

О. Ю. Співак

**ТЕПЛОТЕХНІЧНІ
ВИМІРЮВАННЯ
ТА ПРИЛАДИ**

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

О. Ю. Співак

ТЕПЛОТЕХНІЧНІ ВИМІРЮВАННЯ ТА ПРИЛАДИ

Навчальний посібник

Вінниця
ВНТУ
2016

УДК 621.181.7

ББК 30.10я7

С39

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України (протокол № 3 від 25.10.2012р.).

Рецензенти:

О. В. Нахайчук, доктор технічних наук, професор

В. Ю. Кучерук, доктор технічних наук, професор

С. Й. Ткаченко, доктор технічних наук, професор

Співак О. Ю.

С39 Теплотехнічні вимірювання та прилади : навчальний посібник / О. Ю. Співак. – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 141 с.

В посібнику подано теоретичний матеріал для вивчення дисципліни «Теплотехнічні вимірювання та прилади». Основна увага приділялась фундаментальним основам методики вимірювання фізичних величин в теплоенергетичних та теплотехнічних процесах, викладені особливості компонування первинних та вторинних засобів вимірювання для досягнення достовірного результату вимірювань.

Призначений для студентів напряму підготовки 6.050601 – «Теплоенергетика».

УДК 621.181.7

ББК 30.10я7

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 ЗАГАЛЬНІ ПОНЯТТЯ ТА ПРИНЦИПИ ВИМІРЮВАНЬ ТЕПЛОТЕХНІЧНИХ ВЕЛИЧИН	7
1.1 Основні поняття та визначення.....	7
1.2 Засоби й методи вимірювань.....	10
1.3 Основні властивості вимірювальних приладів	11
1.4 Класифікація приладів для теплотехнічних вимірювань.....	11
1.5 Види засобів вимірювань	11
1.6 Похибки вимірювань та похибки засобів вимірювань	14
1.7 Повірка вимірювальних приладів.....	23
1.8 Метрологічні характеристики засобів вимірювань	24
2 ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ	25
2.1 Температура як характеристика термодинамічного стану	25
2.2 Міжнародна температурна шкала	26
2.3 Класифікація приладів для вимірювання температури.....	28
2.4 Рідинні термометри розширення.....	29
2.5 Дилатометричні (dilatometric) й біметалеві термометри.....	33
2.6 Манометричні термометри.....	34
2.7 Термоелектричні термометри.....	36
2.8 Компенсаційні проводи	41
2.9 Методи вимірювання термо-е.р.с.	42
2.10 Термометри опору та методи вимірювання опорів	45
2.11 Способи підключення термометрів опору	47
2.12 Логометр.....	49
2.13 Пірометри.....	52
3 МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПОТОКІВ. ТЕПЛОМІРИ.....	53
3.1 Використання енергії зміни агрегатного стану.....	54
3.2 Рідинно-ентальпійний метод	54
3.3 Електрометричний метод	55
3.4 Дилато-резистометричні й термоелектричні методи	56
3.5 Евапорографічний метод.....	58
3.6 Пневматичний і оптичний методи.....	59
3.7 Інерційні тепломіри.....	59
3.8 Фотоелектричні і радіометричні тепломіри	60

3.9 Компенсаційні радіометри	60
3.10 Метод допоміжної стінки	61
3.11 Тепломіри з поперечною складовою потоку	61
3.12 Аналітичні методи	62
3.13 Піроелектричні тепломіри	62
4 МЕТОДИ І ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ РІЗНИЦІ ТИСКІВ ТА РОЗРІДЖЕННЯ	63
4.1 U-подібні й чашкові манометри	64
4.2 Однотрубні манометри	66
4.3 Мікроманометри	67
4.4 Прилади для вимірювання тиску із пружними елементами	68
4.5 Пружні чутливі елементи	69
4.6 Прилади прямої дії для вимірювання тиску	72
4.7 Прилади тиску електричні. П'єзоелектричні манометри	72
4.8 Манометри опору	74
5 ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТ ТА КІЛЬКОСТІ РЕЧОВИНИ	74
5.1 Види витрат і витратомірів	74
5.2 Вимірювання витрат й кількості рідин за перепадом тиску в звужувальному пристрої	76
5.3 Методика використання звужувальних пристроїв	79
5.4 Вимірювання швидкостей і витрати напірними трубками	83
5.5 Витратоміри постійного перепаду тиску	85
5.6 Тахометричні витратоміри, лічильники кількості та електромагнітні витратоміри	87
5.7 Об'ємні витратоміри	91
5.8 Електромагнітні витратоміри	92
5.9 Ультразвукові витратоміри	94
5.10 Оптичні (лазерні) витратоміри	96
5.11 Вимірювання витрат методом контрольних "міток"	96
5.12 Відцентрові витратоміри	97
5.13 Вихрові витратоміри	98
5.14 Гідродинамічні витратоміри	99
5.15 Калориметричні й термоанемометричні витратоміри	99
6 ВИМІРЮВАННЯ РІВНЯ РІДИН ТА СИПКИХ ТІЛ	100
6.1 Рівнеміри з візуальним відліком	101

6.2 Механічні рівнеміри.....	102
6.3 Дифманометричні рівнеміри.....	106
6.4 Акустичні рівнеміри.....	107
6.5 Електричні рівнеміри.....	110
6.6 Оптичні рівнеміри.....	112
6.7 Теплові рівнеміри.....	113
6.8 Вимірювання рівня силких тіл.....	115
7 ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ ТІЛ І СЕРЕДОВИЩ	116
7.1 Основні поняття та визначення.....	116
7.2 Методи вимірювання вологості повітря і газу.....	117
7.3 Метод точки роси.....	121
7.4 Методи вимірювання вологості твердих і сипучих тіл.....	123
8 АНАЛІЗ СКЛАДУ ГАЗІВ	126
8.1 Класифікація газоаналізаторів.....	126
8.2 Об'ємні хімічні газоаналізатори.....	127
8.3 Теплові газоаналізатори.....	130
8.4 Термокондуктометричні газоаналізатори.....	131
8.5 Магнітні газоаналізатори.....	133
8.6 Оптичні газоаналізатори.....	134
8.7 Хроматографічні газоаналізатори.....	135
ЛІТЕРАТУРА	138
ГЛОСАРІЙ	139

ВСТУП

Однією із глобальних світових проблем сьогодення є економія енергоресурсів, залучення в сферу їх виробництва нетрадиційних джерел, впровадження енергозбережних технологій. Важливе місце в теплотехнологічних процесах, які застосовують у хімічній, фармацевтичній, деревообробній та інших галузях промисловості України займають вимірювання та контроль параметрів процесів, на які витрачається значна кількість коштів, призначених для забезпечення якості, надійності, безпеки проходження теплотехнологічного процесу.

