

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки
Кафедра метрології та інформаційно-вимірювальної техніки

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи
магістра

на тему: **Розробка метрологічного забезпечення калібрувальної
лабораторії засобів вимірювання тиску**

Виконав: студент 2 курсу, групи МТ-1м
Спеціальності: 152 «Метрологія та
інформаційно-вимірювальна техніка»

Хомик І.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник: завідувач кафедри М та ІВТ
доктор технічних наук, професор

Подчашинський Ю.О.

(науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище та ініціали)

Рецензент: кандидат технічних наук, доцент
Шавурський Ю.О.

(науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки
Кафедра метрології та інформаційно-виміральної техніки

Спеціальність 152 «Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри метрології та
інформаційно-виміральної техніки
д.т.н., професор Подчашинський Ю.О.

« _____ » _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу магістра

Студент _____ Хомик Ігор Анатолійович _____

1. Тема роботи: Розробка метрологічного забезпечення калібрувальної лабораторії засобів вимірювання тиску

Керівник роботи: завідувач кафедри М та ІВТ доктор технічних наук, професор
Подчашинський Ю.О.

затверджена наказом по університету від « 09 » листопада 2023 р. № 648/с

2. Термін здачі закінченої роботи на кафедру « 17 » грудня 2023р.

3. Вихідні дані до роботи: визначення та аналіз поточного стану методологічного забезпечення випробувального центру та калібрувальної лабораторії; розробка алгоритмічно-програмного забезпечення, що реалізує методики випробування та калібрування засобів вимірювання тиску

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які підлягають розробці)

огляд та аналіз методів вимірювання тиску, метрологічне забезпечення калібрувальної лабораторії, методика калібрування засобів вимірювання тиску

5. Перелік графічного матеріалу :

Протоколи проведення калібрування засобів вимірювання тиску

6. Консультанти кваліфікаційної роботи магістра із зазначенням розділів роботи, що їх стосуються

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1-3	Подчашинський Ю.О.		
1-3	Чепюк Л. О.		

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд та аналіз джерел інформації	01.10.23 – 05.10.23	Виконано
2	Формулювання завдань кваліф. роботи	06.10.23 – 10.10.23	Виконано
3	Аналітичний огляд методів і засобів вимірювання тиску	25.10.23 – 09.11.23	Виконано
4	Забезпечення єдності вимірювання тиску	11.10.23 – 15.10.23	Виконано
5	Вибір технічних засобів калібрувальної лабораторії	16.10.23 – 24.10.22	Виконано
6	Розробка алгоритму проведенні калібрування	10.11.23 – 22.11.23	Виконано
7	Розробка протоколу калібрування	23.11.23 – 03.12.23	Виконано
8.	Проведення експериментальних досліджень	04.12.23 – 10.12.23	Виконано
9	Оформлення пояснювальної записки та презентаційного матеріалу	11.12.23 – 17.12.23	Виконано

Студент

(підпис)

Керівник роботи

(підпис)

Хомик І.А

(прізвище та ініціали)

Подчашинський Ю.О.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

В даній кваліфікаційній роботі розроблено метрологічне забезпечення калібрувальної лабораторії засобів вимірювання тиску.

Метою даної роботи є розробка алгоритмічно-програмного забезпечення, що реалізує створення методологічної та нормативної документації для роботи випробувальних центрів та калібрувальних лабораторій.

В процесі роботи було розроблено алгоритми оцінювання збіжності та відтворюваності результатів випробування для оцінювання якості роботи лабораторії та методика калібрування засобів вимірювання тиску. Нова наукова ідея, що реалізується в роботі, полягає в аналізуванні критеріїв для оцінювання збіжності та відтворюваності, та вибір для роботи лабораторії найбільш оптимальних та чутливих методів з метою відслідковування відхилень в роботі лабораторії, еталонного обладнання, помилок операторів при проведенні випробувань та розробці нових алгоритмічно програмних комплексів для реалізації методології оцінювання правильності роботи лабораторій. Одержані теоретичні і практичні результати роботи впроваджені в випробувальному центрі та калібрувальній лабораторії КЛ ТОВ "Тестметрстандарт" і використовуються в повсякденній роботі випробувального центру в якості робочих документів.

Ключові слова: засоби вимірювання тиску, оцінка невизначеності, методика калібрування, еталонні засоби вимірювання.

ABSTRACT

In this qualification work, the metrological support of the calibration laboratory of pressure measurement tools was developed.

The purpose of this work is the development of algorithmic software that implements the creation of methodological and normative documentation for the work of test centers and calibration laboratories.

In the course of the work, algorithms for assessing the convergence and reproducibility of test results were developed to assess the quality of the laboratory's work and a method for calibrating pressure measuring devices. The new scientific idea implemented in the work consists in the analysis of criteria for assessing convergence and reproducibility, and the selection of the most optimal and sensitive methods for the work of the laboratory with the aim of tracking deviations in the work of the laboratory, reference equipment, operator errors during tests and the development of new algorithmic software complexes for the implementation of the methodology for assessing the correctness of laboratory work. The obtained theoretical and practical results of the work are implemented in the test center and calibration laboratory of KL LLC "Testmetrstandart" and are used in the daily work of the test center as working documents.

Keywords: measurement instrument of pressure, evaluation of uncertainty, technique of calibration, reference measurement instrument.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ	9
1.1. Загальні відомості про тиск	9
1.2. Надлишковий і вакуумметричний тиск	11
1.3. Рідинні і мембранні прилади	13
1.4. Пружні манометри	17
1.5. Самописні манометри.....	21
1.6. Сигналізатори тиску	22
1.7. Електричні вакуумметри	24
1.8. Тензорезистивні перетворювачі тиску	27
1.9. Ємнісні перетворювачі тиску	31
1.10. Електричні прилади для вимірювання тиску	33
1.11. Забезпечення єдності вимірювання тиску	35
1.1.11. Деформаційні манометри як робочі еталони вимірювання тиску	35
1.11.2. Вантажопоршневі еталонні засоби вимірювання тиску	37
2. МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КАЛІБРУВАЛЬНОЇ ЛАБОРАТОРІЇ	45
2.1. Законодавчі вимоги до діяльності системи технічного регулювання.....	45
2.2. Акредитація випробувальних лабораторій	46
2.3. Оцінювання невизначеності при калібруванні	49
2.3.1. Загальні правила для оцінки та вираження невизначеності вимірювань	49
2.3.2. Величини, невизначеність яких оцінюється при калібруванні, та впливні величини. Модельне рівняння	50
2.3.3. Розрахунок невизначеності при калібруванні засобів вимірювань	52
2.3.4. Опосередковане відтворення декількома еталонними	

мірами величини, яка вимірюється ЗВ, що калібрується	56
3. МЕТОДИКА КАЛІБРУВАННЯ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ	59
3.1. Сфера призначення	59
3.2. Засоби калібрування	59
3.3. Умови проведення калібрування	61
3.4. Вимоги безпеки при проведенні калібрування	61
3.5. Підготовка до калібрування	62
3.6. Опис процедури калібрування	64
3.6.1. Опис процедури калібрування манометрів та вакуумметрів	65
3.6.2. Оцінювання невизначеності вимірювання під час калібрування манометрів та вакуумметрів. Модельне рівняння ...	66
3.7. Опис процедури калібрування барометрів	68
3.8. Приклад виконання калібрування	72
3.8.1. Манометр електроконтактний ЕКМ-1У 0...1 кгс/см ²	72
3.8.2. Мановакуумметр показуючий МВПЗ-У	73
ВИСНОВКИ	77
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	78
ДОДАТКИ	81

ВСТУП

Актуальність теми. Однією зі складових системи технічного регулювання є метрологічна система України, яка забезпечує єдність вимірювань у державі і створює умови для захисту громадян і національної економіки від наслідків недостовірних результатів вимірювань. Нормативно-правова база метрологічної системи чинний Закон України „Про метрологію та метрологічну діяльність”. Метрологічним наглядом є діяльність, яка провадиться у сфері законодавчо регульованої метрології з метою перевірки додержання суб'єктами господарювання вимог цього Закону, технічних регламентів та інших нормативно-правових актів у сфері метрології та метрологічної діяльності.

Метою даної роботи є розробка алгоритмічно-програмного забезпечення, що реалізують створення методологічної та нормативної документації для роботи випробувальних центрів та калібрувальних лабораторій.

В процесі роботи було розроблено

- алгоритми оцінювання збіжності та відтворюваності результатів випробування для оцінювання якості роботи лабораторії.
- методика калібрування засобів вимірювання тиску.

Об'єктом дослідження є методологічна база для проведення випробування засобів вимірювальної техніки .

Предметом дослідження є нормативна база, що використовуються у роботі випробувального центру та калібрувальної лабораторії.

Методи дослідження – загальнонаукові: аналіз, синтез, узагальнення, порівняння, систематизація, індукція, дедукція; історичні: історико-структурний (членування досліджуваних феноменів минулого), конструктивно-генетичний (спостереження за зміною феномена у просторі і часі, встановлення його науково обґрунтованої періодизації), історико-компаративістський (визначення регресу і прогресу різних явищ минулого); статистичні.

Нова наукова ідея, що реалізується в роботі, полягає в аналізуванні критеріїв для оцінювання збіжності та відтворюваності, та вибір для роботи лабораторії найбільш оптимальних та чутливих методів з метою відслідковування відхилень в роботі лабораторії, еталонного обладнання, помилок операторів при проведенні випробувань. Розробка нових алгоритмічно програмних комплексів для реалізації методології оцінювання правильності роботи лабораторій.

Одержані теоретичні і практичні результати роботи впроваджені в випробувальному центрі та калібрувальній лабораторії КЛ ТОВ "Тестметрстандарт" і використовуються в повсякденній роботі випробувального центру в якості робочих документів.

Галуззю використання результатів кваліфікаційної роботи, представлених в виді програмних розробок, є лабораторії, що потребують в своїй діяльності проводити періодичну перевірку правильності результатів роботи. Отримані результати є важливим для підвищення якості продукції та послуг, параметри якої контролюються на основі процедур вимірювань фізичних величин, автоматизації вимірювальних процедур та створення швидкодіючих прецизійних засобів вимірювання фізичних величин, що можуть бути використані в промисловості, транспорті та для контролю екологічних параметрів довкілля.

Структура та обсяг роботи. Дана робота складається з анотації, вступу, 3 основних розділів, висновків, переліку використаних літературних джерел та додатку. Робота викладена на 80 сторінках основного тексту і містить 29 рисунків та 5 таблиць.

1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ

1.1. Загальні відомості про тиск

Тиск – це скалярна величина, що характеризує напружений стан суцільного середовища.

Середнє значення тиску рідини або газу на будь-яку площину чисельно дорівнює відношенню нормальної сили P до площі ω , на яку діє ця сила [3]:

$$p = P/\omega . \quad (1.1)$$

Гідростатичний тиск в точці чисельно дорівнює взятій з протилежним знаком величині нормального напруження на довільно орієнтованій у даній точці площини і може бути виражений через ліміт:

$$p = \lim_{\Delta\omega \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta P}{\Delta\omega} \right) . \quad (1.2)$$

Гідростатичний тиск в рідинах і газах має такі властивості:

- 1) тиск на будь-яку поверхню діє перпендикулярно до неї та завжди є напруженням стиску (у рідинах і газах у стані спокою не виникають нормальні напруження розтягу);
- 2) значення тиску в даній точці залежить лише від координат точки і є однаковим в усіх напрямках.

При рівновазі рідини, коли на неї з масових сил діє тільки сила земного тяжіння, справедлива рівність, яку називають *основним рівнянням гідростатики* [3]:

$$\left(z + \frac{p}{\rho g} \right) = \text{const} , \quad (1.3)$$

де z – геометрична висота точки, тобто її висота над довільною горизонтальною площиною порівняння $O-O$; p – гідростатичний тиск у точці; ρ – питома маса (густина) рідини чи газу; g – прискорення вільного падіння, $g=9,81 \text{ м/с}^2$.

При практичному застосуванні основне рівняння гідростатики частіше записують у вигляді

$$p = p_0 + \rho gh, \quad (1.4)$$

де p_0 , p – тиск відповідно на вільній поверхні рідини та на глибині h .

Таким чином, тиск на будь-якій глибині дорівнює сумі тиску на вільній поверхні p_0 та вагового тиску p_h (тиску відповідного стовпа рідини висотою h):

$$p_h = \rho gh = \gamma h, \quad (1.5)$$

де $\gamma = \rho \cdot g$ – питома вага рідини, Н/м³.

В системі СІ одиницею вимірювання тиску є 1 Па (паскаль) – це тиск, який створює сила 1 Н, рівномірно розподілена по поверхні площею 1 м²:

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2 = 1 \text{ кг/(м} \cdot \text{с}^2\text{)}.$$

Паскаль – дуже мала величина для вимірювання тиску; на практиці частіше тиск виражають у кратних одиницях: гектопаскалях (1 гПа=100 Па), кілопаскалях (1 кПа=1000 Па), мегапаскалях (1 МПа=10⁶ Па) і гігапаскалях (1 ГПа=10⁹ Па) [3].

З позасистемних одиниць вимірювання тиску найбільш поширеними є:

- 1) *атмосфера технічна* (ат) або *кілограм сили на квадратний сантиметр* (кгс/см²): **1 ат=1кгс/см² = 98100 Па**;
- 2) *атмосфера фізична* (**1 атм = 101 325 Па**) – це нормальний атмосферний тиск на рівні Світового океану;
- 3) *метр водяного стовпа* (**1 м. вод. ст. = 9810 Па**);
- 4) *міліметр ртутного стовпа* (**1 мм. рт. ст. $\approx$ 133 Па**);
- 5) *бар* (**1 бар = 100 000 Па**);
- 6) *фунт сили на квадратний дюйм* (**1 lb/sq.in = 0,4536 кгс / (2,54 см)² = 0,070 кгс/см²**).

На практиці часто користуються співвідношенням між технічною атмосферою та метрами водяного стовпа: **1 кгс/см² = 10 м. вод. ст.**

Величину кров'яного тиску в медицині досі визначають в позасистемній одиниці 1 Тор (*торрічеллі*), де 1 Тор = 1 мм. рт. ст. $\approx$ 133 Па.

Для будь-якої рідини перехід від значення тиску до висоти відповідного стовпа рідини (до напору h) і навпаки здійснюється за формулою (1.5) [3].

1.2. Надлишковий і вакуумметричний тиск

Розрізняють абсолютний, надлишковий та вакуумметричний тиск. Абсолютний (повний або термодинамічний) тиск $p_{абс}$ відраховується від абсолютного нуля тиску, що відповідає *повному (абсолютному) вакууму*.

Надлишковим (манометричним) тиском p_n називають різницю між абсолютним та атмосферним тиском в даній точці:

$$p_n = p_{абс} - p_a, \quad (1.6)$$

де p_a – атмосферний тиск [3].

У нижній частині атмосфери Землі – *тропосфері* – температура, густина та тиск повітря змінюються в досить широких межах залежно від географічної широти місцевості, пори року і часу доби, метеорологічних умов (наявності циклону чи антициклону). Для єдиного уявлення про характеристики атмосфери і для здійснення практичних розрахунків прийнята так звана *стандартна атмосфера* – умовний розподіл густини, тиску і температури в сухому, чистому повітрі залежно від висоти над рівнем моря. Стандартна атмосфера базується на багаторічних статистичних даних і містить середні значення фізичних параметрів повітря. Стандартна атмосфера встановлює середні значення параметрів атмосфери для широти $45,5^\circ$, що відповідають середньому рівню сонячної активності. Початкові параметри повітря згідно зі стандартною атмосферою на рівні моря ($H=0$) прийнято такими: температура $T_0=288$ К ($t_0=15$ °С), тиск $p_0=101325$ Па (760 мм.рт.ст.), густина $\rho_0=1,225$ кг/м³. Зі збільшенням висоти місцевості над рівнем моря атмосферний тиск зменшується за законом, близьким до експоненційного (табл. 1.1). При незначних висотах (до 500 м) можна користуватися правилом, що зі збільшенням висоти на 1 метр атмосферний тиск стає меншим приблизно на 12 Па [3].

Таблиця 1.1

Залежність тиску стандартної атмосфери від висоти над рівнем моря

Висота H , м	0	100	200	500	1000	2000	3000
Тиск p_a , Па	101325	100129	98945	95461	89876	79501	70121
Тиск p_a , м. вод. ст.	10,33	10,21	10,09	9,73	9,16	8,10	7,15

Вакуумметричним тиском $p_{\text{вак}}$ називають різницю між атмосферним та абсолютним тиском у даній точці:

$$p_{\text{вак}} = p_a - p_{\text{абс}}. \quad (1.7)$$

На рис. 1.1 зображена схема до пояснення понять абсолютного, надлишкового і вакуумметричного тиску. Оскільки з формул (1.6) і (1.7) випливає, що $p_{\text{вак}} = -p_n$, вакуумметричний тиск називають ще від'ємним надлишковим тиском.

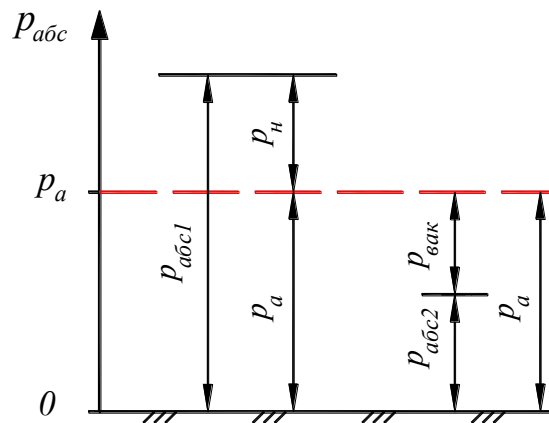


Рис. 1.1. Схема до пояснення понять абсолютного, надлишкового і вакуумметричного тиску

З визначення вакуумметричного тиску випливає також, що він не може бути як завгодно великий (на відміну від надлишкового тиску). Максимальне значення вакуумметричного тиску відповідає нульовому значенню абсолютного тиску $p_{абс}=0$. Тоді теоретично досяжний вакуумметричний тиск чисельно дорівнює атмосферному тиску

$$(p_{\text{вак}})_{\text{max}} = p_a \cdot \quad (1.8)$$

На практиці найчастіше мають справу з так званим низьким вакуумом, коли абсолютний тиск більший за 1 мм. рт. ст.

