посудину, в якій контролюється тиск. В ролі вимірювачів температури застосовують терморезистори і термоелектричні термометри. На рис. 4.6.5 приведена схема теплопровідного манометра низького тиску з терморезистором, увімкненим в мостову схему. В дві частини включені терморезистори  $R_t$  і  $R_k$ , які нагріваються струмом, а також постійні резистори  $R_1$  і  $R_2$  плечей моста.

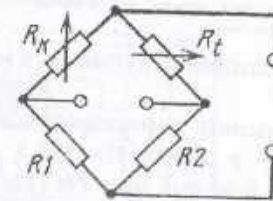


Рис. 4.6.5. Схема теплового манометра з терморезистором  
 $R_1, R_2$  – постійні резистори плечей моста;  $R_t$  – температурний компенсатор;  
 $R_k$  – резистор вимірювального середовища

Резистор  $R_t$  розміщений у вимірюваному середовищі; резистор  $R_k$ , який виконує роль температурного компенсатора, запаяний в балон. Із зміною тиску газу змінюється його теплопровідність, що приводить до зміни електричного опору  $R_t$  і, як наслідок, до розбалансування моста. В манометрах з термоелектричним термометром вимірюється не опір, а температура провідника. Температуру вимірюють термоелектричним термометром, термо-ЕРС якого є функцією вимірюваного тиску.

Манометр (рис. 4.6.6) складається із нагрівального елемента 1 і термоелектричного термометра 2, який вимірює його температуру.

Елемент нагрівається від джерела струму 3; термо-ЕРС термоелектричного термометра вимірюється мілівольтметром 4 або потенціометром. Елемент 1 нагрівається до температури 200°C. У деяких манометрах нагрівальний елемент і термоелектричний термометр конструктивно об'єднані в одному елементі.

Теплопровідні манометри градууються по певному газі, для якого вони призначені.

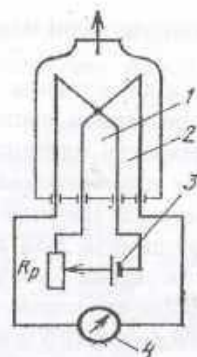


Рис. 4.6.6. Схема манометра з термоелектричним термометром  
1-нагрівальний елемент; 2-термоелектричний манометр;  
3-джерело струму; 4-мілівольметр

#### § 4.6.4. Йонізаційні вакууметри і манометри

Йонізаційний вакууметр з розжарюваним катодом призначений для вимірювання вакууму в межах від  $133,3$  до  $133,3 \cdot 10^{-5}$  МПа. Дія вакуумметра заснована на йонізації молекул газу потоком електронів, що випускається розжареним катодом або випромінювачем радіоактивних частинок. В першому випадку перетворювачем є триелектродна манометрична лампа, балон 1 якої з'єднаний з вимірюваним середовищем (рис.4.6.7).

У балоні розміщена вольфрамова нитка (катод) 2, сітка 3 і анод – колектор 4. Електрони, що виділяють із катода, притягуються додатньо зарядженим анодом. Залежно від тиску газу електрони на своєму шляху йонізують більше або менше число молекул.

Йони збираються колектором і створюють струм, сила  $I_k$  якого пропорційна силі анодного струму і тиску газу:

$$I_k = k \cdot I_a \cdot P, \quad (4.6.2)$$

де  $I_a$  – сила анодного струму;  $P$  – тиск газу;  $k$  – коефіцієнт пропорційності, який залежить від геометричних розмірів перетворювача і складу газу.

У другому випадку при невеликих вимірюваних тисках і невеликих розмірах радіоізотопних манометрів ефективно застосовувати  $\alpha$  – випромінювання, яке має найвищу йонізуючу здатність на 1 см довжини пробігу частинок. Принципова схема такого приладу показана на рис. 4.6.8.

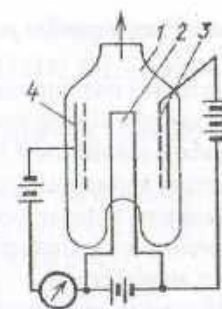


Рис. 4.6.7. Схема йонізаційного вакуумметра  
1-балон; 2-вольфрамовий катод; 3-сітка; 4-анод-колектор

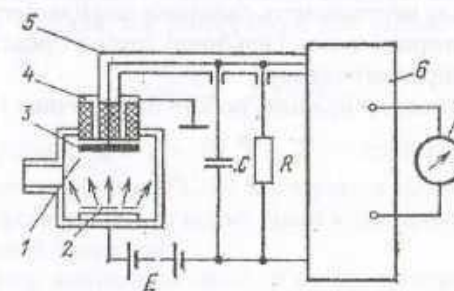


Рис. 4.6.8. Схема  $\alpha$ -йонізаційного манометра  
1 – йонізаційна камера; 2 – радіоактивний ізопом (випромінювач);  
3 – колектор іонів; 4 і 5 – екрани; 6 – розділювач; 7 – вимірювальний прилад

Якщо розміри йонізаційної камери значно менші, ніж довжина пробігу  $\alpha$ -частинок, то сила йонізаційного струму на від'ємно зарядженому колекторі буде лінійною функцією тиску:

$$I = k \cdot P, \quad (4.6.3)$$

де  $P$  – тиск, а  $k$  – постійна приладу.