Спеціаліст-теплоенергетик незалежно від профілю його практичної роботи повинен мати досить глибокі знання в області теорії та практики вимірювань основних теплотехнологічних параметрів процесів, таких як температура, тиск, витрата тощо та вміти їх використовувати в своїй професійній діяльності.

Написання даного навчального посібника зумовлено кількома причинами. Головна з них – відсутність необхідних підручників і посібників, тим більше, українською мовою. Крім того, слід враховувати те, що в наш час парк вимірювальної техніки досить швидко змінюється і прилади, котрі широко використовувались ще десять років назад, зараз вже є технічно і морально застарілими. Тому в посібнику основна увага приділялась фундаментальним основам методики вимірювання фізичних величин в теплоенергетичних та теплотехнічних процесах, викладені особливості комплектування первинних та вторинних засобів вимірювання для досягнення достовірного результату вимірювань.

Скорочення лекційних годин віддає пріоритетну роль самостійній підготовці студентів, яка стає одним із головних засобів професійної підготовки. Це потребує відповідного методичного забезпечення під час виконання самостійної роботи і курсового проектування, особливо для студентів заочної форми навчання.

Посібник розроблений відповідно до програми дисципліни "Теплотехнічні вимірювання та прилади", спеціальності 6.050601 і може бути використаний як для вивчення дисципліни студентами стаціонарної форми навчання, так і для дистанційного навчання студентів заочної форми навчання.

Автор вдячний рецензентам та колективам кафедр "Теплоенергетика" та "Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології" за корисні зауваження і поради в процесі підготовки посібника.

1 ЗАГАЛЬНІ ПОНЯТТЯ ТА ПРИНЦИПИ ВИМІРЮВАНЬ ТЕПЛОТЕХНІЧНИХ ВЕЛИЧИН

1.1 Основні поняття та визначення

В основі безпечної й економічної роботи теплових об'єктів лежить вимірювання теплотехнічних параметрів.

Одержання значення фізичної величини досліdnим шляхом за допомогою спеціальних технічних засобів називають вимірюванням (measurement). У цьому визначенні під терміном «фізична величина» розуміють властивість, загальну в якісному відношенні багатьом фізичним об'єктам, але в кількісному відношенні індивідуальну для кожного об'єкта.

Вимірювання будь-якої фізичної величини полягає в порівнянні її з іншою однорідною (homogeneous) величиною, умовно прийнятою за одиницю. Отже, результат вимірювання U показує числове співвідношення між вимірюваною величиною Q і одиницею вимірювання q , тобто виражається рівністю

$$Q = q \cdot U. \quad (1.1)$$

Теплотехнічні вимірювання служать для визначення багатьох фізичних величин, пов'язаних із процесами генерації, перетворення й споживання (витрат) теплової енергії. До них відносяться визначення як чисто теплових (температури, теплоємності (heat capacity), ентропії), так і пов'язаних з ними інших фізичних величин (тиску, витрат (consumption), рівня (pitch) тощо).

За способом отримання числового значення вимірюваної величини теплотехнічні вимірювання розділяють на прямі й непрямі.

Прямі – це вимірювання, при яких шукане значення (value required it) фізичної величини визначають безпосередньо з досліdnих даних (наприклад, вимірювання температури термометром розширення або вимірювання тиску мембранним манометром). Якщо позначити через $[X]$ одиницю вимірюваної величини, а через x її числове значення, то шукане значення вимірюваної величини $Q = x[X]$.

Непрямі – це вимірювання, при яких шукану величину знаходять на підставі відомої залежності між цією величиною й величинами, що одержані в результаті прямих вимірювань. У цьому випадку вимірювана величина визначається функціональною залежністю $K = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$, де $X_1,$

X_2, \dots, X_n – значення величин, що виміряні прямим способом. Непрямими вимірюваннями є визначення витрат рідин або газів, коефіцієнта корисної дії (ККД), питомих економічних показників обладнання, різних неелектричних величин (тиску, температури), перетворених в електричні вимірювані сигнали.

В лабораторній практиці розрізняють також *спільні* та *сукупні* вимірювання.

Спільні вимірювання (common measurement) – проведені одночасно вимірювання двох або декількох неоднорідних величин для визначення залежності між ними.

Сукупні вимірювання (total measurement) – проведені одночасно вимірювання кількох однорідних величин, при яких шукані значення величин визначають шляхом розв'язання системи рівнянь, одержуваних при вимірюванні цих величин в різних поєднаннях.

Вимірювання проводяться на основі фізичних явищ, що визначають *принцип вимірювання* (principle of measurement), наприклад: вимірювання температури за розширенням речовини. Для реалізації тих чи інших принципів вимірювання використовуються ті чи інші технічні засоби. Технічний засіб, що використовується у вимірюваннях і має нормовані метрологічні властивості, називається *засобом вимірювання* (measuring device). Сукупність правил, що визначають принципи і засоби вимірювання називають *методом вимірювання* (method of measuring). Існує ряд методів, з яких найбільш поширеними є:

- *метод безпосереднього оцінювання* – передбачає визначення шуканої величини за відрахунковим пристроєм вимірювального приладу, наприклад, за положенням стрілки манометра відносно його шкали;

- *метод порівняння з мірою* полягає в тому, що вимірювана величина порівнюється із значенням, що відтворюється мірою для даної величини, наприклад вимірювання довжини метром;

- *диференціальний метод* передбачає дію на прилад різниці вимірюваної і базової (значення якої відоме) величин (наприклад вимірювання складу газової суміші за теплопровідністю, якщо відома теплопровідність повітря). Метод дозволяє отримати високу точність вимірювань навіть для використання приладів з не дуже високою точністю, однак потребує наявності базової величини, значення якої близьке до вимірюваної величини і відоме з високою точністю;

- *нульовий метод* є різновидністю методу порівняння з мірою. Тут результуюча дія двох величин (вимірюваної і відтвореної мірою), направле-

них назустріч одна одній, доводиться до нуля. Приклад – вимірювання маси на терезах.

При вимірюваннях фізичних величин ніколи не можна одержати їхнього істинного значення, що пов'язане з недосконалістю методів і засобів вимірювань, із впливом умов вимірювань, а також із індивідуальними особливостями спостерігачів тощо.