1.2. Класифікація приладів для вимірювання тиску та вимоги до них

Сучасна наука і техніка ставлять найрізноманітніші вимоги до приладів для вимірювання тиску. Насамперед, це пов'язано з широким діапазоном вимірюваних величин тиску: від міліпаскаля (мПа) до гігапаскаля (ГПа). Зростають вимоги до точності вимірів, ускладнюються об'єкти досліджень, що накладає додаткові умови на конструкційне оформлення приладів. Так, наприклад, прилади, які використовують для вимірювання сталих тисків, виявляються непридатними при вимірюванні пульсацій тиску, причому в реальних процесах зустрічаються пульсації тиску з частотою до 10^6 Гц [3].

Розмаїття вимог обумовило велику кількість приладів для вимірювання тиску, різних як за принципом дії, так і за точністю вимірювань і конструктивним оформленням.

Умовно всі прилади для вимірювання тиску можна класифікувати за [3]:

а) видом вимірюваної величини;

б) принципом дії;

в) класом точності.

Класифікація за видом вимірюваної величини:

а) барометри – прилади для вимірювання атмосферного тиску;

б) манометри і п'єзометри – прилади для вимірювання надлишкового тиску p_n ;

в) **вакуумметри** – прилади для вимірювання вакуумметричного тиску $p_{\text{вак}}$ (від’ємного надлишкового тиску);

г) **мановакуумметри** – прилади, за допомогою яких вимірюють як надлишковий тиск, так і вакуумметричний;

д) **диференційні манометри** – прилади для вимірювання різниці тисків у двох точках.

Для вимірювання абсолютного тиску більшого за атмосферний використовують два прилади – барометр і манометр, а менше атмосферного – барометр і вакуумметр.

Класифікація за принципом дії:

1. **Рідинні прилади**, які мають гідростатичний принцип дії. У них вимірюваний тиск зрівноважується тиском стовпа рідини, висота якого визначається або безпосередньо, або шляхом розрахунку. Ідея вимірювання тиску за величиною стовпа рідини належить італійському вченому Торрічеллі (1640 р.), а вперше здійснена італійським механіком Вівіані в 1642 р. і французьким ученим Паскалем у 1646 р. Рідинні прилади не втратили свого значення і сьогодні, вони не складні у виготовленні, точні та надійні.

2. **Механічні прилади**, принцип дії яких полягає в тому, що під дією тиску відбувається деформація деякого пружного елемента, – величина цієї деформації і є мірою вимірюваного тиску.

3. **Вантажно-поршневі прилади** – це манометри, в яких вимірюваний тиск, діючи на одну сторону поршня, зрівноважується зовнішньою силою, прикладеною з його протилежного боку. В якості рівноважної сили використовують тягарці. Вага тягарця, поділена на площу поршня, визначає величину вимірюваного тиску. Це, як правило, стаціонарні високоточні еталонні прилади.

4. **Електричні прилади**, принцип дії яких базується на зміні електричних властивостей деяких матеріалів чи на зміні будь-яких електричних параметрів під дією тиску.

5. **Комбіновані прилади**, принцип дії яких носить змішаний характер (пружинно-електричні, рідинно-електричні та ін.).

Класифікація за класом точності

За точністю показів усі прилади, що серійно випускаються, поділяються на класи.

Класом точності називається найбільша допустима приведена похибка, виражена у відсотках від діапазону вимірювання даного приладу:

$$K_T = (\Delta_{\max} / D) \cdot 100\%, \quad (1.9)$$

де $\Delta_{\max}$ – максимально допустима абсолютна похибка вимірювання приладу; D – діапазон вимірювання.

Установлені класи точності приладів для вимірювання тиску відповідають наступному ряду: 0,005; 0,02; 0,05; 0,1; 0,16; 0,25; 0,4; 0,6; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. Механічні прилади поділяють на *технічні*, *зразкові* та *еталонні*. Зразкові прилади звіряються з еталонними, а також використовують для перевірки технічних. Технічні прилади використовуються безпосередньо для вимірювання тиску. Еталонними є прилади з класом точності $K_T < 0,16$; до зразкових відносяться прилади з $K_T = 0,16 \dots 0,6$; технічні прилади для вимірювання тиску мають $K_T > 0,6$ [3].

Наприклад, для приладу, який має клас точності $K_T = 1,5$ допустима похибка вимірювання становить $\pm 1,5\%$ від діапазону вимірювання.

1.3. Рідинні і мембранні прилади

Рідинні трубчасті прилади знайшли широке застосування в лабораторних і місцевих технічних вимірюваннях тиску, розрідження і різниці тисків [4].

Принцип дії таких приладів заснований на основному рівнянні гідростатики – законі Паскаля. Цей принцип знайшов широке застосування в техніці при вимірюванні тиску і різниці тисків (перепаду тисків). Закон Паскаля дозволяє зробити важливий висновок: рівні рідин у сполучених

посудинах при однакових тисках в обох колінах лежать в одній горизонтальній поверхні, тобто якщо $P_1 = P_2$, то $H_1 = H_2$.

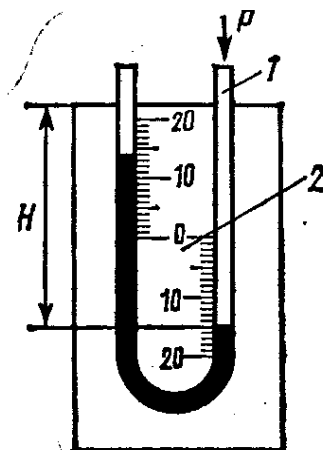


Рис. 1.2. Манометр U-подібний; 1- трубка; 2 шкала

Найбільш поширеним приладом є U-подібний манометр (рис. 1.2), в якому в якості робочої рідини використовуються вода, ртуть, олія або спирт. Похибка таких манометрів складає ± 2 мм стовпа робочої рідини і не залежить від діаметра трубок. Прилад має U-подібну скляну трубку і шкалу з рівномірними поділками. Ціна найменшої поділки шкали складає 1 мм. Робоча рідина заповнюється до нульової відмітки шкали. Принцип дії U-подібних манометрів заснований на законі сполучених посудин. Якщо вигнуту і відкриту з обох кінців U-подібну порожню трубку залити рідиною, то рівні рідини в обох посудинах будуть однаковими. Під дією вимірювального тиску, підключеного до одного з кінців приладу, утвориться різниця рівнів рідини, по якій визначається значення вимірювального тиску. U-подібний манометр може вимірювати різницю вимірювального і атмосферного тисків, а також різницю двох підведених вимірювальних тисків. У першому випадку одна з трубок відкрита і сполучається з атмосферою, в другому - вимірювальні тиски підводяться до обох трубок. Для вимірювання малих тисків і розріджень застосовують рідинні прилади ТНЖ і ММН. Для вимірювання тиску, розрідження і різниці тисків випускають стрілочні прилади – вимірювач

натиску, тягоміри і тяго вимірювач натиску НМ-П1, ТМ-П1, ТНМ-П1, які встановлюють на щитах, а також можуть використовувати як місцеві прилади.

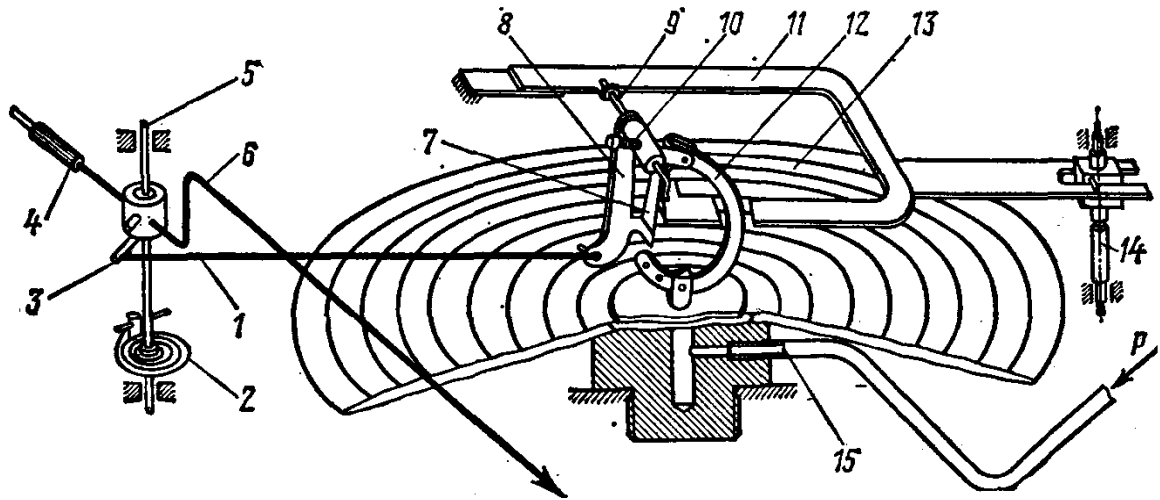


Рис. 1.3 Вимірювач натиску НМ-П:

Чутливим елементом вимірювача натиску (рис. 1.3) є мембранна коробка 13, що складається з двох спаяних між собою мембран. Вимірювальний тиск підводиться до штуцера 15, сполученого з внутрішньою порожниною мембранної коробки. Під дією різниці атмосферного і вимірювального тисків коробка 13 змінює свій об'єм, що викликає переміщення центру верхньої мембрани, який через поводок 12 і важіль 8 передається на тягу 1 і вісь 5 вимірювальної стрілки 6.

Виготовлення мембранного блока з лінійною характеристикою, тобто пропорційною залежністю переміщення верхнього центру від вимірювального тиску, практично неможливо через складність виготовлення мембрани. Тому для виправлення не лінійності в приладі передбачена кутова корекція в важільному механізмі установкою стрілки на нуль коректором 14. Запізнювання показань приладу складає не більш 4с.

1.4. Пружні манометри

Пружні манометри (рис. 1.4) відносяться до найбільш поширених приладів для вимірювання тиску [4].

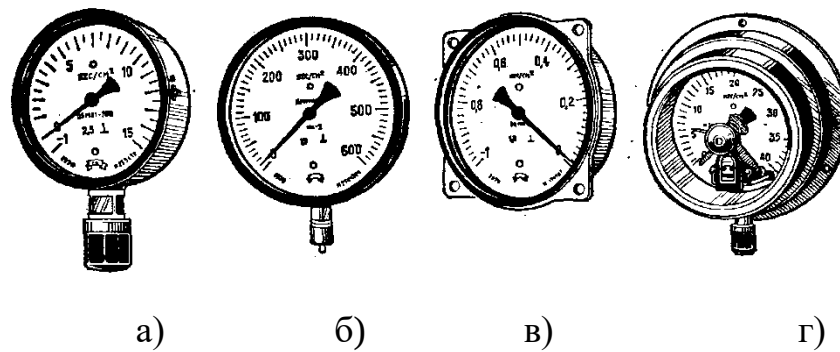


Рис. 1.4. Загальний вид манометрів

а – ОБМВ; б – АМУ; в – МОШ; г – ЕКМ

Вони виготовляються з трубчастої одновиткової і багато виткової пружини. За класом точності манометри поділяються на технічні, контрольні і зразкові.

Технічні манометри мають клас точності 1,5; 2,5; 4,0; контрольні - 0,6; 1,0, зразкові - 0,16; 0,25; 0,4. По конструкції і принципу дії манометри всіх типів і моделей подібні один до одного. Верхні межі вимірювань манометрів у залежності від їхніх типів складають від 0,06 до 100 МПа.

Манометр (рис. 4,а) має різьбовий штуцер 7 для підключення, трубчасту пружину 5, сполучену зі штуцером, стрілку 1 і кінематичний вузол, що складається з повода 6, зубчастого сектора 4 і зубчастої шестерні 2, закріпленої на одній осі зі стрілкою, і протидіючої спіральної пружини 3. Під дією надлишкового вимірювального тиску трубчаста пружина деформується (у межах пружних деформацій), розпрямляється. При цьому вільний кінець пружини, переміщуючись разом із поводом 6, розвертає відносно осі зубчастий сектор, що, у свою чергу, повертає на визначений кут зубчасту шестерню 2 і стрілку приладу.

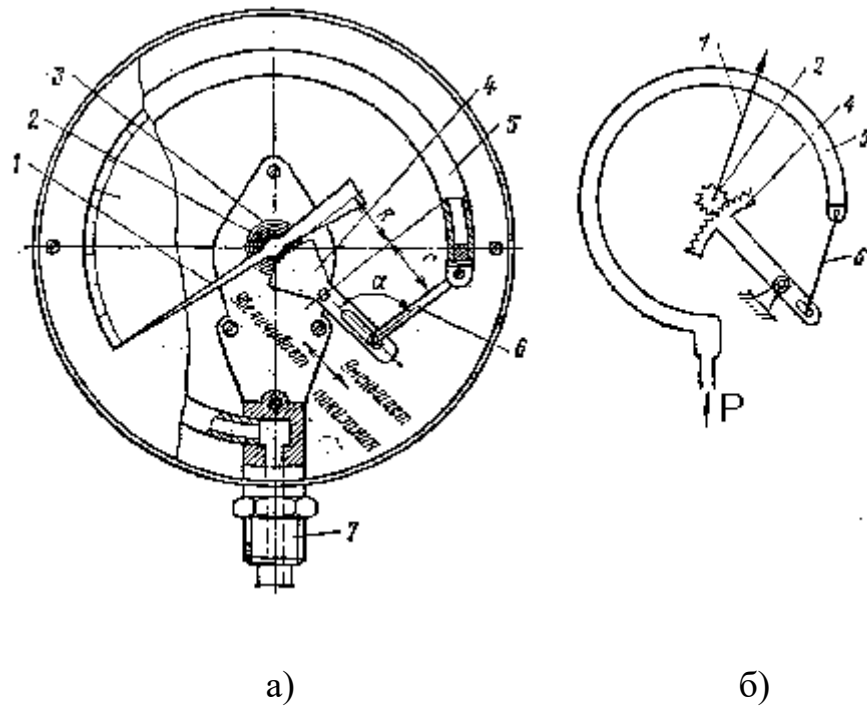


Рис. 1.5 Кінематична схема манометра

Трубчаста пружина 5 (рис. 1.5,б) у перерізі має овальну форму, що під дією вимірюваного тиску газу або рідини прямує до кола. У металі виникають механічні напруги, що призводять до деформації пружини, внаслідок цього збільшується мала вісь еліпса трубчастої пружини і переріз трубки буде наближатися до кола [4].

При подачі на вхід манометра надлишкового тиску трубка розширюється, а при подачі розрідження - стискається.

Принцип дії манометра заснований на врівноважуванні сили, що виникає під дією вимірювального тиску та силою пружності чутливого елемента приладу.

Звичайно, пружні деформації вимірювальної пружини незначні (до 8^0 - 10^0). Для штучного підвищення чутливості приладу встановлюється зазначений вище кінематичний вузол, що дозволяє стрілці робити поворот у залежності від розміру деформації від нуля до максимуму шкали. При відключенні вимірювального тиску пружна деформація пружини зникне, пружина відновлює своє початкове положення і стрілка приладу

встановлюється на нульову оцінку шкали. Найбільше поширеними приладами такого типу є манометри ОБМ, МОШ і МТ, шкали яких складають 270^0 .

Манометри ОБМ, МОШ, МТ можуть застосовуватися для вимірювання надлишкових тисків рідких і газоподібних середовищ. Манометри типів ГМ (газовий), АМ (аміачний), МК (кисневий) є спеціальними газовими манометрами.

Кисневі манометри мають на шкалі напис: «Кисень», «Мастило - небезпечно», водневі манометри - «Водень», ацетиленові манометри - «Ацетилен».

Особливу небезпеку представляє експлуатація на кисневих лініях звичайних манометрів або кисневих манометрів із слідами мастила. Кисень як окислювач різко підвищує температуру мастила, при цьому може відбутися місцевий вибух. Тому на кисневих лініях встановлюють тільки знежирені кисневі манометри, а резервні манометри повинні мати на штуцерах спеціальні заглушки для запобігання потрапляння мастила.

Манометр надвисоких тисків типу НВ застосовується для вимірювання тисків із верхніми межами вимірювань від 160 до 1000 МПа (1600-10000 кг/см²).

Показуючі і самописні манометри не рекомендується встановлювати в місцях, що мають значні вібрації.

При вимірюванні тиску рідин необхідно враховувати вплив стовпа рідини, що знаходиться в лінії сполучення, якщо прилад (манометр) знаходиться нижче або вище точки відбору тиску.

Гідростатичний тиск, утворюваний вимірювальним середовищем у лінії сполучення, визначається рівнянням $P_{\Gamma} = \gamma H$, де γ - питома вага рідини, кгс/м³, H - перепад тиску (різниця у висоті між точкою відбору тиску і безпосередньо місцем установки манометра).

У таких випадках манометр показує сумарний тиск - тиск в точці відбору і гідростатичний тиск: $P_m = P_0 + P_{\Gamma}$, де P_m - показання манометра, P_0 - вимірювальний тиск, P_{Γ} - гідростатичний тиск [4].

При вимірюванні пульсуючих тисків на працюючому технологічному устаткуванні (компресорах, ресиверах і ін.) у штуцер манометра встановлюють спеціальний демпфіруючий пристрій (пристрій, який згладжує пульсацію тиску) у виді малого каліброваного отвору, діаметр якого залежить від щільності вимірювального середовища рідини, газу або фракції й абсолютної величини вимірювального надлишкового тиску.

Деякі типи манометрів мають електричний сигнальний пристрій, за допомогою якого можна здійснювати сигналізацію заданих меж тисків. Електричний контактний пристрій манометрів можна застосовувати в схемах автоматичної сигналізації і контролю технологічних параметрів, в автоматичному керуванні і захисті устаткування.

Прилади, які мають сигнальний пристрій, називаються **електроконтактними манометрами**. Найбільше поширеними приладами є: ЕКМ – електроконтактний манометр, ЕКВ - ;електроконтактний вакуумметр, ЕКМВ – електроконтактний мановакуумметр, ВЕ-16рб-електроконтактний манометр для експлуатації у вибухонебезпечних помешканнях.

1.5. Самописні манометри

Самописні прилади призначаються для вимірювання і запису на діаграмі вимірювального тиску або розрідження.