Для ліквідації впливу зовнішніх впливів йонізаційні камери монтують в одному корпусі з першим каскадом електронного підсилювача. Такі манометри відрізняються малою інерційністю, великою переважувальною здатністю, відсутністю гістерезиса, легкістю передачі показів на відстань, та можливістю зміни діапазону вимірювань. Випромінювачами можуть слугувати ізопоми родію, торію, полонію, протактинію та ін.

## Питання до четвертого розділу.

1. Яка різниця між абсолютним і надлишковим тиском?
2. Чим відрізняється розрідження від абсолютного тиску?
3. Чим врівноважується вимірюваний тиск у рідинних манометрах?
4. Для чого використовують мікроманометри з нахиленою трубкою?
5. Чи можна виміряти кільцевим манометром тиск значної величини?
6. Які конструктивні елементи використовуються для врівноваження системи дзвоноподібних манометрів?
7. Якого типу бувають деформаційні прилади манометрів?
8. Як працює манометр з одновитковою трубчатого пружиною?
9. Як відбувається передача показів на відстань у пружинних манометрах?
10. З якого металу виготовляють сильфонні дифманометрів?
11. Для чого використовують сильфонні трубки і розділюючі пристрої в схемах вимірювання тиску?
12. На чому заснований принцип роботи електричних і п'єзометричних манометрів?

## Розділ 5

### ВИМІРЮВАННЯ КІЛЬКОСТІ І ВИТРАТ

#### 5. Основні поняття, одиниці вимірювання

Кількість речовини зазвичай виражають в одиницях об'єму або маси. Основною одиницею для об'єму в системі Сі прийнято кубічний метр ( $\text{м}^3$ ), основною одиницею маси – кілограм ( $\text{кг}$ ).

Кількість рідини з однаковою точністю можна вимірювати об'ємним і масовим методами, тому що густина рідини при певній температурі є величиною постійною для даної рідини. При переході від об'ємних одиниць до масових необхідно враховувати температуру вимірюваної рідини, тому що густина рідини залежить від температури.

Залежність густини від температури для рідини описується такою формулою:

$$\rho_t = \rho_{20} / [1 - \beta(t - 20)], \quad (5.1)$$

де  $\rho_{20}$  – густина рідини при  $t = 20^\circ\text{C}$ ;  $\beta$  – температурний коефіцієнт об'ємного розширення рідини  $1/^\circ\text{C}$ ;  $t$  – температура рідини.

Значення густини води та інших рідин в залежності від температури наведені в довідковій літературі.

Кількість газу вимірюють лише об'ємним методом. Для одержання порівняльних вимірювань необхідно об'єм газу привести до наступних умов: температура  $20^\circ\text{C}$  (293,13 К), тиск 101325 Па (760 мм.рт.ст.), відносна вологість,  $\gamma = 0$ . Для перерахунку використовують таку формулу:

$$V_H = V_0 \frac{P}{P_n} \frac{T_n}{TK}, \quad (5.2)$$

де  $V_0$  – об'єм газу при нормальних умовах;  $P$  – абсолютний тиск газу в робочому стані,  $P_n$  – тиск газу при нормальних умовах;  $T$  – абсолютна температура газу в робочому стані, К;  $T_n = 293,16$  К – абсолютна температура, яка відповідає стану газу при нормальних умовах;  $K$  – коефіцієнт, який враховує відхилення реального газу від ідеального, тобто коефіцієнт стиснення газу (при тиску меншому 0,49 МПа і температурі, вищій, ніж  $50^\circ\text{C}$ , коефіцієнт  $K$  практично дорівнює одиниці для всіх газів).

При переході від об'ємних одиниць до масових необхідно привести густину газу до нормальних умов за такою формулою:

$$\rho_n = \rho_p P_n TK / (P T_n), \quad (5.3)$$

де  $\rho_p$  – густина сухого газу в робочому стані при даних значеннях  $P$  і  $T$ .

Густина газової суміші при нормальних умовах визначають, виходячи із її складу, за такою формулою:

$$\rho_n = \frac{v_1 \rho_{H1} + v_2 \rho_{H2} + \dots + v_n \rho_{Hn}}{100}, \quad (5.4)$$

де  $v_1, v_2, \dots, v_n$  – об'ємний вміст компонентів у газовій суміші, %;  $\rho_{H1}, \rho_{H2}, \dots, \rho_{Hn}$  – густина окремих компонентів, які входять до газової суміші, при нормальних умовах.