Відхилення (deviation) результату вимірювання від істинного значення вимірюваної величини називають *похибкою вимірювання*.

Зі зменшенням похибки вимірювань підвищується їхня точність. Якість вимірювань, що відображає близькість їхніх результатів до істинного значення вимірюваної величини, називають *точністю вимірювань*. Для конкретних умов і цілей вимірювання існує свій раціональний рівень точності, що недоцільно перевищувати через складність відповідних вимірювань.

Єдність вимірювань – це стан вимірювань, при якому їхні результати виражені в узаконених одиницях, а похибки відомі із заданою ймовірністю. Питаннями теорії й практики забезпечення єдності й необхідної точності вимірювань займається метрологія.

Система одиниць (system of units) повинна мати такі властивості: універсальність (метод побудови системи не пов'язаний з конкретними фізичними величинами); мінімальну кількість основних одиниць (необхідну для утворення логічно несуперечливих похідних одиниць, що охоплюють всі види вимірювань); незалежність вибору основних одиниць від їхніх кількісних значень (наприклад, як одиниця довжини вибирають будь-яку – метр, дюйм, сажень, при цьому похідні одиниці залежать від вибраної основної).

Спочатку застосовувалися системи одиниць, у яких основними були три одиниці: довжини, маси й часу.

Вони охоплювали широке коло завдань механіки. Велике поширення одержали системи одиниць МКС (метр – кілограм – секунда) і СГС (сантиметр – грам – секунда). Оскільки системи механічних одиниць не охоплювали теплотехнічні, до них додали ще одну основну одиницю – градус температурної шкали (системи МКСГ), а для електричних і магнітних вимірювань – одиницю сили струму – ампер (система МКСА).

Існування різних систем одиниць фізичних величин і великої кількості додаткових одиниць, ріст науково-технічного прогресу і економічних зв'язків між країнами висунули вимогу уніфікації одиниць вимірювання в міжнародному масштабі. В 1960 р. XI Генеральна конференція з мір і ваг затвердила

проект Міжнародної системи фізичних одиниць СІ, що знайшов відбиття в рекомендаціях Міжнародної організації зі стандартизації (ISO). В 1961 р. Комітет стандартів, мір і вимірювальних приладів при Раді Міністрів СРСР розробив і випустив ГОСТ 9867–61, яким затверджувалася система СІ у всіх галузях науки й техніки, а також при навчанні.

Основними одиницями СІ є: довжина – метр (м); маса – кілограм (кг); час – секунда (с); термодинамічна температура – Кельвін (К); сила електричного струму – ампер (А); кількість речовини – моль; сила світла – кандела (кд), додатковими одиницями: плоский кут – радіан (рад) і тілесний кут – стерадіан (ср).

Всі інші одиниці фізичних величин у СІ – похідні. Вони утворюються за допомогою найпростіших рівнянь, які відображають їхній зв'язок з основними одиницями системи. Коефіцієнт пропорційності в цих формулах дорівнює *одиниці*, що є перевагою СІ перед іншими системами. Цю властивість системи називають *когерентністю*.

У СІ похідну одиницю знаходять за розмірностями (dimension) основних одиниць. Наприклад, у СІ одиниця сили $P = m \cdot a$, (m – маса тіла, a – його прискорення) має таку розмірність: $[F] = [m][a]: [\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^{-2}]$.

1.2 Засоби й методи вимірювань

Всі вимірювання виконують за допомогою технічних засобів, які мають нормовані похибки й називаються *засобами вимірювань*. Вони є матеріальною основою вимірювань фізичних величин. Сукупність (totality) прийомів використання принципів і засобів вимірювань називається *методом вимірювань*.

Засоби вимірювань повинні мати нормовані метрологічні характеристики, тобто визначені числові значення величин і властивостей, що визначають точність і достовірність результатів вимірювань. Засіб вимірювання, призначений для вироблення сигналу вимірювальної інформації в формі, зручній для безпосереднього сприйняття спостерігачем, називається вимірювальним приладом. Їх поділяють на *аналогові* і *цифрові*. В *аналогових* – покази є неперервною функцією зміни вимірюваної величини. В *цифрових* – покази подані в цифровій формі, яка є результатом дискретного перетворення сигналів вимірювальної інформації. Прилади бувають *показуючі* (значення зчитуються з шкали або табло) і *реєструючі* (значення записуються на діаграмній стрічці або друкуються в цифровій формі).

До основних видів засобів вимірювань відносять міри, вимірювальні перетворювачі, вимірювальні прилади, інформаційно-вимірювальні системи.

1.3 Основні властивості вимірювальних приладів

Точність (precision) визначається ступенем достовірності показів приладу, тобто тим, наскільки результати вимірювань відрізняються від істинних значень вимірюваної величини.

Чутливість (sensitivity) виражається відношенням лінійного або кутового переміщення покажчика до зміни вимірюваної величини, що викликає це переміщення. Якщо Δl – переміщення покажчика приладу, а ΔX – відповідна зміна вимірюваної величини, то чутливість визначають як $S = \Delta l / \Delta X$.

Швидкодія (performance) приладу залежить від його інерційності, що викликає запізнювання показів.

Надійність (reliability) характеризує властивість приладу зберігати роботоспроможність (ability to work) протягом заданого часу. Це стан приладу, в якому він може виконувати свої функції відповідно до встановлених для нього технічних вимог.

1.4 Класифікація приладів для теплотехнічних вимірювань

Основна класифікація поділяє прилади за родом вимірюваних величин:

- температури: термометри і пірометри (pyrometers);
- тиску: манометри, вакуумметри, мановакуумметри, тягонапороміри і барометри;
- витрати і кількості: витратоміри, лічильники (counters), ваги;
- рівня рідин і сипучих тіл: рівнеміри і покажчики рівня;
- складу газів: газоаналізатори, психрометри (psychrometers), гігрометри, вологоміри;
- якості води і пари: кондуктоміри і киснеміри.

1.5 Види засобів вимірювань

Міра – засіб вимірювань, призначений для відтворення одного або декількох відомих значень фізичної величини. Наприклад, гиря – міра маси, температурна лампа – міра яскравісної або колірної температури, вимірю-

вальна колба (bulb) – міра об'єму. Перераховані міри відтворюють одне значення фізичної величини, тобто є *однозначними*. До цих мір відносять також зразкові речовини. Міри, що відтворюють кілька значень фізичної величини (наприклад, лінійка, конденсатор змінної ємності, змінний опір), називають *багатозначними*. Поряд з мірами існують *магазини мір*, тобто їхні набори, у яких міри об'єднані в єдине конструктивне ціле із пристроєм для їхнього з'єднання в різних сполученнях (магазин опорів, магазин індуктивностей).