Принцип дії пружних приладів заснований на врівноваженні вимірювального тиску силою пружної деформації трубчастої пружини. Розкручування пружини, викликане зміною величини вимірювального тиску, передається за допомогою кінематичного вузла на перо приладу, що записує на діаграмі величину вимірювального тиску [4].

Конструкція самописного трубчастого манометра типу МТС показана на рис. 1.6 Тиск, що вимірюється, через штуцер 3 і трубку 2 надходить у порожнину трубчастої пружини 1. Під дією пружної деформації починається переміщення вільного кінця трубки, що через тягу 5 і кривошип передається на перо 6, що записує величину вимірювального тиску на діаграму 4. Один

кінець трубчастої пружини 1 закріплений на корпусі приладу з трубкою 2 і штуцером 3 для підключення вимірювального тиску, другий кінець запаяний, закритий наконечником 7 і вільно переміщається під дією вимірювального тиску.

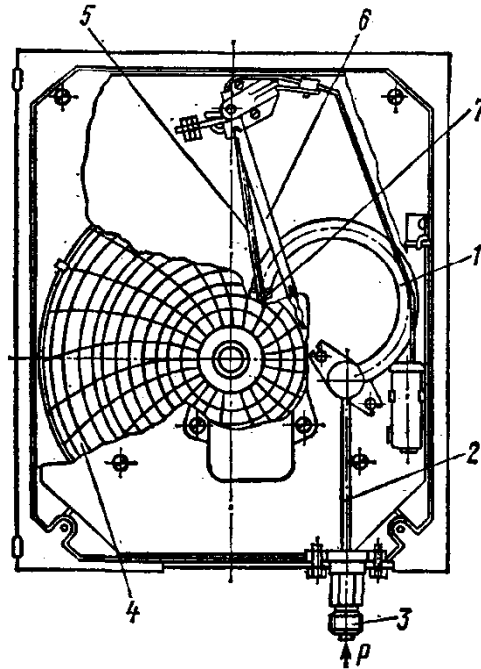


Рис. 1.6 Самописний манометр МТС

Найбільш поширеними типами сильфонів є самописні сильфонові манометри МСС-711 і МСС-712 із межами вимірювання від 0 до 245 кПа (2,5 кгс/см²).

Обертання діаграми може здійснюватися за допомогою годинникового механізму або синхронного мікроелектродвигуна. На діаграмі нанесений відлік часу, за допомогою якого можна визначити вимірювальний тиск відносно часу роботи технологічного устаткування.

Ряд самописних приладів випускають з електричним сигнальним пристроєм. Прилади з годинниковим приводом використовують у вибухонебезпечних помешканнях.

1.6. Сигналізатори тиску

Будь-який компресор, паровий котел і резервуар високого тиску мають максимально допустиму величину робочого тиску, перевищення якого може

призвести до аварії, вибуху і виходу з ладу устаткування. У зв'язку з цим таке устаткування має автоматичний захист, що дозволяє робити «скидання» граничного тиску або зупинку в роботі попереднього устаткування [4].

З цією метою використовують сигналізатори тиску, що за типом чутливого елемента поділяються на чотири головних види:

- пружинні,
- поршневі,
- мембранні,
- сильфонні.

Пружинні та поршневі сигналізатори використовують при тиску 2,5-30 МПа (25-600 кгс/см²), сильфонні та мембранні - при 0,02-0,25 МПа (0,2-2,5 кгс/см²). Електроконтактний манометр типу ЕКМ (ВС-16рб) за принципом дії й будовою подібний звичайному манометру з одновитковою пружиною.

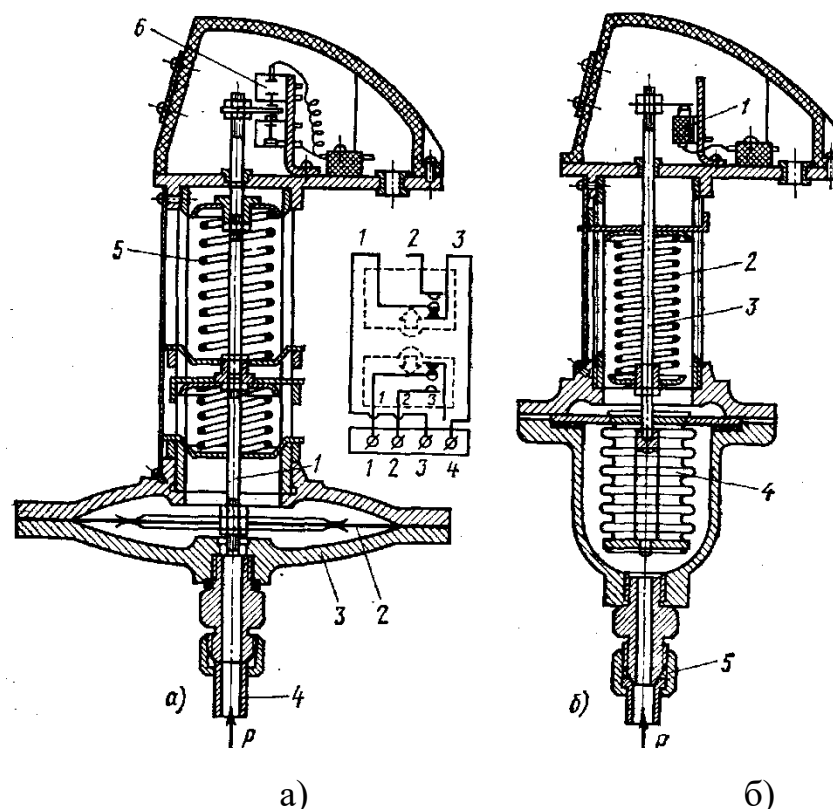


Рис. 1.7 Сигналізатор тиску а – ДН; б - ДД

У мембранних сигналізаторах тиску типів ДТ, ДН і ГПДМ у якості чутливих елементів використовується еластична мембрана, зроблена з прогумованої тканини. На рис. 1.7,а показаний пристрій сигналізатора тиску

типу ДН. Плоска мембрана 2 пов'язана зі штоком 1, що при зміні контрольованого тиску, який надходить через штуцер 4 у порожнину датчика 3, замикає або розмикає контакти мікроперемикача 6, встановленого на корпусі сигналізатора. Регулювання діапазону контролю тиску проводиться за допомогою протидіючої пружини 5.

Сильфони сигналізатори тиску типів РД, ДД мають велику чутливість у порівнянні з вищеописаними типами сигналізаторів, так як чутливими елементами таких сигналізаторів є сильфони.

Прилади типу ДТ (датчик тиску), подібно датчикам типів ДН і ДТ, складаються з трьох уніфікованих вузлів - чутливого елемента, пружинного датчика й перемикаючого пристрою [4].

На рис. 1.7,б показаний пристрій сильфонного приладу типу ДД. При підвищенні тиску контрольованого середовища, що надходить через штуцер 5, сильфон 4 деформується, компенсуючи зусилля протидіючої пружини 2 датчика і штовхачем 3 переключає мікроперемикача.

В залежності від модифікації сигналізатор типу ДД використовується в діапазоні тисків від 0,006 до 1,6 МПа (0,06-16 кгс/см²).

1.7. Електричні вакуумметри

Для вимірювання вакууму в межах $1 \cdot 10^{-7}$ - $1 \cdot 10^{-1}$ Па застосовують електричні вакуумметри трьох типів: теплоелектричні, іонізаційні і магнітні.

Дія теплоелектричного вакуумметра заснована на залежності теплопровідності газу від його тиску. Прилад складається з двох основних блоків: манометричного перетворювача (лампи) і вимірювального електричного блока.

Манометричний перетворювач термпарного приладу ДТ-2 показаний на рис. 1.8, а. Він складається із скляного балону, в якому розташовані платиновий провідник-нагрівач і хромель - копелева термopapa. При зміні вимірювального тиску змінюється теплопровідність і термо - ерс термopари. Термо - ерс. термopари і вимірювального вакууму пов'язані між собою градуйованою кривою, зображеної на рис.1.8, в.

Дія іонізаційних вакуумметрів заснована на використанні електричного розряду, тобто руху заряджених частинок у вакуумі. Манометричний перетворювач іонізаційного приладу ЛМ-2 зображений на рис. 1.8, б. Уздовж осі скляного балона розташований U-подібний катод із вольфрамового дроту, навколо якого встановлений анод у виді рідкої сітки з молібденового дроту, що підігрівається електричним струмом. Анод оточений іонним колектором, що виконаний із тонкої нікелевої фольги у формі круглого циліндра [6].

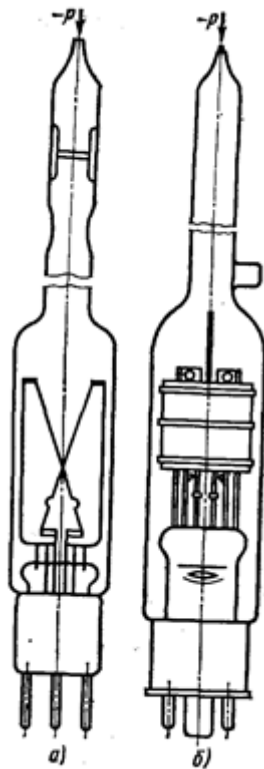


Рис. 1.8 Манометричний перетворювач термопарного приладу ДТ-2

Вимірювальний блок забезпечує необхідний режим лампи, а струм у ланцюзі іонного колектора є мірою тиску.

Подальше пониження межі вимірів вакууму можливо завдяки застосуванню інверсно-магнетронного манометричного перетворювача (рис. 1.9). Перетворювач має катод 1, що представляє собою циліндр 2 із торцевими площинами, і анод 3, що проходить по осі циліндра через отвори в торцевих поверхнях катода. Вся система, укладена в герметичний корпус, поміщається в постійне магнітне поле магніту 4, яке спрямоване по осі циліндра катода. На

анод подається висока напруга, рівна 6кВ. Під дією магнітного й електричного поля електрон, залишивши поверхню катода, зіштовхується з молекулою газу і проводить її іонізацію, тобто струм іонізації є мірою тиску.

Електричний магнітний блокувальний вакуумметр ВМБ-8 (рис. 1.10) призначений для вимірювання тиску в межах 10^{-7} - 10^{-1} Па, а також використовується в якості датчика автоматики в автоматизованих вакуумних системах. Прилад складається з інверсно-магнетронного манометричного перетворювача / ММ-32-1, вимірювального блока 4 БИВ-1 з'єднувача 3 і термостійкого з'єднувача 2 [6].

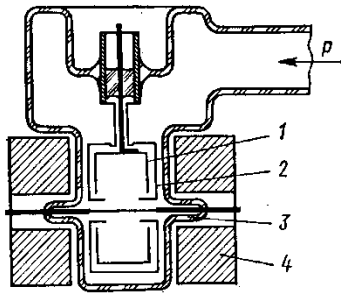


Рис. 1.9 Інверсно-магнітронний перетворювач ММ-14

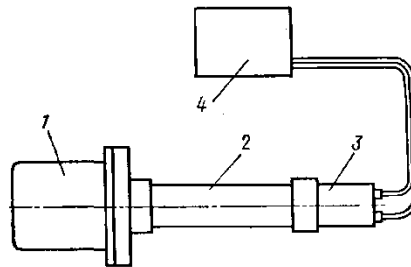


Рис. 1.10 Структурна схема магнітного вакуумметра ВМБ-8

Принцип роботи приладу полягає в тому, що манометричний перетворювач перетворить сигнал тиску в сигнал постійного струму. Розрядний струм перетворювача, пропорційний вимірюваному тиску, надходить на вимірювальний блок. Вимірювальний блок складається з таких елементів: джерела живлення, логарифмічного устрою ЛУ, підсилювача постійного струму ППС, вимірювального приладу ВП, пристрою сигналізації несправності блока ВУС, двох пристроїв блокувань У Б.

Джерело живлення забезпечує режим роботи манометричного перетворювача (на анод подається висока напруга 2500 В) і всіх інших пристроїв вимірювального блока.

1.8. Тензорезистивні перетворювачі тиску

Основою принципу дії тензорезисторів є явище тензоефекту, суть якого полягає в зміні електричного опору провідникового матеріалу під час його механічної деформації.

У тензорезистивних перетворювачах тиску (тензоманометрах) як первинні перетворювальні елементи використовуються мембрани, сильфони та трубчасті системи.

У мембранних перетворювачах тиску деформація мембрани звичайно сприймається наклеєним на неї тензоперетворювачем безпосередньо. Для одержання максимальної чутливості та термо компенсації тензорезистори наклеюють у зонах максимальних деформацій різних знаків. Тензоманометри з плоскими мембранами відрізняються простотою конструкції, однак вони чутливі до різких перепадів температур. Досконалішими є тензоманометри з гофрованими мембранними перетворювачами тиску 1, центри яких з'єднані з тензорезистивними перетворювачами сили у вигляді консольних балок 2 з наклеєними на них тензорезисторами (рис. 1.11, а) або з кільцевими пружними перетворювальними елементами сили в деформацію (рис.1.11, б). В останньому випадку вимірюваний тиск через отвір в штуцері 1 діє і їм еластичну мембрану 2 та сферичну подушку 3, внаслідок чого кільцевий пружний елемент 4 деформується, викликаючи деформацію тензорезисторів 4 та 5 [6].

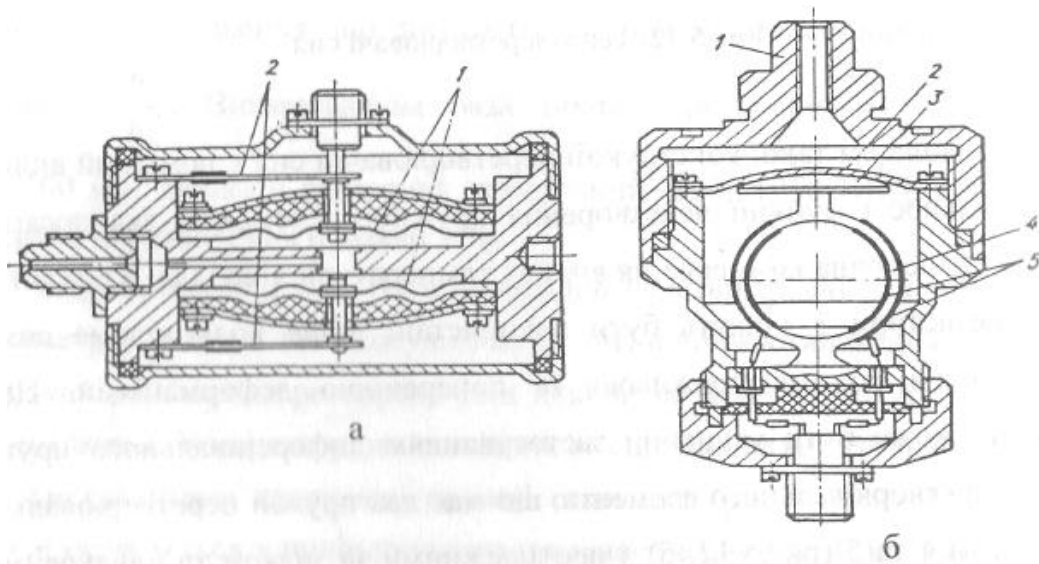


Рис. 1.11 Тензорезистивні перетворювачі тиску

Верхні границі перетворень розглянутих вище тензومانометрії становлять від 0,1 до 10 МПа. На рис. 1.12 показана конструкція тензорезистивного давача різниці тисків типу "Сапфір". Давач має первинний мембранно-важільний перетворювач різниці тисків 1, розділювальні мембрани 2 і 3, з'єднані між собою та з кінцем важеля первинного перетворювача за допомогою тяги 4. Дія вимірюваної різниці тисків $P_1 > P_2$ призводить до переміщення тяги і, відповідно, кінця важеля, деформації мембрани із монокристалічного сапфіру, на зовнішню поверхню якої нанесена тензочутлива плівка кремнію. Тензорезистори через герметичний вивід під'єднуються до вторинного перетворювача, ще входить до складу "Сапфіра" і служить для перетворення зміни опор тензорезисторів у вихідний уніфікований струм.

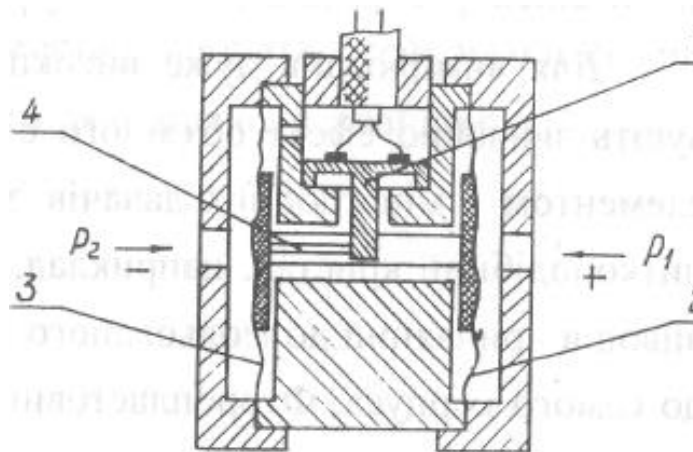


Рис. 1.12. Тензорезистивний перетворювач різниці тисків

Останнім часом все більше застосовують перетворювачі тиску з напівпровідниковими тензорезисторами. Мініатюрний (діаметром 10...15 мм) перетворювач тиску (рис. 1.13, а) має мембранний первинний перетворювач тиску 1. Переміщення центру мембрани, викликане вимірюваним тиском, передається за допомогою штока 2 на консольну балку 3, на котрій склоприпоєм закріплені напівпровідникові тензорезистори 4 у вигляді ниткоподібного кристала кремнію р-типу, з платиновими струмовиводами.