Коефіцієнт стиснення  $K$  дорівнює відношенню густини  $\rho_n$  підрахованої за законами ідеальних газів, до дійсної густини газу в робочому стані при даних  $P$  і  $T$ . Значення коефіцієнта  $K$  для найбільш широко застосовуваних газів можна визначити за допомогою експериментальних графіків.

Для газових сумішей коефіцієнт стиснення  $K_{cm}$  визначається за експериментальними даними або розраховується за такою формулою:

$$K_{cm} = \frac{v_1 K_1 + v_2 K_2 + \dots + v_n K_n}{100}, \quad (5.5)$$

де  $K_1, K_2, \dots, K_n$  – коефіцієнт стиснення окремих компонентів, які входять до газової суміші;  $v_1, v_2, \dots, v_n$  – об'ємний вміст компонентів у газовій суміші, %.

При відсутності експериментальних даних коефіцієнт  $K$  визначають приблизно на основі закону ідеального стану.

На густину газу суттєво впливає вміст вологи. Густина вологого газу в робочому стані визначають за формулою:

$$\rho_{gr} = \rho_{cr} + \rho_{vap} + \varphi \rho_{sat} \quad (5.6)$$

де

$$\rho_{cr} = \rho_n \frac{(\rho - \varphi \rho_{sat}) T_H}{T P_H K} \quad (5.7)$$

$\rho_{gr}$  – густина вологого газу при тиску  $P$  і температурі  $T$ ;  $\rho_{cr}$  – густина сухого газу у вологому стані при температурі  $T$  і нормальному тиску сухого газу  $P - \varphi P_{sat}$ ;  $\rho_{sat}$  – густина парів у газі при його парціальному тиску  $\varphi P_{sat}$ ;  $\varphi$  – відносна вологість, тобто відношення маси водяної пари в  $1 \text{ м}^3$  вологого газу до максимально можливої його маси при тій же температурі і тиску;  $\rho_{sat}$  – густина насиченої водяної пари при температурі  $t$ ;  $P_{sat}$  – тиск насиченої пари при температурі  $t$ . Решта позначень відповідно прийнятим вище. Значення параметрів, що входять у приведені формули беруть із відповідної довідкової літератури.

Прилади, які вимірюють кількість речовини, називаються лічильниками. Лічильники вимірюють об'єм речовини, який протікає

через них за будь-який проміжок часу: секунда, година, доба, місяць тощо. Кількість речовини при цьому визначають як різницю показів лічильника. Лічильники, як правило, є приладами прямого вимірювання, і відлік за їх шкалою дає вимірювану величину без додаткових обчислень. Рухомі механізми лічильника з'єднуються із лічильним механізмом.

Витратами речовини називається кількість речовини, яка проходить через переріз за одиницю часу. Масові витрати вимірюють у грамах за секунду (г/с), а об'ємні – в кубічних метрах за секунду (м<sup>3</sup>/с). Прилади, що вимірюють витрати, називаються витратомірами. Ці прилади можуть бути оснащені лічильниками (інтеграторами), тоді їх називають витратомірами із лічильником. Такі витратоміри дозволяють вимірювати одночасно витрати і кількість.

Залежно від способу вимірювання найбільше розповсюдження мають такі витратоміри:

перемінного перепаду тиску, базуються на залежності від витрат перепаду тисків у звужувальному пристрої внаслідок часткового переходу потенційної енергії потоку в кінетичну;

швидкісного напору дають вимірювання витрат динамічного потоку за допомогою пневматичних трубок;

перемінного рівня, заснованих на залежності від витрат висоти рівня рідини в посудині при вільному витіканні її через отвір у дні, або позовній стінці посудини;

постійного перепаду тиску, базуються на залежності від витрат речовини вертикального переміщення тіла (поплавка), який змінює при цьому площу перерізу прохідного отвору приладу так, щоб перепад тиску з обох боків поплавка залишався постійним;

безконтактні.

## 5.1. Вимірювачі кількості рідини і газу

Лічильники для вимірювання кількості рідини за принципом дії поділяються на об'ємні, вагові та швидкісні. Переважне застосування знайшли об'ємні і вагові лічильники. Для вимірювання кількості газу використовують об'ємний метод.

### § 5.1.1. Об'ємні лічильники для рідини

Принцип дії об'ємних лічильників заснований на вимірюванні об'єму рідини, що витісняється із вимірювальної камери під дією різниці тиску і долаванні результатів цих вимірів. Об'ємні лічильники, в першу чергу, призначені для вимірювання кількості чистих рідин без незначних домішок (бензину, масел, конденсату тощо). Основна перевага