Фізичні величини вимірюють мірами методом порівняння. У деяких випадках використовують метод протиставлення (наприклад, вимір маси на рівноплечих вагах гирями) або метод збігу (вимірювання довжини лінійкою).

Вимірювальний перетворювач – засіб вимірювань, призначений для вироблення сигналу вимірювальної інформації у формі, зручній для передачі, подальшого перетворення, обробки й зберігання, але не піддається безпосередньому сприйняттю спостерігачем.

Ці перетворювачі є складовими частинами приладів і вимірювальних систем. За місцем, яке займається в приладах, вимірювальні перетворювачі розділяють на первинні, проміжні, масштабні. *Первинним перетворювачем* називається пристрій, до якого підводиться безпосередньо вимірювана фізична величина, тобто він знаходиться першим у вимірювальному колі.

Часто такі перетворювачі називають *датчиками* (наприклад, термoeлектричний термометр, звужуючий пристрій витратоміра).

Перетворювач, що займає у вимірювальному колі місце після первинного, називають *проміжним*.

Перетворювач, призначений для зміни величини в задану кількість разів, називають *масштабним* або *підсилювальним* (наприклад, вимірювальний трансформатор струму, подільник напруги, вимірювальний підсилювач), а призначений для дистанційної передачі сигналу вимірювальної інформації – *передавальний* (наприклад, індуктивний або пневматичний перетворювач).

Останнім часом у зв'язку із застосуванням у вимірювальній техніці різних ЕОМ і мікропроцесорів дістали поширення аналого-цифрові (АЦП) і цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП). Перші перетворювачі слугують для перетворення аналогових сигналів у цифрові, що змінюються дискретно в часі з постійним кроком, другі – для перетворення дискретних за часом сигналів в аналогові. У теплотехнічних вимірюваннях найчастіше застосовують АЦП.

Нелінійна залежність в перетворювачах допускається у виняткових випадках.

Вимірювальний прилад – засіб вимірювань, призначений для вироблення сигналу вимірювальної інформації у формі, придатній для безпосереднього сприйняття спостерігачем. Цей вид засобів вимірювань найчастіше використовують при експлуатації енергетичного обладнання. На відміну від міри вимірювальний прилад не відтворює значення вимірюваної величини, вона підводиться до приладу ззовні. Прилад видає в процесі вимірювань числове значення величини.

Вимірювальний прилад, показання якого є безперервною функцією змін вимірюваної величини, називають *аналоговим*, а прилад, показання якого подані у вигляді цифр – *цифровим*.

За способом побудови вимірювальної схеми розрізняють прилади *прямої дії, порівняння, автоматичної компенсації*.

Для аналогових вимірювальних приладів характерні відлікові пристрої, що складаються зі *шкали й покажчика (designator)*.

Сукупність послідовно нанесених оцінок, що відповідають ряду значень вимірюваної величини, називають *шкалою*. Відстань між двома сусідніми позначками називають *довжиною поділки шкали*, а різниця між значеннями цих позначок – *ціною поділки шкали*.

Область показань шкали, обмежену її кінцевим і початковим значеннями, називають *діапазоном вимірювань*, а найбільше й найменше значення діапазону – відповідно *верхньою й нижньою межами вимірювань*.

Числові позначки на шкалах звичайно позначають розмір вимірюваної величини. Іноді на шкали наносяться відсотки або їхні частки.

Нанесення позначок на шкалу за дійсним значенням вимірюваної величини називають *градуюванням*. Значення величини, позначені на шкалі приладу, зазвичай кратні п'яти.

У цифрових вимірювальних приладах (ЦВП) шкала й покажчик відсутні. Результат вимірювання зчитують за цифрами вихідного коду.

Однієї з найважливіших характеристик вимірювального приладу є *чутливість* – відношення зміни сигналу на виході вимірювального приладу до вимірюваної величини, яка викликала її зміни.

Іншою важливою характеристикою вимірювального приладу є *варіація показань* – варіація виникає через тертя в опорах рухливих частин приладу, гістерезису пружин і пружних елементів. При інтенсивній експлуатації

приладу варіація збільшується. Найбільше значення варіації показань не повинне перевищувати припустимої похибки приладу.

Для оцінювання похибки приладів використовується така узагальнена характеристика, як *клас точності* (accuracy class). Якщо межі основної допустимої похибки, задані абсолютною похибкою в одиницях вимірюваної величини, клас точності приладу позначають «Кл 1» або «Кл 2». У цьому випадку він носить умовний характер і не має зв'язку з конкретним значенням похибки приладу. Чим менший клас точності приладу, тим він точніший.

Набагато частіше для нормування похибки приладу використовують клас точності K , пов'язаний з конкретним значенням абсолютної похибки $\Delta X = + K X_N / 100$, де X_N – нормоване значення шкали приладу. Це значення приймається рівним: верхній межі вимірювань (X_B) – для приладів з односторонньою шкалою; арифметичній сумі верхньої й нижньої меж вимірювань $|X_H| + |X_B|$ – для приладів із двосторонньою шкалою; різниці верхньої й нижньої меж ($X_B - X_H$) – для приладів з безнульовою (no zero) шкалою; значенню X_N , зазначеному в паспорті, – для приладів фізико-хімічного аналізу речовин, ЦВІІ.

Клас точності приладу задається будь-яким числом з розмірного ряду (1; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 10 n , де $n=1; 0; -1; -2$).

В залежності від призначення і ролі, яку прилади виконують в процесі вимірювання, засоби вимірювання поділяються на:

– еталони: служать для поновлення і зберігання одиниць фізичних величин і передачі їх розмірів через зразкові робочим засобам вимірювань;

– зразкові: призначені для передачі розмірів одиниць фізичних величин від еталонів або інших точних засобів вимірювань робочим засобам вимірювань. За зразковими засобами повіряються та градууються робочі засоби вимірювань;

– робочі: призначені для практичних вимірювань у всіх галузях н/г. Їх поділяють на засоби вимірювань підвищеної точності і технічні.

Кожному типу вимірювальних приладів відповідають певні класи точності.

1.6 Похибки вимірювань та похибки засобів вимірювань

Вимірювання фізичних величин не може бути зроблене абсолютно точно внаслідок недосконалості методів і засобів вимірювання, а також через вплив умов вимірювання, індивідуальних особливостей спостерігача випадкових причин тощо.