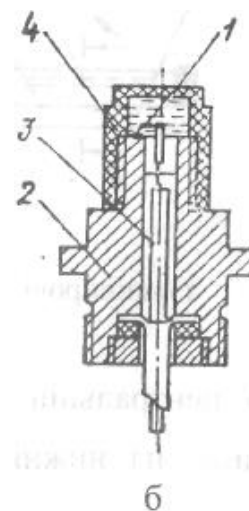
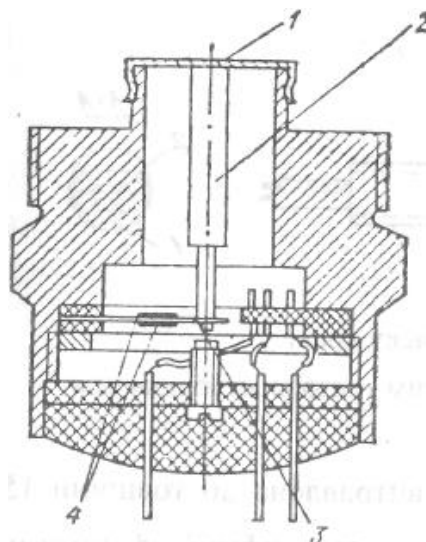


Рис. 1.13. Перетворювачі тиску з напівпровідниковими тензорезисторами

Для вимірювань дуже високих тисків (до $5 \cdot 10^8$ Па) використовують звичайно ефект об'ємного стискання тензорезистора. Чутливим елементом 1 мініатюрних давачів даного типу (рис.5.15, б) може бути й ниткоподібний кристал, наприклад, з антимоніду галію п-типу. Один з виводів припаяний до ізольованого від корпусу 2 гермовводу 3, іншим до самого корпусу. Фторопластовий ковпачок 4 виконує роль розділювальної мембрани. Внутрішня порожнина з чутливим елементом заповнена трансформаторною оливою, за допомогою якої вимірюваний тиск передається на чутливий елемент.

На рис. 1.14 наведена конструкція мініатюрного (діаметром 2,2 мм) давача тиску крові в судинах. Корпус 1 виготовлений з нікель-кобальт кремнієвого сплаву, а пружний елемент 2 - це пластина з монокристалічного кремнію. У центральній частині пластини витравлена до товщини 15 мкм мембрана, на нижній стороні якої методом дифузії сформована інтегральна мостова тензочутлива схема. Пластина-мембрана за допомогою спеціального клею кріпиться до кремнієвої підкладки 3. Підкладка має канавку, яка через отвір в корпусі зв'язана з зовнішнім середовищем так, що тиск повітря в канавці і, відповідно, тиск на внутрішню сторону мембрани дорівнюють атмосферному. На зовнішню сторону мембрани діє вимірюваний тиск. Давач кріпиться на кінці поліетиленового катетера і встановлюється безпосередньо в кровоносній судині пацієнта. Вимірювальна схема з'єднана з зовнішньою вторинною апаратурою тонкими дротинами діаметром 200 мкм, які виводяться назовні через порожнину між пластиною та підкладкою і через отвір у корпусі. Вимірювальний струм тензочутливого моста становить 2 мА, максимальний вихідний сигнал 24 мВ. Похибка вимірювання не перевищує 10 %.

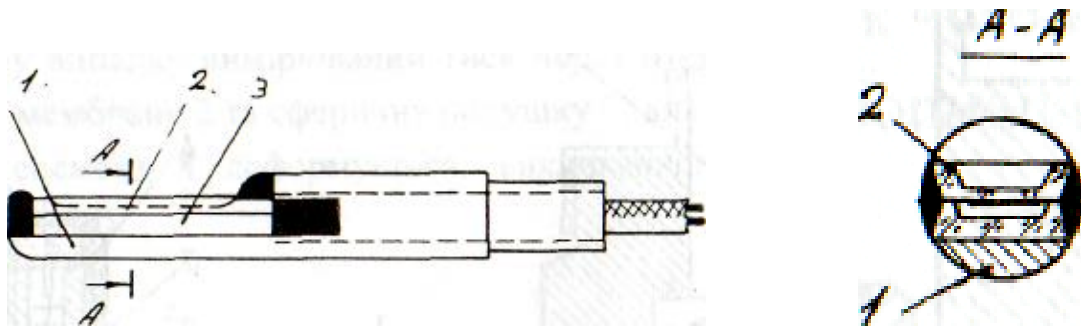


Рис. 1.14. Давач тиску крові з напівпровідниковим інтегральним тензоперетворювачем

1.9. Ємнісні перетворювачі тиску

Ємнісні перетворювачі є електричними конденсаторами, ємність яких змінюється внаслідок зміни під дією вимірюваної величини відстані між обкладинками, площі перекриття обкладинок або діелектричної проникності середовища, що знаходиться між обкладинками. Вони широко застосовуються як перетворювачі переміщень та рівнів, а в поєднанні з механічними перетворювачами сил, прискорень та вібрацій в механічне переміщення вони є складовими елементами ємнісних манометрів, динамометрів, віброметрів та акселерометрів.

Незважаючи на всю різноманітність конструктивних різновидів ємнісних перетворювачів, їх можна об'єднати в дві великі групи: плоскопаралельні та коаксіальні.

Нехтуючи крайовими ефектами, ємність конденсатора з плоскопаралельними обкладинками можна записати у вигляді

$$C = \epsilon \epsilon_0 \frac{S}{\delta}$$

Чутливими елементами ємнісних перетворювачів тиску є мембрани та діафрагми, які перетворюють вимірюваний тиск у переміщення. Вони є одночасно рухомими електродами ємнісних перетворювачів.

На рис. 1.15 наведена конструкція ємнісного перетворювача тиску з чутливим елементом у вигляді еластичної мембрани 1, котра закріплена в корпусі 2 за допомогою муфти 3. Нерухомий електрод 4 з'єднаний з центральною частиною колодки коаксіального з'єднувача 5

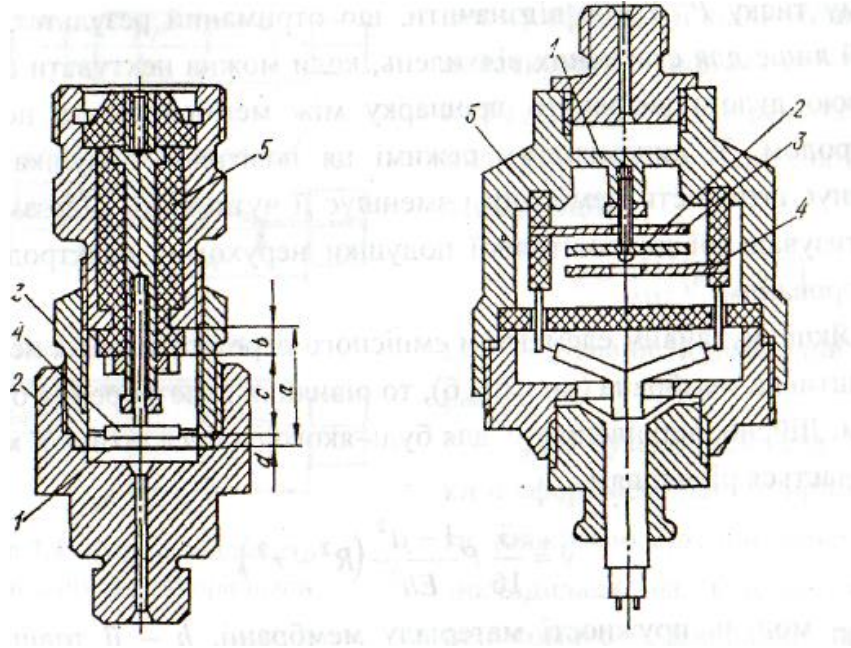


Рис. 1.15. Ємнісний перетворювач тиску
Рис. 1.16. Ємнісний диференціальний перетворювач тиску

Конструюючи ємнісні перетворювачі, особливу увагу треба приділяти вибору матеріалів. Для забезпечення мінімальної температур похибки деталі ємнісного чутливого елемента виготовляють з матеріалів з незначними та можливо близькими за значеннями температурними коефіцієнтами лінійного розширення. Наприклад, для пружних елементів застосовують сплав 55БТЮ, що відрізняється високими пружними властивостями, стабільністю температурного коефіцієнта модуля пружності, корозійною стійкістю. Як матеріал для ізоляційних елементів використовують оптичне скло марки ЛК6.

Дуже суттєвим є електростатичне екранування всіх виводів ємнісного перетворювача. Після нього не повинно залишатися неекранованих

проміжків. З цієї причини частину кабелю виготовляють як невід'ємну частину перетворювача.

На рис. 1.16 наведена конструкція диференціального ємнісного перетворювача тиску, в якому пружний елемент 1 (у даній конструкції це мембрана, виготовлена разом з корпусом) не є безпосередньо електродом. Рухомим електродом тут є пластина 2, з'єднана за допомогою шпильки з центром штивної мембрани. Нерухомими електродами є пластини 3 та 4, виготовлені у вигляді металевих дисків і закріплені в скляних циліндричних стійках 5, з'єднаних з корпусом.

Така конструкція ємнісного перетворювача дає змогу збільшити за інших однакових умов його чутливість.

Ємнісні перетворювачі мають звичайно верхню межу перетворюваного тиску 200..800 Па, при чутливості 0,5. ..1,0 пФ/Па та початковій ємності 10...20 пФ. Основна їх похибка становить 1...2 %.

Основні висновки

1. У місцевому контролі тисків газів і рідин найбільш широко використовують технічні манометри типів ОБМ, МОШ, МТ і т.д.
2. Сигналізатори тисків типів ДН, ДТ, РД, ЕКМ прості і надійні в експлуатації, тому вони широко застосовуються в захисті технологічного устаткування.
3. У схемах автоматики технологічних процесів, на щитах і пультах для контролю і сигналізації контрольованих тисків, як правило, використовують різноманітні перетворювачі системи ГСП у комплекті з реєструючими приладами.

1.10. Електричні прилади для вимірювання тиску

Електричні прилади для вимірювання тиску сьогодні набувають найбільшого поширення для вимірювання і дистанційного передавання значення тиску. Первинним елементом таких приладів є так званий *датчик тиску* – пристрій для сприйняття величини тиску та перетворення його у

відповідний електричний сигнал. Вихідним сигналом є, як правило, стандартний сигнал постійного струму в діапазоні 0...5 мА або 0...20 мА, або ж частотний сигнал [6].

Основні переваги електричних приладів: компактність датчика тиску; висока стабільність параметрів: температурна, часова, при циклічних навантаженнях; незначна температурна залежність; широкий вибір нормованих електричних виходів, а також роз'ємів для підведення тиску; довговічність та ін.

Для прикладу на рис. 1.17 показано датчики тиску DMP 331i (для малих тисків) і DMP 333i (для високих тисків), які знаходять широке застосування практично у всіх галузях промисловості.



Рис. 1.17. Датчики тиску DMP

Датчики підходять як для статичного, так і для динамічного вимірювання тиску і застосовуються для всіх середовищ тиску, сумісних з неіржавіючою сталлю. Основним елементом датчиків DMP 331i і DMP 333i є датчики тиску DSP 401 і DSP 404, які конструктивно виконуються в балоні з неіржавіючої сталі з привареною мембраною, що відокремлена наповнювачем з інертної оливи. При дії тиску напівпровідниковий датчик DSP 401 дає вихідний сигнал приблизно 100 мВ (DSP404 – 200 мВ). Даний сигнал обробляється цифровим способом (16-бітним АД перетворенням) за допомогою мікропроцесора. Обробка забезпечує корекцію температурної залежності сенсора й електроніки з високою точністю. виправлений сигнал обробляється АД перетворювачем на стандартний вихідний сигнал. Крім аналогового вихідного сигналу є можливість виходу типу RS.

Іншим прикладом є кремнієві датчики тиску типу ІПТ, які придатні для вимірювання абсолютного або надлишкового тиску рідин і газів. Датчики мають 12 діапазонів вимірювання тиску (від 0–1 кПа до 0-1500 кПа), лінійну вихідну характеристику, високу стабільність параметрів: температурну, часову та при циклічних навантаженнях. Важливою перевагою є мініатюрний корпус (15×15×18 мм) та мала маса приладу – 2 г.

В датчиках даного типу використано єдиний чотирьох контактний тензоерс-елемент, вихідний електричний сигнал якого є пропорційним до деформації мембрани під дією тиску середовища. Тенз оерс-елемент інтегрований зі схемою балансу початкового сигналу при відсутності надлишкового тиску. Компенсація температурної залежності тензочутливості здійснюється з допомогою зовнішнього резистора. Номінальний вихідний сигнал датчика – (50 ± 10) мВ при напрузі живлення 6 або 9 В. Гістерезис по тиску та коефіцієнт нелінійності навантажувальної характеристики не перевищують 0,1% від величини сигналу при номінальному тиску (СНТ). В діапазоні температур від 243 до 373 К похибка вимірювання тиску не перевищує 1% СНТ, а зміна початкового сигналу – не більше 0,2% СНТ.

1.11. Забезпечення єдності вимірювання тиску

1.11.1 Деформаційні манометри як робочі еталони вимірювання тиску

Деформаційні манометри застосовують як робочі еталони 3-го розряду під час калібрування та повірки технічних манометрів та вимірювальних перетворювачів тиску, а також для виконання точних вимірювань в лабораторних умовах.

Робочі еталони виготовляють тільки з одновитковою трубчастою пружиною та секторним передавальним механізмом. Будова таких манометрів аналогічна будові робочих манометрів (рис. 1.18), але відрізняється високою якістю матеріалу пружини та ретельністю виготовлення передавального механізму. Їх виготовляють в круглому без фланцевому корпусі діаметром

160 мм або 250 мм з радіальним розташуванням з'єднувального штуцера. Встановлені наступні класи точності робочих еталонів (манометрів): 0,15; 0,25; 0,4 [14].

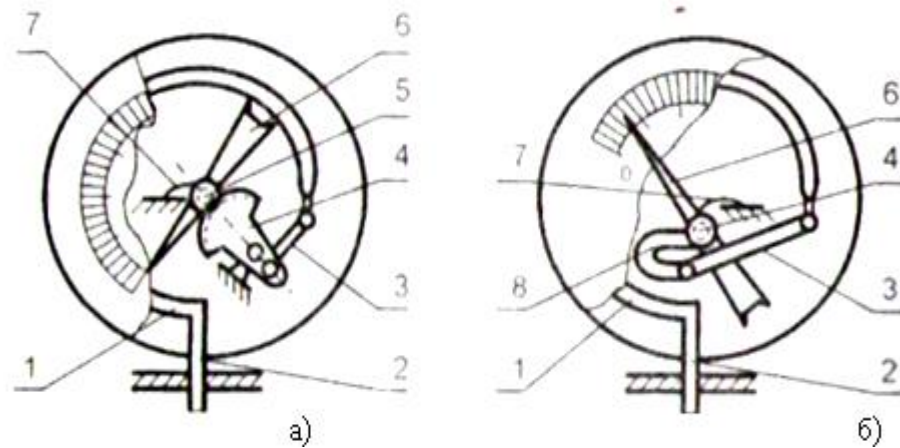


Рис. 1.18 Будова передавального механізму секторного і важільного типу у манометрах надлишкового тиску

Шкали цих манометрів концентричні з рівномірно розташованими позначками. Шкала ЗВТ класу точності 0,15 та 0,25 поділена на 400 умовних одиниць, а шкала ЗВТ класу 0,4 – на 250 умовних одиниць. Цифрові позначки нанесені через кожні 10 поділок шкали.

Нульова позначка у манометрів розташована з лівого боку шкали, а у вакуумметрів – з правого боку. Шкала продовжена від нульової та кінцевої позначок шкали на 5 умовних одиниць.

Робочі еталони (манометри) обладнані коректором нуля, який повинен забезпечити переміщення стрілки не менше, ніж на 4 умовні одиниці в кожен бік від нульової позначки шкали.

Для усунення впливу механічного тертя на покази ЗВТ, відлік показів робочих еталонів має виконуватися після легкого постукування пальцем по корпусу ЗВТ. За цих умов переміщення стрілки, після постукування пальцем, не повинно перевищувати половини абсолютного значення границі допустимої похибки засобу вимірювання тиску.

Температура навколишнього середовища повинна знаходитися в межах $(20 + 3) ^\circ\text{C}$ – для ЗВТ класу точності 0,15; $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$ – для ЗВТ класів

точності 0,25; 0,4.

При відхиленні температури за вказані межі до показів робочих еталонів вводять температурні поправки. Значення температурної поправки (в одиницях умовної шкали) визначають за формулами:

для ЗВТ точності 0,15 та 0,25

$$f\phi = 400 \cdot X \frac{P}{P_{max}}(20-t) \quad (1.7)$$

для ЗВТ точності 0.4

$$f\phi = 2500 \cdot X \frac{P}{P_{max}}(20-t) \quad (1.8)$$

де X - температурний коефіцієнт, який наведений у паспорті ЗВТ (звичайно $X \leq 4 \cdot 10^{-4} K^{-1}$); P - вимірюваний тиск (Па); P_{max} - верхня границя вимірювання манометра, (МПа); t - температура навколишнього середовища, (°C).

За цих умов невизначеність показів манометра, а від відхилення температури навколишнього середовища (в одиницях умовної шкали) після введення температурних поправок не повинна перевищувати значення $\sigma_{дон}$, яке визначають за формулою

$$\sigma_{дон} = \pm(K + 0,25\Delta_t), \quad (1.9)$$

де K – абсолютне значення межі основної допустимої похибки показів ЗВТ в одиницях умовної шкали; Δ_t – значення температурної поправки в одиницях умовної шкали.

До кожного робочого еталону додають свідоцтво про калібрування.

1.11.2 Вантажо поршневі еталонні засоби вимірювання тиску

Вантажо поршневі засоби вимірювання тиску мають у своєму складі вимірювальну поршневу систему (поршень циліндр) з вантажо приймальним пристроєм, набір спеціальних вантажів і пристрій для створення тиску і використовуються для дуже точних вимірювань тиску в лабораторних умовах, насамперед, у науково-дослідній практиці. В метрологічній системі (його територіальних органах, наукових метрологічних центрах та ін.) вони

отримали розповсюдження як еталони для повірки та калібрування робочих еталонів, деформаційних манометрів і вакуумметрів (лабораторних, контрольних і технічних) .

Розроблені вантажо поршневі ЗВТ вимірюють надлишковий тиск від 0 до 2500 МПа і вакуумметричний тиск від 6,095 МПа до 0. Мінімальна границя допустимої похибки вантажо поршневих ЗВТ досягає 0,001% від вимірюваної величини, завдяки чому вони займають чільне місце при зберіганні єдності вимірювання тиску, маючи статус державних та робочих еталонів тиску найвищих класів точності [14].

Принцип дії вантажо поршневих засобів вимірювання тиску

Не беручи до уваги значну різноманітність типів та конструкцій вантажо поршневих ЗВТ, усі вони засновані на зрівноважуванні тиску P , який вимірюють, за допомогою навантаженого не ущільненого поршня (рис. 1.19), тобто поршня 3, який входить у циліндр 1 з рівномірним, по колу, малим зазором. Зрівноважування тиску рідини p , який підводять від об'єкту вимірювання за допомогою патрубку 2, виконують накладанням вантажів 5 на вантажо приймальний пристрій 4 поршня.

Зазор між поршнем та циліндром становить декілька мікрометрів. Але у цьому зазорі під дією тиску виникає просочування рідини, що створює силу гідравлічного тертя по боковій поверхні в момент зрівноважування виконується рівняння

$$P = \frac{G_B + G_n - F_m}{\pi r^2} \quad (1.10)$$

де P – надлишковий тиск на рівні торця поршня; G_B і G_n - вага (в повітрі) відповідно вантажу і поршня із вантажо приймальним пристроєм; F_m - сила гідравлічного тертя; r - радіус поршня.

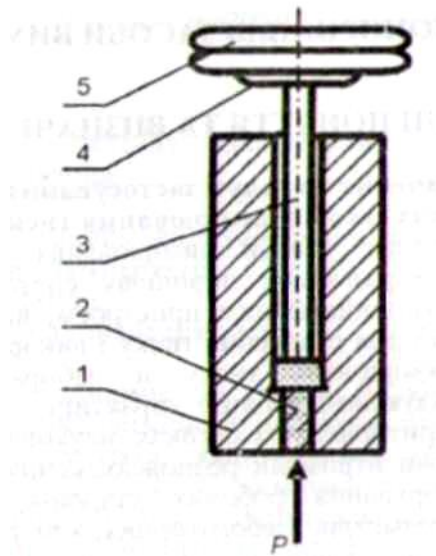


Рис. 1.19 Будова навантаженого не ущільненого поршня

Згідно теорії не ущільненого поршня

$$F_m = \pi r h P, \quad (1.11)$$

де h - ширина радіального зазору між поршнем і циліндром.

Якщо при цьому поршень опускається із "власною" швидкістю, тобто із швидкістю, яка необхідна для компенсації рідини, що витікає через зазор, то виникає додаткова сила гідравлічного тертя F , яка викликана рухом поршня відносно циліндра (в напрямку осі) [3].

Класифікація вантажо поршневих засобів вимірювання тиску

Вантажо поршневі ЗВТ можна класифікувати за:

- 1) видом вимірюваного тиску;
- 2) класом точності;
- 3) способом навантаження вантажем поршня та конструкційними особливостями.

За видом вимірюваного тиску вантажо поршневі ЗВТ підрозділяють на:

- вантажо поршневі манометри та калібратори надлишкового тиску;
- вантажо поршневі вакуумметри;

- вантажо поршневі мановакуумметри;
- вантажо поршневі барометри;
- вантажопоршневі манометри абсолютного тиску.

Вантажо поршневі ЗВТ, які застосовують в якості робочих еталонів, за класом точності поділяють на три розряди.

Робочі еталони 1-горозряду застосовують для калібрування робочих еталонів 2-го розряду безпосереднім звіренням.

Робочі еталони 2-ю розряду застосовують для калібрування робочих еталонів 3-го розряду та робочих ЗВТ безпосереднім звіренням.

Робочі еталони 3-го розряду застосовують для калібрування та повірки робочих ЗВТ безпосереднім звіренням.

За способом навантаження поршня вантажо поршневі манометри поділяють на манометри з безпосередньо навантажуваним оператором поршнем та манометри з поршнем, який навантажують вантажами за допомогою механічного пристрою. Останні застосовують для манометрів високого тиску, тому що для створення таких тисків необхідна значна маса вантажів, робота з якими стомлює оператора.

У загальному випадку, вантажо поршневі манометри можна умовно поділити на дві групи: з не зрівноваженим та із зрівноваженим поршнем.

Вантажо поршневі засоби вимірювання тиску з не зрівноваженим поршнем

У таких манометрах навіть за відсутністю вантажів на вантажо приймальному пристрої в рідині, яка знаходиться під поршнем, створюється початковий тиск P_o , обумовлений масою самого поршня з вантажо приймальним пристроєм

$$P_o = \frac{m_n g}{s} \quad (1.12)$$

Сам вантажо поршневий манометр являє собою вантажо поршневу пару з вантажо приймальним пристроєм та комплектом вантажів. Для використання його під час вимірювання тиску або повірки, вантажо

поршневий манометр включається до установки, яка складається з гідравлічної системи, резервуару робочої рідини, пристроїв для створення тиску у системі (насос, гвинтовий прес) та пристроїв для приєднання ЗВТ, що калібруються. Конкретні схеми вантажо поршневих установок розглянуті нижче. Там же описані і конструкції найбільш розповсюджених манометрів.

За конструкцією вантажо поршневої пари (вантажо порпшеві манометри з не зрівноваженим поршнем) поділяють на:

- манометри з незрівноваженим безпосередньо навантажуваним поршнем (МП-0,4; МП-6 та МП-60);
- манометри з незрівноваженим безпосередньо навантажуваним поршнем та опорною штангою (МП-250; МП-600; МП-2500 та деякі типи манометрів надвисокого тиску);
- манометри з вимірювальним мультиплікатором (Ж-2000; Ж-10000; Ж-15000; Ж-20000).

Вантажо поршневий манометр типу МП-60

Вантажо поршневий манометр типу МП-60 (рис. 1.20) складається з циліндра 1, поршня 2 з вантажо приймальною тарілкою 5, на яку накладають вантажі. Накидна гайка 4 з ексцентричним отвором служить для обмеження ходу поршня, який має кільцевий виступ у частині, що знаходиться над циліндром. Воронка 3 служить для збирання масла, яке витікає з зазору між циліндром і поршнем [14].

Манометр типу МП-60 виготовляють 1-го, 2-го і 3-го розрядів. Номінальне значення приведеної площі поршня становить $0,5 \text{ см}^2$. Границя вимірювання тиску - $(0,1 \dots 6,0) \text{ МПа}$. Установка з манометром 1-го розряду відрізняється від установок з манометрами 2-го та 3-го розрядів різною конструкцією пристроїв для приєднання ЗВТ, які калібруються, та наявністю тіньового статоскопа - пристрою для визначення взаємного розташування поршнів еталонного манометра і манометра, що калібрується. А взагалі, принципові схеми установок манометрів типу МП-60 аналогічні.

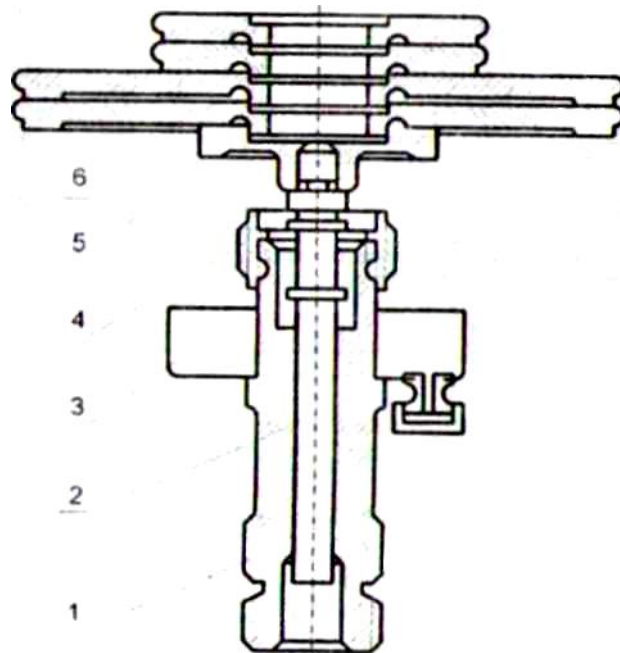


Рис. 1.20- Вантажо поршневий манометр типу МП-60

На рис. 1.21 наведена схема установки манометра типу МП-60 2-го розряду.

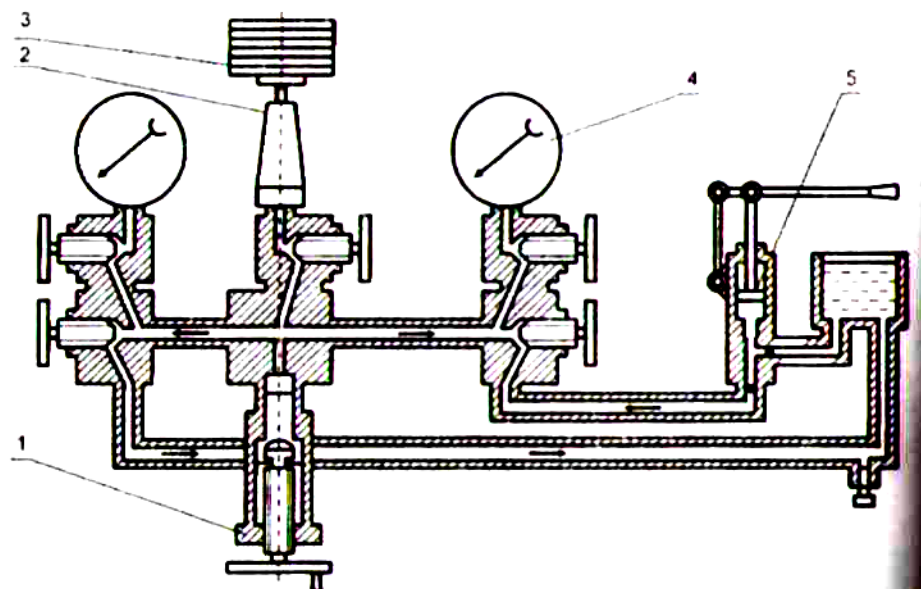


Рис. 1.21 Принципова схема установки манометра типу МП-60 2-го розряду

Вона містить вантажо поршневий манометр 2 з комплектом вантажів 3, гідропрес 1 і скальчастий насос 5 для заповнювання системи трансформаторним маслом та створення тиску, штуцери для приєднання деформаційних манометрів 4, які калібруються.

Перед початком роботи, вантажо поршневий манометр слід виставити за рівнем, закріпити ЗВТ, які калібруються на стійки гідропресу та заповнити колонку трансформаторним маслом. Для цього відкривають вентилі резервуару, вантажо поршневого манометра і ЗВТ, які калібруються; штурвал гідропресу виводять "на себе". Після цього закривають вентиль резервуару, штурвалом гідропреса підволять масло до штуцерів ЗВТ, які калібруються, відхилення стрілок від нульового значення показує що система заповнена маслом. Треба слідкувати за тим, щоб у пресі, з'єднувальних трубках та в циліндрі вантажо поршневого манометра не залишалося повітря. Для створення та вимірюванні тиску, що відповідає нижній границі вимірювання, слід поршень манометра встановити за покажчиком в робоче положення (обертанням маховика гідропресу "на себе"). Для створення більшого тиску на вантажо приймальну тарілку накладають відповідну кількість вантажу, після чого поршень знову приводять до початкового положення, а величину тиску визначають за сумою значень, позначених на вантажах і тарілці поршня.

Під час вимірювання, поршень слід обертати за годинниковою стрілкою (під час обертання усувається можливість появи великих сил нерідинного тертя). По закінченню работ и слід злити масло з резервуару, для цього на ньому є пробка. Зовнішній вигляд установки вантажопоршневого манометра типу МП-60 наведений на рис. 1.22 [14].

Вузли ЗВТ змонтовані на основі 1, яка спирається на три опори з установчими гвинтами 14. У центрі основи закріплена камера розподілу 2, яка являє собою сталевий брус з внутрішніми каналами, які за допомогою трубок 6 з'єднані з насосом 8, стійками для манометрів 7, камерою гідропресу 13 та вантажам поршневим манометром 3, який навантажують вантажами 4. У стійках 7 є штуцери 9 для приєднання манометрів, які калібруються. Переміщення плунжера гідропресу виконують обертанням і штурвала 12.

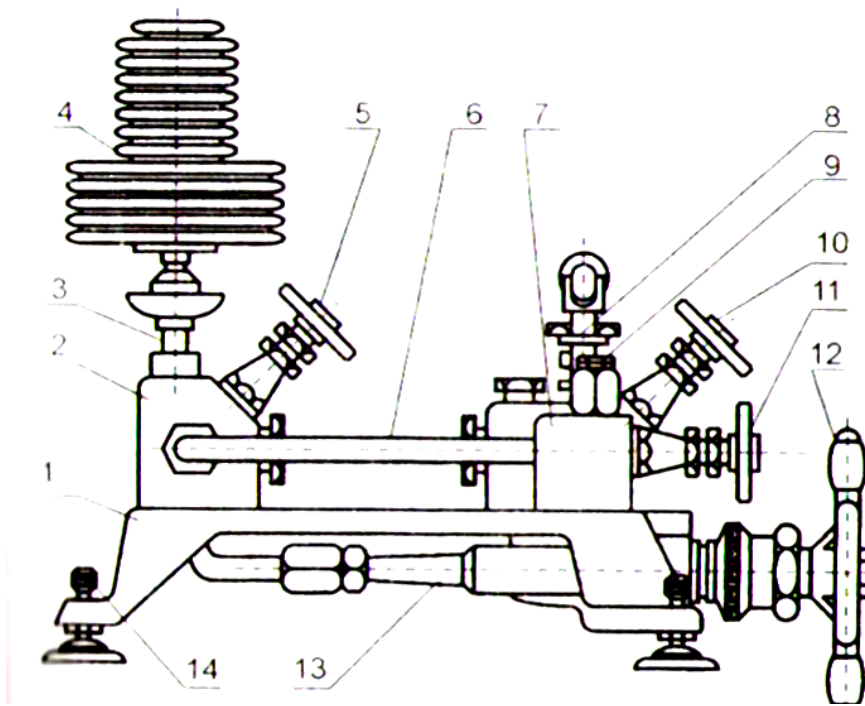


Рис.1.22 Зовнішній вигляд установки вантажо поршневого манометра типу МП-60

Для відключення вантажо поршневої частин установки, насоса і манометрів, що калібруються, служать відповідно вентиль 5, 10 і вентиль 11. Установчі гвинти призначені для виставлення вантажо приймального пристрою (тарілки) у горизонтальне положення. Як вантажі застосовують гирі дископодібної форми. На кожній гирі позначений тиск, створюваний на робочу рідину.

2. МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КАЛІБРУВАЛЬНОЇ ЛАБОРАТОРІЇ

2.1. Законодавчі вимоги до діяльності системи технічного регулювання

Однією зі складових системи технічного регулювання є метрологічна система України, яка забезпечує єдність вимірювань у державі і створює умови для захисту громадян і національної економіки від наслідків недостовірних результатів вимірювань. Нормативно-правова база метрологічної системи формулює чинний Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» [1]. З метою гармонізації проекту Закону з європейським законодавством, в проект включено законодавчу норму, відповідно до якої функції державного метрологічного контролю і наглядові функції виконуються різними суб'єктами метрологічної системи, що створює умови для отримання об'єктивних результатів нагляду та усунення конфлікту інтересів.

Визначення основних термінів згідно Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність»:

– калібрувальна лабораторія - підприємство, організація або їх відокремлений підрозділ, що здійснює калібрування засобів вимірювальної техніки;

– калібрування - сукупність операцій, за допомогою яких за заданих умов на першому етапі встановлюється співвідношення між значеннями величини, що забезпечуються еталонами з притаманними їм невизначеностями вимірювань, та відповідними показами з пов'язаними з ними невизначеностями вимірювань, а на другому етапі ця інформація використовується для встановлення співвідношення для отримання результату вимірювання з показу;

Калібрування:

1. Калібруванню в добровільному порядку можуть підлягати засоби вимірювальної техніки, які застосовуються у сфері та/або поза сферою законодавчо регульованої метрології. Калібруванню також підлягають вторинні та робочі еталони.

2. Калібрування засобів вимірювальної техніки проводиться:

- науковими метрологічними центрами;
- метрологічними центрами, калібрувальними лабораторіями, акредитованими національним органом України з акредитації;
- метрологічними центрами, калібрувальними лабораторіями, які мають документально підтверджену простежуваність своїх еталонів до національних еталонів, еталонів інших держав або міжнародних еталонів відповідних одиниць вимірювання.

Калібрування вторинних та робочих еталонів проводиться в порядку, встановленому нормативно-правовим актом центрального органу виконавчої влади, що забезпечує формування державної політики у сфері метрології та метрологічної діяльності.

3. Калібрування та оформлення його результатів проводяться відповідно до національних стандартів, гармонізованих з відповідними міжнародними та європейськими стандартами, та документів, прийнятих міжнародними та регіональними організаціями з метрології.

2.2. Акредитація випробувальних лабораторій

Діяльність випробувальних, повірочних, та калібрувальних лабораторій передбачає вчинення експертних дій, за результатами яких та чи інша продукція і матеріали можуть бути допущені на ринок чи ні. Такі організації, після проведених досліджень, визначають якість продукції та безпеку її використання, точність засобів вимірювальної техніки, стан устаткування, що використовується на підприємствах. Тому автоматизація обрахункових процесів в діяльності таких лабораторій є важливим і актуальним [15].

Враховуючи, що повірочні, калібрувальні та випробувальні лабораторії з точки зору застосовуваних стандартів мають багато спільного та виконують одні й ті ж пункти стандартів, далі в тексті буде застосовано термін «випробувальна лабораторія» як узагальнююче поняття всього комплексу повірочних, калібрувальних та випробувальних лабораторій, що працюють в сфері повірки, калібрування та випробування характеристик засобів вимірювальної техніки та всього допоміжного обладнання, яке використовується в технологічних процесах, та процесах контролю.

У своїй роботі випробувальні лабораторії повинні керуватися стандартами міжнародного і національного формату. Це основний фактор достовірності, точності та надійності результатів, які видає лабораторія. Крім того, приведення роботи випробувальних інститутів до єдиної системи стандартів забезпечує визнання їх висновків усіма учасниками ринку.

З цією метою в Україні проводиться акредитація випробувальних і калібрувальних лабораторій.