Відхилення результатів вимірювань, які виникають при цьому, від істинних значень вимірюваної величини називаються похибками вимірювань.

Для кожного вимірювання повинен бути відомий ступінь точності його результату, що оцінюється похибкою вимірювань. Тільки тоді отримане значення тієї чи іншої величини має практичний сенс. Похибка вимірювання може бути виражена у вигляді абсолютної чи відносної величини і буває додатною чи від'ємною.

Абсолютна похибка (absolute error) Δ , що виражається в одиницях вимірювань, є різницею між виміряним значенням (показанням приладу) x і дійсним значенням вимірюваної величини X_d , хоча теоретично при визначенні похибки вимірювання замість дійсного значення вимірюваної величини X_d повинне вказуватися істинне її значення X .

При цьому під дійсним значенням розуміють значення вимірюваної величини, знайдене експериментально (наприклад, за допомогою зразково-го приладу) і настільки наближене до істинного, що для даної мети може бути використане замість нього. Внаслідок неможливості створення ідеальних методів і засобів вимірювань істинне значення не може бути визначено, тобто воно завжди залишається невідомим.

Відносна похибка (relative error) ε , що вказується у відсотках, є відношенням абсолютної похибки до дійсного значення, тобто

$$\Delta = x - X_d \quad (1.2)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{X_d} \cdot 100. \quad (1.3)$$

Як правило, для визначення дійсного значення до показів приладу вводиться поправка c , що чисельно дорівнює абсолютній похибці, взятій з протилежним знаком

$$\pm \Delta = \mp c. \quad (1.4)$$

Поправка алгебраїчно додається з результатом вимірювання

$$X_d = x + (\pm c). \quad (1.5)$$

Іноді для одержання точного результату показання приладу збільшуються на поправковий множник k , тобто

Значення Δ , s , і k в більшості випадків знаходяться дослідним шляхом.

Для стаціонарних промислових вимірювань застосовуються прилади, найбільші похибки яких знаходяться в межах існуючих норм (стандартів), що задовольняють вимоги практики. Тому до показань цих приладів поправки не вводяться.

Для лабораторних і точних промислових вимірювань враховуються за можливістю усі похибки, які виникають в процесі вимірювань. У цих випадках відлік показань приладу виконується кілька разів підряд з метою визначення середнього значення вимірюваної величини, вірогідність якого зростає із збільшенням числа відліків.

Всі похибки за характером прояву в результаті вимірювань поділяються на систематичні, випадкові й грубі.

1.6.1 Систематичні похибки

Основним видом похибки в теплотехнічних вимірюваннях є систематична похибка, що залишається постійною або закономірно змінюється при повторних вимірюваннях однієї й тієї ж величини. Цю похибку усувають або введенням поправок, або вдосконалюванням процесу вимірювання. Поправка, рівна систематичній похибці за величиною й обернена за знаком, додається до отриманого результату вимірювань. Поправки задаються у вигляді формул, таблиць або графіків.

Систематичні похибки поділяють на основні (інструментальні) і додаткові (похибки методу вимірювань, похибки установлення приладу тощо).

Під інструментальною розуміється похибка застосовуваних засобів вимірювань, викликана недосконалістю їхнього виготовлення. Вона виникає через неякісне складання частин деталей, деформацій пружних елементів, зношування третьових частин при експлуатації тощо. До цих похибок відносять і динамічні похибки, що виникають при вимірюваннях змінних величин. Інерційність засобу вимірювань не дозволяє точно визначити дану величину.

Похибки методу вимірювань пов'язані з помилковістю або недостатністю розробки теорії методу вимірювань або зі спрощеннями, допущеними при проведенні вимірювань.

Похибка установлення приладу може бути викликана: неправильним вибором місця вимірювання; впливом несприятливих зовнішніх умов (вібрації, температури, вологості); далекістю об'єкта вимірювання від прила-

дів обробки вимірювальних сигналів; недбалим установленням приладу (наприклад, не за рівнем).

Похибки зчитування, що виникають при неавтоматизованих вимірюваннях, пояснюються індивідуальними особливостями спостерігача. Вони виникають при неправильному зчитуванні показань приладу (паралакс показань, їхня інтерполяція).

При технічних вимірюваннях ряд похибок (установлення приладу, зчитування (reading)) можна усунути, а інші визначити в результаті перевірки більш точними приборами. Похибки, які не можна усунути, нормуються й вказуються в паспорті засобу вимірювань.

1.6.2 Випадкові похибки

Випадкові похибки є невизначеними за своєю величиною і природою. В повторних вимірюваннях вони не залишаються постійними, тому що виникають в результаті спільного впливу на процес вимірювання багатьох причин, кожна з яких проявляє себе по різному і незалежно одна від одної.

Для одного вимірювання випадкові похибки не піддаються обліку однак для ряду повторних вимірювань однієї і тієї ж постійної величини, проведених з однаковою старанністю, їхній вплив на отриманий результат після врахування систематичних похибок і грубих помилок можна оцінити з деякою імовірністю.

Теорія випадкових похибок, основана на методах теорії ймовірностей і математичної статистики, дозволяє для проведення деякого числа повторних вимірювань уточнити кінцевий результат. В силу цього теорія випадкових похибок широко використовується для оцінювання точності вимірювань і надійності роботи вимірювальних приладів.

Велике число повторних вимірювань однієї і тієї ж постійної величини показує, що поява однакових за розміром і різних за знаком випадкових похибок зберігає стійку частоту, яка підпорядковується певній закономірності. Якщо позначити через n число проведених вимірювань, а через m число отриманих однакових випадкових похибок, то імовірність (частота) P появи цих похибок знаходиться за формулою

$$P = m/n. \quad (1.7)$$

Для великого числа вимірювань імовірність появи різних випадкових похибок у більшості випадків підпорядковується закону так званого нормального розподілу, що має вигляд

$$P(\Delta_c) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\Delta_c^2}{2\sigma^2}}, \quad (1.8)$$

де $P(\Delta_c)$ – імовірність появи випадкової похибки;

Δ_c – випадкова похибка вимірювання ($\Delta_c = x - X$);

σ – середнє квадратичне відхилення результату вимірювання;

e – основа натуральних логарифмів.

На рис.1.1 показані криві 1 і 2 нормального розподілу випадкових похибок, побудовані за формулою (1.8) для двох значень середнього квадратичного відхилення σ , причому у кривій 1 це відхилення в два рази менше, ніж у кривій 2.