Акредитована лабораторія — компетентний орган, висновки, видані нею, надійні. Замовники насамперед звернуть увагу на те, чи є такий статус в організації, куди вони звернулися за експертизою якості і безпеки продукції, що випускається, та оцінювання точнісних параметрів засобів вимірювальної техніки. Клієнти виберуть ту лабораторію, технічні компетентності якої підтверджені державними органами контролю та нагляду, акредитаційними компаніями.

Процедура акредитації. Акредитація лабораторії — процедура, яка передбачає встановлення відповідності діяльності випробувальної лабораторії міжнародним і національним стандартам.

Акредитація — це процес з підготовки документів, обладнання та приміщення, результатом якого є офіційне визнання органом по акредитації компетентності лабораторії на виконання робіт з підтвердження відповідності, калібрування, випробувань.

Орган, що має право проводити акредитацію є Національне агентство з акредитації України, яке відповідає встановленим вимогам щодо незалежності, неупередженості та відсутності конфліктів інтересів.

Акредитація набула найбільшого поширення в сфері надання професійних послуг з випробування, калібрування та клінічної діагностики, як інструмент оцінки якості. За допомогою такого інструменту споживач може легко оцінити якість послуг та рівень компетентності організації.

Організації, що акредитують лабораторії щодо їх компетентності в проведенні досліджень і калібрування, повинні використовувати стандарт ISO/IEC 17025 в якості основи для своєї оцінки та акредитації.

Стандарт ISO / IEC 17025 детально описує вимоги, яким повинні відповідати лабораторії для гарантії своєї компетентності з технічної точки зору та можливості видавати дійсні результати [27].

Акредитація випробувальних лабораторій здійснюється НААУ — Національним агентством з акредитації в Україні.

У своїй діяльності НААУ керується Законом України «Про акредитацію органів з оцінки відповідності», а також враховує європейські і міжнародні стандарти, прийняті у сфері акредитації ООС — органів оцінки відповідності. Ними ж визначається порядок проведення цієї процедури.

В Україні прийняті нормативні акти, згідно з якими відбувається акредитація випробувальних лабораторій. ДСТУ ISO 17025:2017 — базовий для оцінки діяльності випробувальних лабораторій. До подачі заявки на проведення акредитації ООС повинен впровадити цей стандарт у свою діяльність, привести у відповідність всю документальну базу, подбати про належну поінформованість персоналу, провести навчання співробітників [27].

Дія стандарту поширюється на лабораторії як самостійні організації або такі, що входять до структури окремих підприємств, можуть бути частиною інспекційного або сертифікаційного центру (органу), не акцентуючи увагу на кількість персоналу, діяльності у сфері випробування та калібрування.

Використання ISO / IEC 17025 полегшує співпрацю між лабораторією та органами, організаціями, сприяючи обміну інформацією, досвідом і гармонізації процедур.

Стандарт ISO 17025.

ISO/IEC 17025 дозволяє лабораторіям продемонструвати свою компетентність, підвищуючи впевненість у своїй роботі як на національному рівні, так і в усьому світі. Це також полегшує співпрацю між лабораторіями та іншими органами, сприяючи більш широкому прийняттю результатів оцінки відповідності між країнами.

2.3. Оцінювання невизначеності при калібруванні

2.3.1. Загальні правила для оцінки та вираження невизначеності вимірювань

Загальні правила для оцінки та вираження невизначеності вимірювань для прямих, опосередкованих та сукупних вимірювань наведені в методиці розрахунку невизначеності вимірювань з використанням експериментальних даних. Методика оцінювання невизначеності при калібруванні описує особливості вибору рівнянь вимірювання, вхідних величин та оцінювання невизначеності результатів в залежності від застосованого методу калібрування.

Методика може бути застосована в роботі калібрувальної лабораторії і випробувальної лабораторії.

Базовий алгоритм оцінювання невизначеності вимірювань

Базовий алгоритм оцінювання невизначеності вимірювань при виконанні метрологічних робіт містить у собі наступні операції:

- складання модельного рівняння;
- оцінювання вхідних величин, внесення виправлень на відомі систематичні ефекти в результати вимірювань;
- обчислення оцінки результату вимірювань;
- визначення стандартних невизначеностей вхідних величин;

- визначення коефіцієнтів чутливості;
- обчислення внеску невизначеності кожної вхідної величини в невизначеність величини, яку вимірюють;
- визначення попарної кореляції вхідних величин;
- обчислення сумарної стандартної невизначеності величини, яку вимірюють;
- обчислення коефіцієнта покриття;
- обчислення розширеної невизначеності величини, яку вимірюють.

2.3.2. Величини, невизначеність яких оцінюється при калібруванні, та впливні величини. Модельне рівняння

В процесі калібрування ЗВ оцінюється величина та невизначеність різниці між значенням X_s , що відтворюється еталонною мірою або вимірюється еталонним ЗВ, і значенням X_c , яке виміряне ЗВ, що калібрується:

$$\Delta = X_c - X_s. \quad (2.1)$$

Надалі ця різниця використовується для внесення поправки до результату вимірювання. Таким чином, оцінювання невизначеності при калібруванні ЗВ полягає в оцінюванні невизначеності величини Δ .

При калібруванні мір зазвичай оцінюється величина та невизначеність дійсного значення міри, що калібрується, X_c шляхом вимірювання еталонним ЗВ або порівнянням з еталонною мірою X_s . Поправка в цьому випадку становить різницю між номінальним X_N і дійсним X_c значеннями міри:

$$\Delta = X_c - X_N. \quad (2.2)$$

Оцінювання невизначеності під час калібрування міри полягає в оцінюванні невизначеності вимірювань величини X_c .

Також у рівнянні вимірювання необхідно враховувати впливні величини, дії яких не враховані експериментальними даними та є суттєвими при проведенні калібрування. Наприклад, впливні величини, пов'язані з дрейфом

відтвореного значення з часу останнього калібрування, відхиленнями в умовах експлуатації (параметри навколишнього середовища, живлячої напруги, тощо), похибками квантування ЗВ, неточністю встановлення значення, взаємним впливом міри та засобу вимірювань, тощо (для прийняття рішення щодо включення того чи іншого впливаючого чинника в загальному випадку використовується [33]). Впливні величини задаються інтервалом (знаком модуля позначається півширина) та законом розподілу, відповідно до якого розраховується стандартна невизначеність [33]. Як правило, інтервал, в якому змінюється впливна величина, симетричний, тоді оцінка цієї величини дорівнює нулю. Якщо інтервал не симетричний, в якості оцінки береться середина інтервалу.

Деякі з впливних величин, що входять до рівняння вимірювання, можуть залежати від одних і тих же зовнішніх чинників. Тоді під час розрахунку сумарної стандартної невизначеності необхідно враховувати кореляційні коефіцієнти [33].

В цій методиці надано порядок оцінювання сумарної стандартної і розширеної невизначеностей калібрувань для всіх перерахованих у пункті 4.4 методів вимірювань. При цьому розширена невизначеність калібрування буде визначатися за формулою

$$U = ku, \quad (2.3)$$

де u – стандартна невизначеність, k – коефіцієнт охоплення, який обчислюється в загальному випадку як коефіцієнт Ст'юдента з ефективним числом ступенів свободи ν_{eff} , визначеним за формулою Велча-Саттерсвейта [33].

Згідно з ЕА-4/02 оцінювання невизначеності вимірювань під час калібрування ЗВТ визначається з рівнем довіри $p = 0.95$.

2.3.3. Розрахунок невизначеності при калібруванні засобів вимірювань

1. *Прямі вимірювання засобом вимірювань, що калібрується, величини, яка відтворюється еталонною мірою*

Схема калібрування для цього випадку наведена на рис. 2.1.

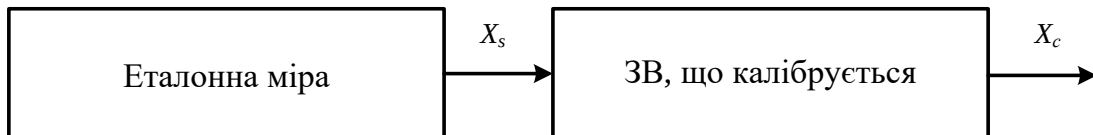


Рис. 2.1 Схема прямого вимірювання засобом вимірювань, що калібрується, величини, відтвореної еталонною мірою

Модельне рівняння (функція, яка описує процес утворення похибки) в цьому випадку має вигляд:

$$\Delta = X_c - X_s + \sum_{l=1}^L b_l, \quad (2.4)$$

де X_c – значення, яке виміряне ЗВ, що калібрується;

X_s – дійсне значення еталонної міри, зазначене у свідоцтві (сертифікаті) про калібрування;

b_l – впливні величини.

При багаторазових вимірюваннях оцінка x_c величини X_c визначається як середнє арифметичне результатів n спостережень x_{ci}

$$x_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ci} \quad (2.5)$$

Зазначеним вхідним величинам відповідають наступні стандартні невизначеності:

$u(x_c)$ – невизначеність, пов'язана з розсіюванням показів ЗВ, що калібрується, оцінена за типом А при виконанні багаторазових вимірювань [33]:

$$u(x_c) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_{ci} - x_c)^2} \quad (2.6)$$

де $u(x_s)$ – стандартна невизначеність калібрування еталонної міри, вказана у свідоцтві (сертифікаті) про калібрування;

$u(b_1)..u(b_L)$ – стандартні невизначеності впливних величин, оцінені за типом В

$$u(b_i) = \frac{|b_i|}{k_p}, \quad (2.7)$$

де k_p отримується з довідкових таблиць.

Сумарна стандартна невизначеність калібрування дорівнює:

$$u(\Delta) = \sqrt{u^2(x_c) + u^2(x_s) + \sum_{l=1}^L u^2(b_l)} \quad (2.8)$$

Ефективне число ступенів свободи ν_{eff} для цього випадку буде визначатися за формулою:

$$\nu_{eff} = (n-1)[u(\Delta)/u(x_c)]^4. \quad (2.9)$$

Бюджет невизначеності наведено у табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Бюджет невизначеності прямих вимірювань ЗВ, що калібрується, величини, відтвореною еталонною мірою

Вхідна величина	Оцінка вхідної величини	Стандартна невизначеність	Тип оцінки (А, В)	Число ступенів свободи	Розподіл ймовірностей вхідної величини	Коефіцієнт чутливості	Внесок у невизначеність
X_c	(6.2)	(6.3)	А	$n-1$	Нормальний	1	$u(x_c)$
X_s	x_s	$u(x_s) = \frac{U(x_s)}{2}$	В	∞	Нормальний	-1	$-u(x_s)$
b_1	0	$u(b_1) = \frac{ b_1 }{k_p}$	В	∞	(відповідний закон розподілу)	1	$u(b_1)$
...	...	...	...	...	...	...	...
b_L	0	$u(b_L) = \frac{ b_L }{k_p}$	В	∞	(відповідний закон розподілу)	1	$u(b_L)$

Вихідна величина	Оцінка вихідної величини	Сумарна стандартна невизначеність		Ефективне число ступенів свободи	Рівень довіри	Коефіцієнт охоплення	Розширена невизначеність
Δ	(6.1)	(6.5)		(6.6)	$P=0,95$	$t_{0,95}(v_{eff})$	(5.3)

Безпосереднє звірення засобу вимірювань, що калібрується, з еталонним засобом вимірювань

Схема калібрування для цього випадку наведена на рис. 2.2.

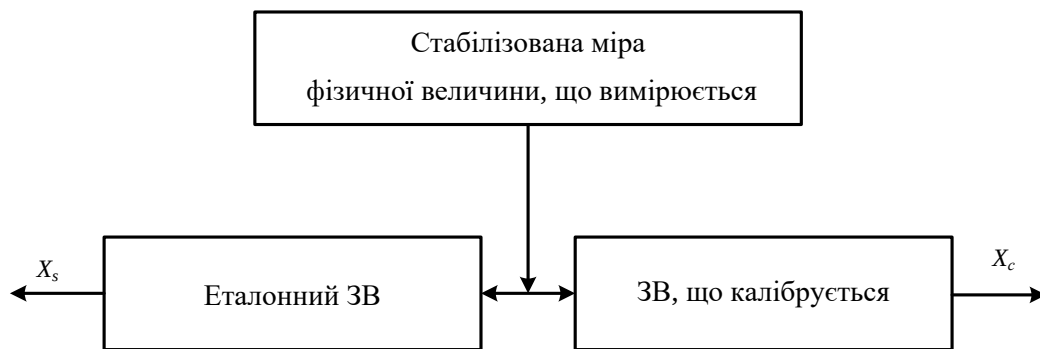


Рис. 2.2. Схема безпосереднього звірення ЗВ, що калібрується, з еталонним ЗВ

Як джерело сигналу вимірювальної інформації виступає стабілізована міра фізичної величини, що вимірюється: $\Delta = X_{\text{вим}} - X_{\text{іст}}$.

Модельне рівняння в цьому випадку має вигляд:

$$\Delta = X_c - (X_s + \Delta_s) + \sum_{l=1}^L b_l, \quad (2.10)$$

де X_c – значення, яке виміряне ЗВ, що калібрується; X_s – значення, яке виміряне еталонним ЗВ; Δ_s – поправка до показів еталонного ЗВ за результатами його калібрування [33]; b_l – впливні величини.

Вхідний сигнал для еталонного ЗВ і ЗВ, що калібрується, той самий, тому при одночасному вимірюванні ними величини, яка відтворюється стабілізованою мірою, може виникнути кореляція між їхніми показами, яку необхідно враховувати. Оскільки в даному випадку вимірювання є

погодженими, для спрощення формули сумарної стандартної невизначеності використовується метод приведення [33].

При багаторазових вимірюваннях оцінки x_c і x_s результат калібрування буде визначатися за формулою [3]

$$(x_c - x_s) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ci} - x_{si}). \quad (2.11)$$

Величина Δ_s та її невизначеність отримуються з свідоцтва(сертифікату) про калібрування еталонного ЗВ.

Сумарна стандартна невизначеність калібрування дорівнює:

$$u(\Delta) = \sqrt{u^2(x_c - x_s) + u^2(\Delta_s) + \sum_{l=1}^L u^2(b_l)}, \quad (2.12)$$

де $u(x_c - x_s)$ – стандартна невизначеність, пов'язана з розсіюванням різниці показів ЗВ, що калібрується та еталонного ЗВ, оцінена за типом А:

$$u(x_c - x_s) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n ((x_{ci} - x_{si}) - (x_c - x_s))^2} \quad (2.13)$$

Розподіл ймовірностей вхідної величини підпорядковується нормальному закону. Ефективне число ступенів свободи ν_{eff} для цього випадку дорівнює:

$$\nu_{eff} = (n-1) [u(\Delta) / u(x_c - x_s)]^4. \quad (2.14)$$

Бюджет невизначеності наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Бюджет невизначеності безпосереднього звірення ЗВ, що калібрується та еталонного ЗВ

Вхідна величин а	Оцінка вхідної величини	Стандартна невизначені сть	Тип оцінк и (А, В)	Число ступенів свободи	Розподіл ймовірносте й вхідної величини	Коефі- цієнт чутлив ості	Внесок у невизна- ченість
$X_c - X_s$	(6.8)	(6.10)	А	$n-1$	Нормальни й	1	$u(x_c - x_s)$
Δ_s	Δ_s	$u(\Delta_s) = \frac{U(\Delta_s)}{2}$	В	∞	Нормальни й	-1	$u(\Delta_s)$
b_1	0	$u(b_1) = \frac{ b_1 }{k_p}$	В	∞	(відповідни й закон розподілу)	1	$u(b_1)$

...	...	...	...	...	...	...	...
b_L	0	$u(b_L) = \frac{ b_L }{k_p}$	B	∞	(відповідний закон розподілу)	1	$u(b_L)$
Вихідна величина	Оцінка вихідної величини	Сумарна стандартна невизначеність		Ефективне число ступенів свободи	Рівень довіри	Коефіцієнт охоплення	Розширення невизначеність
Δ	(6.7)	(6.9)		(6.11)	$P = 0,95$	$t_{0,95}(v_{eff})$	(5.3)

2.3.4. Опосередковане відтворення декількома еталонними мірами величини, яка вимірюється ЗВ, що калібрується

У цьому випадку фізична величина, яка вимірюється ЗВ, що калібрується, відтворюється за допомогою декількох еталонних мір. Схема калібрування наведена на рис. 2.3.



Рис. 2.3. Схема опосередкованого відтворення декількома еталонними мірами величини, яка вимірюється ЗВ, що калібрується

Модельне рівняння в цьому випадку має вид:

$$\Delta = X_c + \sum_{l=1}^{Lc} b_l^c - f(X_{1s}, X_{2s}, \dots, X_{ms}, b_1^s, b_2^s, \dots, b_{Ls}^s), \quad (2.15)$$

де X_c – значення, виміряне ЗВ, що калібрується; X_{1s}, X_{2s}, X_{ms} – дійсні значення еталонних мір, зазначені у свідоцтвах (сертифікатах) про калібрування; b_l^c –

впливні величини, пов'язані з засобом вимірювання, що калібрується; b_l^s – впливні величини, пов'язані з використанням еталонних мір.

При багаторазових вимірюваннях оцінка x_c величини X_c визначається як середнє арифметичне результатів n спостережень x_{ci}

$$x_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ci}. \quad (2.16)$$

Зазначеним вхідним величинам відповідають наступні стандартні невизначеності:

$u(x_c)$ – невизначеність, пов'язана з розсіюванням показів ЗВ, що калібрується та оцінена за типом А:

$$u(x_c) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_{ci} - x_c)^2}, \quad (2.17)$$

$u(x_{1s}), u(x_{2s}), \dots, u(x_{ms})$ – стандартні невизначеності калібрування еталонних мір, вказані в їх свідоцтвах (сертифікатах) про калібрування; $u(b_1^c) \dots u(b_{Lc}^c)$, $u(b_1^s) \dots$

$u(b_{Ls}^s)$ – стандартні невизначеності впливних величин, оцінені за типом В:

$u(b_i) = \frac{|b_i|}{k_p}$, де k_p отримується з довідкових таблиць [33].