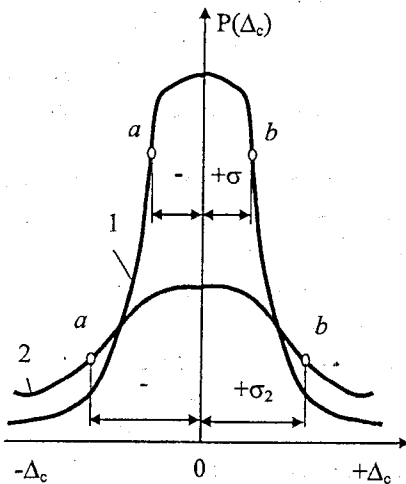


Рисунок 1.1 – Криві нормального розподілу випадкових похибок
1- для σ_1 ; 2 – для $\sigma_2 = 2\sigma_1$

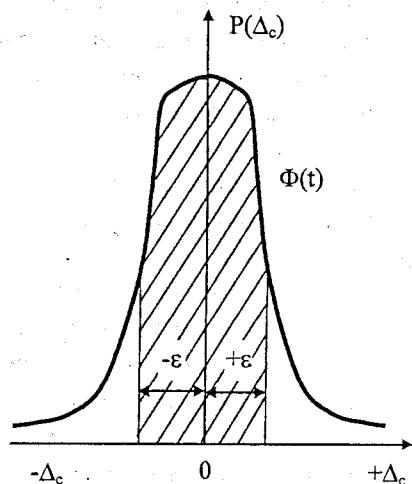


Рисунок 1.2 – Основні характеристики кривої нормального розподілу випадкових похибок

Криві розподілу симетричні щодо осі ординат, тобто поява рівних за величиною, але протилежних за знаком випадкових похибок має однакову

імовірність. В середній частині криві утворюють опуклість, по обох сторонах від яких знаходяться точки перегину a і b , нижче яких криві стають увігнутими, асимптотично наближаючись до осі абсцис. Найбільша імовірність для обох кривих відповідає випадковій погрішності $\Delta_c=0$. При зростанні похибки з будь-яким знаком імовірність її появи зменшується. Як видно з рис. 1.1, криві розподілу 1 і 2 мають різні найбільші імовірності $P(\Delta_c)$ і відстані між точками a і b перегину кривих. Проміжки між цими точками і віссю ординат рівні середньому квадратичному відхиленню $\pm\sigma$ результату вимірювання, що характеризує ступінь розсіювання значень випадкових похибок.

Чим нижче значення σ , тим менше розсіювання похибок, тому що при цьому майже вся площа під кривою розподілу розташовується поблизу осі ординат, що збільшує імовірність появи малих і зменшує появу великих похибок. Отже, зменшення σ призводить до підвищення точності вимірювань.

З обробкою результатів ряду повторних вимірювань, що містять випадкові похибки, знаходиться середнє арифметичне значення \bar{x} , що є кінцевим результатом вимірювань, тобто

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (1.9)$$

де x_1, x_2, \dots, x_n – ряд вимірюваних значень, умовно позначених x_i ;
 n – число вимірювань.

Для оцінювання випадкової похибки зазвичай служить середньоквадратичне відхилення результату вимірювання σ , підраховане за формулою

$$\sigma = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}. \quad (1.10)$$

Основні характеристики кривої нормального розподілу випадкових похибок показані на рис. 1.2. Ймовірність того, що випадкові похибки не вийдуть за межі (границі) будь-якого інтервалу, визначається за площею, обмеженою кривою розподілу і цим інтервалом, відкладеним по осі абсцис. Такий інтервал $\pm\epsilon$ називається довірчим інтервалом, а відповідна йому імовірність появи випадкової погрішності (заштрихована площа) $F(\epsilon)$ – довірчою імовірністю.

Довірчий інтервал, що характеризує ступінь відтворюваності результатів вимірювання, може мати різні значення, причому для великого довірчого інтервалу виходить і велика довірча імовірність. З вимірюванням може задаватися або довірчий інтервал і за ним визначатися довірча імовірність, або, навпаки, за довірчою імовірністю підраховуватися довірчий інтервал. Таким чином, для характеристики значення випадкової погрішності необхідно мати дві величини – довірчий інтервал (confidence interval) і довірчу імовірність (confidence probability).

Довірчий інтервал є звичайно виражають через відносну величину t в частках середньоквадратичного відхилення σ

$$t = \frac{\varepsilon}{\sigma} \quad (1.11)$$

Для попереднього оцінювання ступеня вірогідності окремих вимірювань ряду крім середньоквадратичного відхилення σ застосовуються також ймовірна похибка Δ_v і гранична (найбільша можлива) похибка $\Delta_{гр}$.

Ймовірна похибка відповідає значенню $t=0,675$ і довірчій імовірності $\Phi(t)=0,5$. Знаходиться вона за формулою

$$\Delta_v = 0,675\sigma \approx \frac{2}{3} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1.12)$$

Зміст визначення цієї похибки полягає в тому, що для багаторазового вимірювання постійної величини 50% випадкових похибок буде менше ймовірної погрішності і 50% – більше.

Гранична похибка дорівнює довірчому інтервалу ε , тобто визначається з рівності

$$\Delta_{гр} = \varepsilon = t \cdot \sigma \quad (1.13)$$

На практиці часто число вимірювань буває обмеженим, що унеможливає застосування закону нормального розподілу випадкових похибок.

Для малого числа повторних вимірювань n звичайно використовується розподіл випадкових похибок, запропонований Ст'юdentом. Для цього розподілу довірчий інтервал ε чи довірча імовірність P визначаються в зале-

жності від величини n , причому величина t (яка називається дробом чи коефіцієнтом Ст'юдента) виражається співвідношенням

$$t = \frac{\varepsilon \cdot \sqrt{n}}{\sigma}, \quad (1.14)$$

де σ – середньоквадратичне відхилення, визначене за формулою (1.10).

1.6.3 Динамічні похибки

Вимірвальні прилади використовуються для вимірювання величин, що змінюються з часом, і є матеріальними системами, що мають різні інерційні властивості (механічні, теплові тощо). Інерційність приладів для змінного режиму роботи призводить до запізнювання їхніх показів, тобто до відставання показів від зміни вимірюваної величини.

Величина запізнювання показів залежить в основному від принципу дії і будови вимірального приладу. На неї впливають: інерція рухомої частини приладу, теплоємність і теплопровідність термочутливого елемента і спосіб його установа, довжина і діаметр з'єднувальних трубок тощо.