Сумарна стандартна невизначеність калібрування дорівнює

$$u(\Delta) = \sqrt{u^2(x_c) + \sum_{l=1}^{Lc} u^2(b_l^c) + \sum_{i=1}^m c_i^2 u^2(x_{is}) + \sum_{l=1}^{Ls} c_{m+l}^2 u^2(b_l^s)}, \quad (2.18)$$

де c_j – коефіцієнти чутливості, що визначаються як часткові похідні модельного рівняння по кожній вхідній величині:

$$\begin{aligned} c_j &= \frac{\partial \Delta}{\partial x_{js}}, \quad j = 1 \dots m; \\ c_j &= \frac{\partial \Delta}{\partial b_j^s}, \quad j = m+1 \dots m+Ls. \end{aligned} \quad (2.19)$$

Ефективне число ступенів свободи ν_{eff} для цього випадку буде визначатися за формулою

$$v_{eff} = (n - 1)[u(\Delta) / u(x_c)]^4 \quad (2.20)$$

Бюджет невизначеності наведено у табл. 2.3 [33].

Таблиця 2.3

Бюджет невизначеності опосередкованого відтворення декількома еталонними мірами величини яка вимірюється ЗВ, що калібрується

Вхідна величина	Оцінка вхідної величини	Стандартна невизначеність	Тип оцінки (А, В)	Число ступенів свободи	Розподіл ймовірностей вхідної величини	Коефіцієнт чутливості	Внесок у невизначеність
X_c	(6.13)	(6.14)	А	$n - 1$	Нормальний	1	$u(x_c)$
X_{1s}	x_{1s}	$u(x_{1s}) = \frac{U(x_{1s})}{2}$	В	∞	Нормальний	(6.16)	$c_1 u(x_{1s})$
...	...	...	...	...	...	...	...
X_{ms}	x_{ms}	$u(x_{ms}) = \frac{U(x_{ms})}{2}$	В	∞	Нормальний	(6.16)	$c_m u(x_{ms})$
b_1^c	0	$u(b_1^c) = \frac{ b_1^c }{k_p}$	В	∞	(відповідний закон розподілу)	1	$u(b_1^c)$
...	...	...	...	...	...	...	...
b_{Lc}^c	0	$u(b_{Lc}^c) = \frac{ b_{Lc}^c }{k_p}$	В	∞	(відповідний закон розподілу)	1	$u(b_{Lc}^c)$
b_1^s	0	$u(b_1^s) = \frac{ b_1^s }{k_p}$	В	∞	(відповідний закон розподілу)	(6.16)	$c_{m+1} u(b_1^s)$
...	...	...	...	...	...	...	...
b_{Ls}^s	0	$u(b_{Ls}^s) = \frac{ b_{Ls}^s }{k_p}$	В	∞	(відповідний закон розподілу)	(6.16)	$c_{m+Ls} u(b_{Ls}^s)$
Вихідна величина	Оцінка вихідної величини	Сумарна стандартна невизначеність		Ефективне число ступенів свободи	Рівень довіри	Коефіцієнт охоплення	Розширення невизначеність
Δ	(6.12)	(6.15)		(6.17)	$P = 0,95$	$t_{0,95}(v_{eff})$	(5.3)

3. МЕТОДИКА КАЛІБРУВАННЯ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ

3.1. Сфера призначення

Дана методика визначає порядок проведення, зміст і об'єм робіт по виконанню калібрування манометрів, вакуумметрів та барометрів.

Ця методика містить :

- Процедуру визначення абсолютного відхилення показань манометрів, вакуумметрів зразкових, технічних, електроконтактних, шинних класу точності 0,25 та нижче.
- Процедуру визначення абсолютного відхилення показань барометрів метеорологічних;
- Порядок розрахунку невизначеності вимірювань при калібруванні;
- Вказівки щодо оформлення результатів калібрування.

Ця методика встановлює порядок проведення калібрування манометрів, вакуумметрів, та барометрів вказаних вище типів(далі - прилади), що виробляються в Україні та ввозяться з-за кордону, та які призначені для вимірювання тиску.

Ця методика є стандартом ТОВ "ТЕСТМЕТРСТАНДАРТ" та може бути застосована лише персоналом ТОВ "ТЕСТМЕТРСТАНДАРТ".

Посилання

У цій методиці є посилання на такі документи:

ДСТУ ENISO / ІЕС 17025:2019 Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій [27].

МПУ 003/04-2014 Рекомендації. Метрологія. Манометри, вакуумметри, мановакуумметри, напороміри, тягоміри і тягонапороміри показуючі та самописні. Методика повірки [28].

ГОСТ 23696-79 Барометри мембранні метеорологічні. Технічні умови [29].

ЕА-4/02 Evaluation of the uncertainty of measurement in calibration (Вираз невизначеності вимірювань при калібруванні) [30].

3.2. Засоби калібрування

Для проведення калібрування застосовуються еталони, що наведені у таблиці 3.1. Допускається застосовувати інше еталонне обладнання, при цьому методика повинна пройти додаткове оцінювання згідно П-24“Оцінювання придатності (валідація) методів”.

Таблиця 3.1 Еталони для проведення калібрування

Назва операції	Номер пункту методики	Робочі еталони, устаткування, технічні та метрологічні характеристики
1	2	3
Контроль умов виконання калібрування	4	Барометр-анероїд БАММ-1, 80–120 кПа; Термогігрометр цифровий Т-06, 0–50 °С, 20–95 %
Зовнішній огляд. Опробування	7	-
Проведення вимірювань та визначення показів. Процедура оцінки невизначеності вимірювань.	8	Еталони: Манометр з умовною шкалою МВ (Діапазон 0 – 2,5 кгс/см ²); Манометр з умовною шкалою МВ (Діапазон 0 – 60 кгс/см ²); Манометр з умовною шкалою МВ (Діапазон 0 – 16 кгс/см ²); Барометр електронний Testo 511. Допоміжне обладнання: Засіб для створення тиску МП-60, Термобарокамера ТВV1000-V (-70 до +120°С; 0 - 1,33 гПа); Калібратор тиску СРН7000 -1...+25 бар, 0,025% від діапазону, Перетворювач тиску СРТ7000 0...100 бар, G1/2В, -20...+80°С, 0,025 % від діапазону

Устаткування, що застосовується під час калібрування, повинне бути відкаліброваним для забезпечення простежуваності вимірювань. Також, устаткування повинне бути перевірене на предмет встановлення його відповідності технічним вимогам, що встановлені у відповідних ЕД.

Дозволяється застосування інших засобів допоміжного обладнання з характеристиками не гірше ніж зазначені в таблиці 3.1.

3.3. Умови проведення калібрування

1 Калібрування проводять за наступних умов:

- температура навколишнього повітря в приміщенні має бути $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$.
- відносна вологість навколишнього повітря - не більше $(60 \pm 20) \%$.
- атмосферний тиск від 84 до 106 кПа.

2. Зміна температури під час проведення калібрування манометра не повинна перевищувати 5°C за кожні 30 хвилин.

3. Швидкість вимірювання тиску під час калібрування манометра - не більше 5% від найбільшого значення вимірювання за 1 с; зміна тиску під час вимірювань повинна бути павною та монотонною.

4. Стороння вібрація під час калібрування манометра не повинна створювати розмах коливань стрілки приладу більше 0,1 частки найменшої поділки шкали.

3.4. Вимоги безпеки при проведенні калібрування

1. До проведення калібрування допускаються особи, що мають досвід роботи з приладами, та пройшли інструктаж з охорони праці у встановленому ТОВ "ТЕСТМЕТРСТАНДАРТ" порядку.

2. При проведенні калібрування повинні виконуватись :

- вимоги НПАОП 40.1-1.21;
- під час роботи необхідно дотримуватись вимог розділів "Вимоги техніки безпеки" технічних описів на устаткування, що використовується.

3. Під час проведення робіт необхідно виконувати правила охорони праці, встановлені інструкцією з охорони праці на даний вид робіт, а також правила, вказані в експлуатаційних документах на конкретне устаткування.

4. Робочі середовища приладів повинні відповідати їх документації.

Допускається застосування інших середовищ, що не викликають корозії деталей і вузлів приладу, якщо вони обговорені в технічній документації на прилад.

5. Забороняється створювати тиск при вимірюваннях, що перевищує верхню межу вимірювань приладу.

Вимоги до кваліфікації персоналу

За цією методикою можуть працювати фахівці, що атестовані та уповноважені на виконання даного виду робіт.

Працівники, що проводять калібрування, повинні знати принцип дії, конструкцію манометрів, вакуумметрів та барометрів і правила роботи приладів та іншого устаткування, що застосовуються під час калібрування.

3.5. Підготовка до калібрування

1. *Перед проведенням вимірювань прилад потрібно витримати в приміщенні лабораторії, де буде проводитися калібрування, впродовж:*

- 12 годин при різниці температур повітря в приміщенні для калібрування та місцем, звідки внесений прилад, більше 10 °С;
- 1 години при різниці температур повітря в приміщенні для калібрування та місцем, звідки внесений прилад, від 1 °С до 10 °С.

При різниці зазначених температур менше 1 °С витримка не потрібна.

2. Зовнішній огляд

При зовнішньому огляді повинна бути встановлена :

- відповідність прилада вимогам НДВ частині якості поверхонь, оцифрування і штрихів шкал, комплектності та маркування.

Прилад не повинен мати механічних пошкоджень корпусу і штуцера, що перешкоджають приєднанню і не забезпечують герметичність та міцність з'єднання, стрілки, скла і циферблату, що впливають на експлуатаційні властивості.

Скло і циферблат не повинні мати дефектів, що перешкоджають правильному відліку показань.

З'єднання корпусу манометра з тримачем або штуцером повинно бути міцним, що виключає їх взаємне зміщення.

Прилади, забраковані при зовнішньому огляді, подальшому калібруванню не підлягають.

Результати зовнішнього огляду заносять в протокол згідно додатка А.

3. Опробування манометра та вакуумметра

Прилад, якій калібрується, встановлюється на пристрій для створення тиску в робоче положення, згідно позначки на його корпусі (або в технічній документації). Якщо документації немає, то прилад встановлюється так, щоб вісь симетрії, яка проходить через штуцер приладу, була вертикальна.

Торець штуцера приладу що калібрується, повинен знаходитися в одній горизонтальній площині з торцем еталонного манометра, з допустимим відхиленням $\pm 50\text{мм}$.

Прилад витримується під тиском, який дорівнює значенню верхньої межі вимірювань, на установці для створення тиску впродовж 5 хвилин. При цьому перевіряється герметичність ущільнення між штуцером і гніздом пристрою для створення тиску. Ущільнення вважається герметичним, якщо покази приладу не зменшуються на протязі цих 5 хвилин більше ніж на 2% встановленого тиску.

Після витримки під тиском перевіряється положення стрілки приладу відносно нульової позначки шкали:

- стрілку приладу, що має коректор нуля, при відхиленні її від нульової позначки, встановлюють на нульову позначку. Коректор нуля повинен забезпечувати переміщення стрілки в кожную сторону від нульової позначки не менш ніж на 2 умовні одиниці;

- у приладів без коректора нуля стрілка повинна знаходитися на нульовій позначці з допустимим відхиленням, що не перевищує межі допустимої основної похибки.

Переміщення стрілки в межах всієї шкали при збільшенні та зменшенні тиску повинно бути плавним.

Технічні манометри з електроконтактним сигнальним пристроєм перевіряють на спрацювання сигнального пристрою, відхилення спрацювання якого визначають не менше ніж на трьох відмітках шкали. Дроти від сигнального пристрою приєднують до джерела світлового або звукового сигналу.

Результати опробувань заносять в протокол згідно додатка А.

Опробування барометра.

Переміщення стрілки в робочому діапазоні шкали плавне, без сачків.

Зсув стрілки, після легкого постукування пальцем по корпусу приладу при його робочому положенні, не повинен перевищувати половини поділки шкали.

Механізм барометра надійно закріплений в корпусі і не переміщається при його струшуванні.

3.6. Опис процедури калібрування

3.6.1. Опис процедури калібрування манометрів та вакуумметрів

1. Проведення вимірювань та визначення показів приладу.
2. При калібруванні приладів застосовується метод порівняння з еталоном.

Калібрування проводиться в лабораторних умовах.

Як джерело сигналу вимірювальної інформації виступає тиск, що створює установка і який фактично вимірюється приладом та еталонним ЗВ.

3. Прилад що калібрується витримують впродовж 5 хвилин під тиском, рівним значенню верхньої межі вимірювання. Потім визначають

покази 0 значення калібруємого приладу та фіксують їх в протоколі (додаток А), а також проводять серію вимірювань:

- для манометрів з класом 0,25; 0,4; 1,5; 2,5; 4,0 в кожній точці, що калібрується: 1 спостереження при підвищенні тиску, 1 спостереження при зниженні тиску;

Схема калібрування.

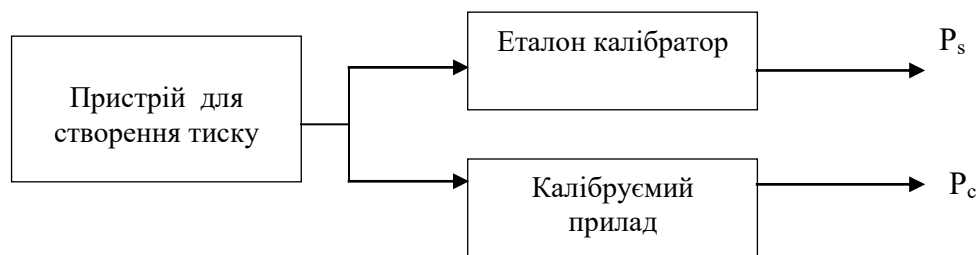


Рис. 3.1. Схема безпосереднього зв'язування приладу, що калібрується, з еталонним ЗВ

Плавно підвищуючи тиск в системі, проводять відлік показань на заданих калібруємих відмітках шкали. Доцільно значення (стрілку) еталонного приладу фіксовано встановлювати в калібруємій точці, а всі спостереження проводити за приладом, що калібрується. З таблю приладу що калібрується, з інтервалом не менше 5 секунд, знімають показання в одиницях його вимірювання.

На верхній межі вимірювань прилади витримують під тиском протягом 5 хвилин. Після цього тиск плавно знижують. Калібрування приладу і відлік показань проводять при тих же значеннях тиску, що і при підвищенні. Стандартним варіантом є – коли кожен серію вимірювань проводять при 5 значеннях тиску (калібруємих точках шкали). Точки, що підлягають калібруванню, мають бути рівномірно розподілені в межах усієї шкали приладу.

4. Усі виміряні значення тиску використовуються для оцінювання невизначеності вимірювання в кожній точці калібрування, а також фіксуються в протоколі (додаток А).

5. Замовник, виходячи з виробничої доцільності, має право самостійно визначати необхідну кількість та значення калібруємих точок приладу.

6. В процесі калібрування приладу оцінюють різницю ΔP між результатом вимірювання P_c приладом що калібрується, та значенням еталонного манометра P_s

$$\overline{\Delta P} = \overline{P}_c - (P_s + \Delta P_s)$$

де $\overline{P}_c$ – середнє значення показання прилада, що калібрується, (од.вим).

$$\overline{P}_c = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 P_{ci}$$

P_{ci} - покази приладу, що калібрується при навантаженні та розвантаженні;

P_s – покази еталонного приладу;

ΔP_s – поправка до показів еталонного манометра.

7. Також в процесі калібрування приладу оцінюють різницю між результатами вимірювань при підвищенні та зниженні тиску, визначаючи варіацію пружної характеристики (гистерезис).

$$\Delta P_h = |P_{c1} - P_{c2}|$$

де P_{c1} - покази приладу що калібрується (підвищення тиску);

P_{c2} - покази приладу що калібрується (зниження тиску);

3.6.2. Оцінювання невизначеності вимірювання під час калібрування манометрів та вакуумметрів. Модельне рівняння

$$u(\Delta P) = \sqrt{u^2(\delta P_0) + u^2(\delta P_h) + u^2(\delta P_t) + u^2(\delta P_{cr}) + u^2(\delta P_{dr}) + u^2(\delta P_s)}$$

$u(\delta P_0) = \frac{\Delta P_0}{2\sqrt{3}}$ – невизначеність встановлення нульового значення;

де ΔP_0 – відхилення показів стрілки від нульового значення;

$u(\delta P_h) = \frac{\Delta P_h}{\sqrt{3}}$ – невизначеність що враховує гистерезис

$u(\delta P_t)$ – поправка на відхилення температури від нормованої при калібруванні технічних, електроконтактних, шинних манометрів класу

точності 1,5; 2,5; 4,0 незначна, та не вносить суттєвий вплив на розрахунок невизначеності, тому її значення приймаються рівними нулю

$u(\delta P_{cr}) = \frac{q}{4\sqrt{3}}$ – стандартна невизначеність, обумовлена кінцевою роздільною здатністю калібрувального приладу з аналоговим відліковим пристроєм (q – ціна поділки приладу);

$u(\delta P_{cr}) = \frac{q}{2\sqrt{3}}$ – стандартна невизначеність, обумовлена кінцевою роздільною здатністю калібрувального приладу з цифровим відліковим пристроєм (q – дискретність);

$(\delta P_{dr}) = \frac{D}{\sqrt{3}}$ – стандартна невизначеність через дрейф показів еталонного манометра від часу останнього калібрування (D – оцінка дрейфу від часу останнього калібрування, в разі відсутності оцінки дрейфу $u(\delta P_{dr}) \approx U_{cal} / k(p)$).

$u(\delta P_s) = \frac{U_{cal}(P_s)}{k(p)}$ – розширена невизначеність калібрування еталонного манометра та відповідний коефіцієнт охоплення (із свідчення про калібрування еталонного манометра).

Розширену невизначеність відхилення вимірювання P - для рівня довіри $p = 0,95$ розраховують за формулою:

$$U(\Delta P) = k \cdot u(\Delta P)$$

де k - коефіцієнт охоплення ($k = 2$ – рівень довіри 95%, якщо припустити що розподіл нормальний, та $k = 1,65$ – рівень довіри 95%, якщо припустити що розподіл рівномірний).

Спосіб розрахунку невизначеності вимірювань – автоматичний, за допомогою програми exel. Оцінювання комп'ютерного програмного забезпечення проводиться шляхом співставлення результатів розрахунків обчислень і аналізу, отриманих паралельно на комп'ютері та вручну. Результати оцінювання документують в Бюджеті невизначеності вимірювання, та заносять в протокол (Додаток А).