Залежність показів приладу від зміни вимірюваної величини в несталому режимі (перехідному процесі) називається динамічною характеристикою вимірального приладу. Вигляд динамічної характеристики визначається характером збурення вимірюваної величини і типом вимірального приладу.

Динамічна характеристика приладів у більшості випадків знаходиться дослідним шляхом. Для одержання її проводиться значне стрибкоподібне збільшення вимірюваної величини до нового постійного значення і здійснюється безупинний запис показів приладу до моменту сталих показів. На практиці поряд зі стрибкоподібною зміною вимірюваної величини остання може також змінюватися в часі за різними законами.

На рис. 1.3 показана динамічна характеристика термометра. Тут по осі ординат відкладена температура речовини t , а по осі абсцис – час τ . При стрибкоподібній зміні вимірюваної температури від 0 до деякого постійного значення t_i показання термометра t_n (з виключеною з них систематичною похибкою) змінюються за кривою перехідного процесу, відстаючи в кожен момент часу від значення t_i на значення динамічної похибки вимірювання Δ_d

$$\Delta_d = t_i - t_n. \quad (1.15)$$

Таким чином, як видно з рис. 1.3, теплова інерція термометра, зумовлена порівняно повільним нагріванням термочутливого елемента, призводить до запізнювання показів приладу на Δ_d , тобто при зміні вимірюваної температури до нового сталого значення t_i показання термометра t_n поступово досягають цього значення.

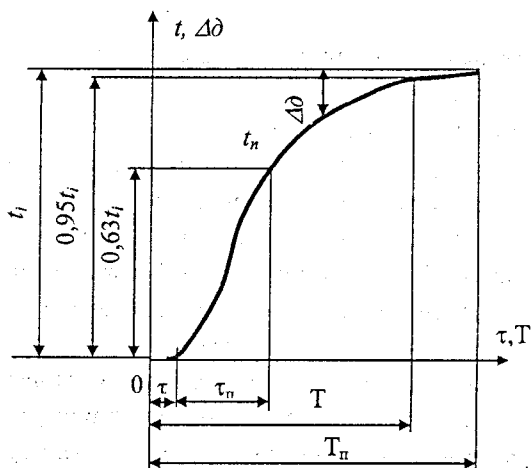


Рисунок 1.3 – Динамічна характеристика термометра

Отже, для оцінювання динамічних похибок приладу необхідно мати криву його перехідного процесу, за якою для різних моментів часу можна знайти значення цих похибок.

Крім динамічних похибок динамічна характеристика вимірювального приладу містить ряд показників часу перехідного процесу (рис. 1.3), до яких відносяться: час початку реагування τ_n (час від початку зміни вимірюваної величини до початку зміни показів приладу); постійна часу τ_n (час від початку реагування, протягом якого показання приладу досягнуть 63% зміни вимірюваної величини); час перехідного процесу T (час, протягом якого показання приладу досягнуть 95% зміни вимірюваної величини); повний час установа показань T_n (час, протягом якого показання приладу досягнуть 100% зміни вимірюваної величини).

Динамічна похибка Δ_d , постійна часу τ_n і час перехідного процесу T є основними величинами, що характеризують динамічні властивості вимірювальних приладів. Чим менші за інших рівних умов ці величини, тим менше інерційне запізнювання має вимірювальний прилад і тим вищими є його динамічні якості.

1.6.4 Грубі помилки

Вони пов'язані з факторами, котрі істотно спотворюють результат вимірювань, наприклад раптовим зниженням напруги електричного живлення приладу. Сюди ж відносяться так звані промахи – похибки, пов'язані з помилковими діями спостерігача (beholder), – неправильне визначення показань приладу, неправильний їхній запис тощо. Результати вимірювань, що містять грубі помилки і промахи, відкидаються як явно неточні.

1.7 Повірка вимірювальних приладів

Для знаходження основної похибки в різних точках шкали приладу він через певні терміни (чи в міру необхідності) перевіряється, тобто його показання порівнюють з показами точного приладу, що має в кілька разів меншу похибку вимірювань, ніж прилад, що перевіряється.

Повірка (verification) приладів виконується як на спеціальних лабораторних стендах, так і на робочому місці. Порядок повірки різних приладів у лабораторії встановлюється відповідними державними стандартами та інструкціями, користування якими є обов'язковим. При повірці в лабораторії число точок шкали, що перевіряється, для промислових приладів складає звичайно 3–5, а для лабораторних і зразкових – не менше 10. Результати повірки заносяться до протоколу, на підставі якого у випадку придатності приладу виписується посвідчення. У цьому документі, крім паспортних даних приладу, для всіх значень шкали, що перевіряється, наводяться дійсні значення і поправки. Крім того, у посвідченні вказуються дата повірки і термін її дії.

За даними перевірки іноді будується графік поправок до показів приладу (рис. 1.4), що полегшує визначення поправок у межах всієї шкали.

Повірку приладів роблять спочатку для зростаючого значення вимірюваної величини (прямий хід), а потім для спадного (зворотній хід). Найбільша різниця показів, отримана в цьому випадку при тому самому значенні вимірюваної величини і незмінних зовнішніх умовах, називається варіацією показів приладу. Варіація показів приладу v' у відсотках діапазону показів знаходиться за формулою

$$v' = \frac{v}{N_k - N_H} \cdot 100, \quad (1.16)$$

де N_k і N_n – початкове і кінцеве значення шкали.

Характерними величинами є також непостійність показів і поріг чутливості приладу.

Непостійність показів є різницею між найбільшим і найменшим показами приладу, що відповідають тому самому значенню величини, що вимірюється при багаторазових повірках в однакових умовах.

Поріг чутливості визначає мінімальну зміну значення величини, яка вимірюється, що викликає найменшу зміну показів приладу. Поріг чутливості залежить головним чином від наявності тертя у вимірювальному пристрої приладу.

Термометр № 103256; повірка 23.12.20012р.