3.7. Опис процедури калібрування барометрів

1. Проведення вимірювань та визначення показів приладу.
2. При калібруванні приладів застосовується метод порівняння з еталоном.

Калібрування проводиться в лабораторних умовах.

Як джерело сигналу вимірювальної інформації виступає тиск, що створює термобарокамера і який фактично вимірюється приладом, та еталонним ЗВ.

Схема калібрування

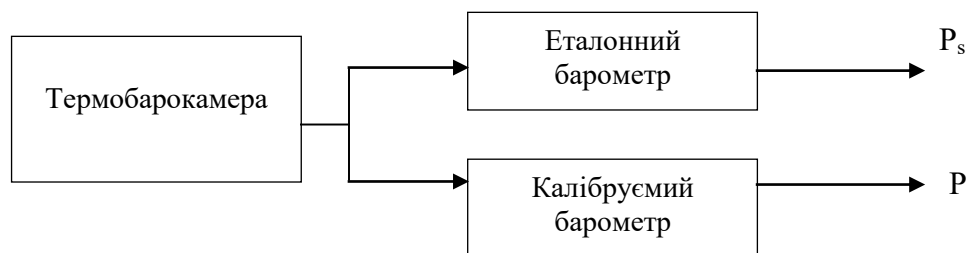


Рис. 3.2. Схема безпосереднього звірення приладу, що калібрується, з еталонним ЗВ.

3. Помістити в термобарокамеру прилад що калібрується;
4. Встановити значення температури 20°C в середині барокамери;
5. Серію з вимірювань, проводять при підвищенні та зниженні тиску, та фіксують значення показів приладу що калібрується в протоколі (Додаток В);
6. Якщо кількість точок не вказана замовником, виконують калібрування трьох точок (50%, 70%, 90% значення шкали приладу) . Спочатку встановлюють значення 50% шкали, потім 70%, а потім 90%., після чого зменшують тиск, встановлюючи точки 70%, та 50% шкали. Покази

приладу що калібрується на кожній відмітці шкали відраховують після стабілізації тиску та температури, не менш ніж через 2 хвилини.

7. В процесі калібрування барометра оцінюють різницю ΔP між результатом вимірювання P_c барометром, що калібрується, та значенням еталонного барометра P_s

$$\overline{\Delta P} = \bar{P} - (\bar{P}_s + \Delta P_s)$$

де $\bar{P}$ – середнє із показів барометра, що калібрується.;

$\bar{P}_s$ – середнє із показів еталонного барометра;

ΔP_s – поправка до показів еталонного барометра із свідоцтва калібрування.

8 Також в процесі калібрування барометра оцінюють різницю між результатами вимірювань при підвищенні та зниженні тиску, визначаючи варіацію.

$$V = |P_1 - P_2|$$

де P_1 - покази приладу що калібрується (підвищення тиску);

P_2 - покази приладу що калібрується (зниження тиску);

Оцінювання невизначеності вимірювання під час калібрування барометрів.

Модельне рівняння

$$\Delta P = \bar{P} + \delta P_t + \delta P_v + \delta P_{tr} + \delta P_b + \delta P_{cr} - (\bar{P}_s + \Delta P_s + \delta P_s + \delta P_{dr})$$

P_v – поправка на варіацію;

δP_t – поправка, що враховує вплив на покази приладу, при відхиленні температури в середині барокамери від нормованої, під час калібрування;

δP_{tr} – поправка, що враховує вплив невизначеності по температурі барокамери (із свідоцтва калібрування барокамери);

δP_b – поправка, що враховує невизначеність по тиску барокамери (із свідоцтва калібрування);

δP_{cr} — поправка до показів приладу що калібрується через його кінцеву роздільну здатність;

δP_s – поправка, що враховує невизначеність еталонного приладу (із свідоцтва про калібрування еталону);

δP_{dr} — поправка через дрейф показів еталонного барометра;

Сумарну стандартну невизначеність вимірювання відхилення визначення тиску приладу, що калібрується оцінюють за формулою:

$$u(\Delta P) = \sqrt{u^2(\delta P_t) + u^2(\delta P_v) + u^2(\delta P_{tr}) + u^2(\delta P_b) + u^2(\delta P_{cr}) + u^2(\delta P_{dr}) + u^2(\delta P_s)}$$

$$u(\delta P_{tr}) = \frac{U_{cal}(T_b)}{k(p)} - \text{невизначеність що враховує сумарну невизначеність}$$

по температурі барокамери із свідоцтва про калібрування, та відповідний коефіцієнт охоплення

$$CB = \frac{a + bt + ct^2 + dt^3 + k(Pk - P)}{\sqrt{3}}, \text{ де } a, b, c, d, k, Pk - \text{типові коефіцієнти}$$

температурної залежності, наведені в паспорті на барометр;

$$u(\delta P_v) = \frac{V}{\sqrt{3}} - \text{невизначеність що враховує варіацію}$$

$$u(\delta P_t) = \frac{a + bt + ct^2 + dt^3 + k(Pk - \bar{P})\Delta t}{\sqrt{3}} - \text{стандартна невизначеність, що}$$

враховує вплив на покази приладу, при відхиленні температури в середині барокамери від нормованої, під час калібрування. (Δt – поправка на температуру 20 °C із свідоцтва калібрування барокамери, $\bar{P}$ - середнє значення показів приладу що калібрується).

$(\delta P_{cr}) = \frac{q}{4\sqrt{3}}$ – стандартна невизначеність, обумовлена кінцевою роздільною здатністю приладу що калібрується з аналоговим відліковим пристроєм (q – ціна поділки приладу);

$u(\delta P_{cr}) = \frac{q}{2\sqrt{3}}$ – стандартна невизначеність, обумовлена кінцевою роздільною здатністю приладу що калібрується з цифровим відліковим пристроєм (q – дискретність);

$u(\delta P_{dr}) = \frac{D}{\sqrt{3}}$ – стандартна невизначеність через дрейф показів еталонного барометра від часу останнього калібрування (D – оцінка дрейфу від часу останнього калібрування, в разі відсутності оцінки дрейфу $u(\delta P_{dr}) = 0$).

$u(\delta P_s) = \frac{U_{cal}(P_s)}{k(p)}$ – розширена невизначеність калібрування еталонного барометра та відповідний коефіцієнт охоплення (із свідоцтва про калібрування еталонного барометра).

$u(\delta P_b) = \frac{U_{cal}(P_b)}{k(p)}$ – розширена невизначеність калібрування барокамери, та відповідний коефіцієнт охоплення (із свідоцтва про калібрування), в разі відсутності $u(\delta P_b) = \frac{\Delta P_b}{\sqrt{3}}$ де ΔP_b – коливання тиску в середині барокамери (з паспорту)

Розширену невизначеність відхилення вимірювання P - для рівня довіри $p = 0,95$ розраховують за формулою:

$$U(\Delta P) = k \cdot u(\Delta P)$$

де k - коефіцієнт охоплення ($k = 2$ – рівень довіри 95%, якщо припустити що розподіл нормальний, та $k = 1,65$ – рівень довіри 95%, якщо припустити що розподіл рівномірний). Спосіб розрахунку невизначеності вимірювань – автоматичний, за допомогою програми exel. Оцінювання комп'ютерного програмного забезпечення проводиться шляхом співставлення результатів розрахунків обчислень і аналізу, отриманих паралельно на комп'ютері та вручну. Результати оцінювання документують в Бюджеті невизначеності вимірювання, та заносять в протокол (Додаток В).

Оформлення результатів калібрування

Результати калібрування необхідно оформити свідоцтвом про калібрування по формі Ф

3.8. Приклад виконання калібрування

У додатках наведено протоколи калібрування манометр електроконтактний ЕКМ-1У і Мановакуумметр показуючий МВПЗ-У.

3.8.1. Манометр електроконтактний ЕКМ-1У 0...1 кгс/см²

Електроконтактні манометри ЕКМ-1У (рис. 2.3) призначені для вимірювання надлишкового тиску рідин, газу і пари і управління зовнішніми електричними ланцюгами шляхом включення і виключення контактів в схемах сигналізації, автоматики і блокування технологічних процесів [32].

Електроконтактні манометри ЕКМ-1У виготовляються з замикаючими та розмикаючими контактами сигнального пристрою, мають установку на спрацювання при верхньому і нижньому заданих значеннях тиску.



Рис. 2.3. Манометр електроконтактний ЕКМ-1У

Технічні характеристики

- Клас точності – 1,5
- Різьба приєднувального штуцера – M20x1,5
- Розмір квадрата під ключ – 17x17 мм
- Допустима похибка спрацьовування сигналізує пристрою в процентах від суми меж вимірювань — $\pm 2,5$
- Робоча напруга – 220В постійного або змінного струму з частотою 50 Гц
- Розривне потужність контактів сигналізує пристрою при омічний навантаженні – 10ВА
- Маса приладів, кг, не більше – 2,5
- Діапазон показань приладів (kgf/cm^2)
- 1; 1,6; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 40; 60; 100

Характеристики

Назва	Манометр електроконтактний ЕКМ-1У 0...1 кгс/см^2
Тип приладу	Електроконтактний
Діаметр	$\varnothing$ 160 мм
Діапазон вимірювань	0...1 кгс/см^2
Матеріал корпусу	Сталь
Приєднання	Радіальне
Різьба	M20x1,5
Ступінь захисту	IP40
Клас точності	1,5

3.8.2. Мановакуумметр показуючий МВПЗ-У

Манометри, вакуумметри і мановакуумметри показуючі МПЗ-У, ВПЗ-У і МВПЗ-У (рис. 2.4) призначені для вимірювання надлишкового і вакуумметричного тиску неагресивних, що не кристалізуються по

відношенню до мідних сплавів рідин, пари і газу, в тому числі кисню, ацетилену, хладонів 12, 13, 22, 142, 502, 134а і 404а [31].



Рис. 2.4. Мановакуумметр показуючий МВПЗ-У

Прилади можуть поставлятися з демпфером.

Основні технічні характеристики

Діапазони показів приладів:

- МПЗ-У - від 0 до 0,6; 1; 1,6; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 40; 60; 100; 160; 250; 400; 600; 1000; 1600 кгс/см²
- ВПЗ-У - від -1 до 0 кгс/см²
- МВПЗ-У - від -1 до 0,6; 1,5; 3; 5; 9; 15; 24 кгс/см²

За замовленням прилади поставляються в одиницях виміру кПа, МПа

Діаметр корпусу -100 мм

Клас точності приладів - 1,5 (за замовленням 1,0)

Ступінь захисту IP40 (за замовленням - IP53)

Маса приладів - не більше 0,7 кг

Середній термін служби - 10 років

Матеріали деталей:

- корпус - сталь, алюмінієвий сплав, ударостійкий полістирол
- скло - технічне
- трубчаста пружина - мідний сплав, залізо-нікелевий сплав
- тримач - мідний сплав, сталь
- механізм - бронза, нержавіюча сталь, сталь 0,8 кп

Прилади витримують вплив вібрації в діапазоні частот від 5 до 25 Гц з амплітудою до 0,1 мм (група L3 по ГОСТ 12997-84)

Кліматичне виконання за ГОСТ 15150-69

- У2 - за замовчуванням прилади мають виконання У2 (діапазон робочих температур -50 до +60 °С)
- Т2 - за замовленням прилади мають виконання Т2 (діапазон робочих температур -50 до +60 °С)

Варіанти виконання:

- з радіальним штуцером без фланця
- з радіальним штуцером з заднім фланцем
- з осьовим штуцером з переднім фланцем
- з осьовим штуцером без фланця

Фланець для кріплення приладу на панелі

- -//- - за замовчуванням прилади поставляються без фланця
- Ф - за замовленням прилади поставляються з заднім розташуванням фланця

Вимірювана середа

- -//- - за замовчуванням рідина, пара, газ, у тому числі пропан бутан
- "кисень" - за замовленням виконання для вимірювання тиску рідкого, газоподібного кисню
- "ацетилен" - за замовленням виконання для вимірювання тиску ацетилену
- "хладон" - за замовленням виконання для вимірювання тиску хладонів (у примітці до замовлення вкажіть необхідність додаткової температурної шкали)

Різьба приєднувального штуцера

- -//- - за замовчуванням метрична різьба M20x1,5-8g
- G1/2-B - за замовленням дюймова різьба
- R1/2 - за замовленням конічна різьба

Технологічна риска на шкалі

- -//- - за умовчанням без риси
- "риска" - на замовлення нанесення технологічної лінії на циферблат (у примітці до замовлення обов'язково вкажіть на якій позначці)

Демпфер для гасіння пульсуючого тиску

- -//- за замовчуванням прилади поставляються без демпфера до 60 кгс/см² включно і з демпфером понад 100 кгс/см² включно
- демпфер - за замовленням демпфер встановлюється на прилад з будь-яким діапазоном показань

Варіант виконання

- -//- - за замовчуванням загальнопромислове виконання
- Е - за замовленням прилади виконуються для поставки на експорт
- АЕС - за замовленням прилади виконуються для поставки на атомні електростанції (АЕС)

ВИСНОВКИ

У результаті виконання кваліфікаційної роботи розроблено методологічне забезпечення калібрувальної лабораторії засобів вимірювання тиску.

В процесі роботи було виконано аналітичний огляд методів і засобів вимірювання тиску, розглянуто забезпечення єдності вимірювання тиску.

Було розроблено метрологічне забезпечення калібрувальної лабораторії. Наведено законодавчі вимоги до діяльності системи технічного регулювання та акредитація випробувальних лабораторій. Розглянуто оцінювання невизначеності при калібруванні.

Розроблено:

- алгоритми оцінювання збіжності та відтворюваності результатів випробування для оцінювання якості роботи лабораторії.

- методика калібрування засобів вимірювання тиску (засоби калібрування, умови проведення калібрування, вимоги безпеки при проведенні калібрування, підготовка до калібрування, процедури калібрування).

Виконано калібрування манометра електроконтактного ЕКМ-1У 0...1 кгс/см² та мановакуумметра показуючого МВПЗ-У.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1) Закон України про метрологію та метрологічну діяльність. – К.: №1314- VII-ВР, 05.06.2014 р
- 2) Вимірювання тиску. Навчальний посібник / І.С. Петришин, Б.М. Сафронов – Івано-Франківськ: Факел, 2004. – 269 с.
- 3) Вимірювання тиску в рідинах і газах. Методичні вказівки до лабораторної роботи №1 з дисциплін “Технічна механіка рідин і газів”, “Гідрогазодинаміка”, “Гідравліка, гідро- та пневмоприводи” // Укладачі В.М. Жук, А.С. Пасічник. – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2003. – 18 с.
- 4) Основи метрології та вимірювальної техніки: Підручник: У 2 т. / М. Дорожовець, В. Мотало, Б. Стадник, В. Василюк, Р. Борек, А. Ковальчук; За ред. Б. Стадника. – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2005. – Т.1. Основи метрології.-532 с.
- 5) Основи метрології та вимірювальної техніки: Підручник: У 2 т./ М. Дорожовець, В. Мотало, Б. Стадник, В. Василюк, Р. Борек, А. Ковальчук; За ред. Б. Стадника. – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2005. – Т.2. Вимірювальна техніка.-656 с.
- 6) Поліщук Є.С. Метрологія та вимірювальна техніка: підручник / Є.С.Поліщук, М.М. Дорожовець, В.О.Яцук, В.М.Ванько; за ред. проф. Є.С.Поліщука. – Львів: Видавництво Львівська політехніка, 2012. – 544 с.
- 7) Засоби та методи вимірювань неелектричних величин: підручник / Є.С. Поліщук, М.М. Дорожовець, Б.І. Стадник та ін.; за ред. Проф. Є.С.Поліщука – Львів : Вид-во “Бескид Біт”, 2008. - 618с.
- 8) Лукінюк М.В. Технологічні вимірювання та прилади: Навч. Посіб. – К.: НТУУ “КПІ”, 2007. –436с.
- 9) Цюцюра В.Д., Цюцюра С.В. Метрологія та основи вимірювань: Навч. посіб. – К.: Знання-Прес, 2003. – 180 с/
- 10) Головка Д.Б., Рего К.Г., Скрипник Ю.О. Основи метрології та вимірювань. - Київ.: Либідь, 2001. - 408 с.

- 11) Сусліков Л.М., Студеньк І.П. Метрологія та вимірювання: Навчальний посібник. – Ужгород: Видавництво УжНУ, 2014. - 292 с.
- 12) Кованько, В. В. Древецький, А. О. Христюк ; Нац. ун-т вод. госп-ва та природокористування. — Рівне : НУВГП, 2013. — 189 с.
- 13) Теплотехнічні вимірювання і прилади: навч. посіб. / А.Ф. Курилов, В.М. Козін. – Суми: Сумський державний університет, 2015. – 189 с.
- 14) <https://etalonpribor.com.ua/mp-60-manometr-gruzoporshnevoi.html>
- 15) ДСТУ OIML D 23:2008 Метрологія. Принципи метрологічного контролю обладнання для повірки (OIML D 23:1993, IDT)
- 16) ДСТУ 3711-98 Засоби вимірювань тиску. Терміни та визначення
- 17) ДСТУ 3388:2015 Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювання абсолютного тиску в діапазоні від $1 \cdot 10^{-8}$ Па до $1 \cdot 10^3$ Па
- 18) ДСТУ 3496:2015 Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювання абсолютного тиску в діапазоні від $2,7 \cdot 10^2$ Па до $4 \cdot 10^5$ Па
- 19) ДСТУ 4007-2001 Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювань надлишкового тиску в діапазоні від мінус 100 кПа до 250 МПа
- 20) ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019 Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій (EN ISO/IEC 17025:2017, IDT; ISO/IEC 17025:2017, IDT)
- 21) ДСТУ-Н РМГ 74:2009 Метрологія. Методи визначання міжповіркового та міжкалібрувального інтервалів засобів вимірювання (РМГ 74-2004, IDT). З Поправкою
- 22) ДСТУ 7224:2011 Манометри, мановакуумметри, вакуумметри, напороміри, тягонапороміри, тягоміри з пневматичними вихідними сигналами Методика повірки (калібрування)
- 23) ДСТУ OIML R 110:2013 Метрологія. Манометри вантажопоршневі (OIML R 110:1994, IDT)