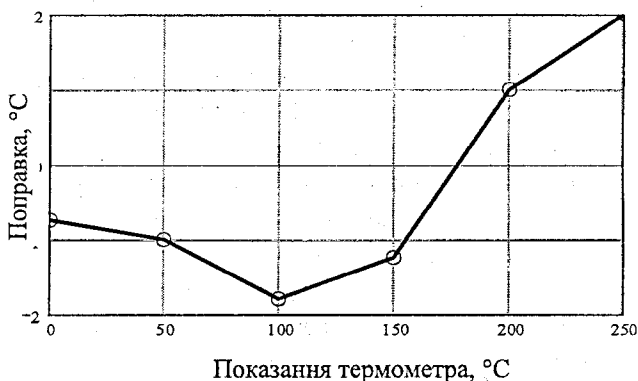


Рисунок 1.4 – Графік поправок термометра

1.8 Метрологічні характеристики засобів вимірювань

У номенклатуру (range) метрологічних характеристик входять:

- 1) характеристики засобів вимірювань, що визначають результати вимірювань;
- 2) характеристики основної (систематичної) похибки засобів вимірювань;
- 3) характеристики чутливості засобів вимірювань до впливових (influencing) величин;
- 4) динамічні характеристики засобів вимірювань;
- 5) характеристики засобів вимірювань, що визначають додаткову похибку через взаємодію із зовнішнім об'єктом.

2 ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

2.1 Температура як характеристика термодинамічного стану

З точки зору термодинаміки температура – міра середньої кінетичної енергії хаотичного теплового руху молекул. Температура характеризує ступінь нагрітості (heated) тіла і є одним з найважливіших параметрів теплотехнологічних процесів. При цьому об'єкт із більшою температурою передає теплову енергію об'єкту з меншою температурою так, що відбувається їхнє вирівнювання.

Виміряти температуру будь-якого тіла безпосередньо так, як вимірюють інші фізичні величини, такі як масу, об'єм або час неможливо, бо в природі немає зразка або еталона одиниці цієї величини. Тому визначення температури проводять шляхом спостереження за зміною фізичних властивостей іншої (термометричної) речовини, яка в контакт з нагрітим тілом через деякий час вступає з ним в теплову рівновагу. Такий метод вимірювання дає не абсолютне значення температури середовища а лише різницю відносно початкової температури робочого середовища, умовно прийнятої за нуль. Отже, безпосередньо температуру визначити не можна, можна оцінити її значення за якимись іншими параметрами тіла, які змінюються однозначно від зміни температури. Такими параметрами є: об'єм, довжина, електричний опір, термоелектрорушійна сила, енергетична яскравість випромінювання тощо.

Прилади для вимірювання температури з'явилися ще в XVII в. Були запропоновані різні температурні шкали: Фаренгейта, Реомюра, Цельсія й ін. В основі побудови цих шкал лежить вибір двох опорних (реперних) температур, що характеризують фазову рівновагу чистої речовини при його переході з одного агрегатного стану в інший. Інтервал між опорними температурами ділиться на певне число позначок з однаковою довжиною поділок, які й утворюють температурну шкалу. Ціну ділення такої шкали називають градусом. Зокрема для стоградусної шкали Цельсія як реперні температури прийняті температури плавлення льоду й кипіння води за нормального атмосферного тиску.

Зміна термометричних властивостей в інтервалі між реперними точками апроксимувалось лінійною залежністю від температури

$$T = T_0 + \kappa C, \quad (2.1)$$

де T_0 – значення температури в одній з реперних точок;

C – значення термометричної властивості для температури T ;

k – коефіцієнт пропорційності, який визначається за значеннями термометричних властивостей і температур в реперних точках.

В процесі досліджень вияснилось, що температурні шкали (temperature scale), побудовані на одних і тих же реперних точках (fixed point), але з використанням різних термометричних речовин давали різні значення температури. Це пояснюється тим, що термоелектричні властивості речовин по різному змінюються з температурою, причому всі ці залежності нелінійні. Виникла проблема створення температурної шкали, яка б не залежала від термометричних властивостей речовин. Користуючись другим законом термодинаміки таку шкалу запропонував лорд Кельвін в 1848 році. Вона отримала назву термодинамічної температурної шкали (шкали Кельвіна) і базується на рівнянні термодинаміки для оборотного циклу Карно: $Q_1/Q_2 = T_1/T_2$. Це рівняння показує, що для роботи теплового двигуна за оборотним циклом відношення кількості тепла Q_1 , отриманого робочим тілом від нагрівника до кількості тепла Q_2 , відданого ним холодильнику, пропорційне відношенню температур T_1/T_2 нагрівника і холодильника. Однак практично вказаний метод вимірювання температури використаний бути не може, оскільки оборотний цикл Карно на практиці реалізувати неможливо.

Термодинамічна температурна шкала стала вихідною при побудові температурних шкал, що не залежать від властивостей термометричної речовини. Її одиницею слугує градус Кельвіна (К) – $1/273,16$ частина термодинамічної температури рівноваги між твердою, рідкою й газоподібною фазами води (потрійна точка води).

2.2 Міжнародна температурна шкала

Однак для практичного вимірювання температури термодинамічна шкала незручна, оскільки необхідно використовувати громіздкі газові термометри із введенням для кожного значення температури різних поправок. В подальшому, за допомогою газових термометрів, була побудована Міжнародна практична температурна шкала (МПТШ), котра легко і точно відтворюється і близька до термодинамічної шкали. Ця шкала створена на основі станів фазової рівноваги ряду чистих речовин (водню, неону, кисню, води, цинку, срібла, золота). Цим станам речовин (їх вибрано одинадцять) відповідає постійне значення температури по термодинамічній шкалі.

МІТТШ прийнята на VII Генеральній конференції з мір і ваг в 1927р., уточнена в 1948, 1960, а її нова редакція прийнята в 1968 році на XIII Генеральній конференції з мір і ваг (МІТТШ-68). Її градуси позначаються знаком °С (градус Цельсія), а умовне позначення температури буквою t. Для цієї шкали градус Цельсія рівний Кельвіну.

МІТТШ-68 була основана на значеннях температур ряду відтворюваних станів рівноваги між фазами чистих речовин. Але практична термометрія не стоїть на місці. Дані про методи інтерполяції постійно удосконалюються і в шкалу вносяться поправки. Так, МІТТШ-68 поступово трансформувалась в МТШ-90 – міжнародну температурну шкалу.

Шкала МТШ-90 є найбільш близькою, на даний момент можливою апроксимацією термодинамічної температурної шкали. Точність апроксимації, в основному, визначається точністю вимірювання термодинамічних температур реперних точок – фазових переходів чистих речовин. Якщо в період утвердження першої шкали найбільш точні експерименти в діапазоні середніх температур проводилися за допомогою газових термометрів, то в наш час отримують розвиток інші прогресивні методи вимірювання температури.

У 2002 р. в Чикаго в рамках міжнародної конференції «Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry» був проведений спеціальний семінар "Towards the ITS-XX" (До нової шкали МТШ-XX). Літери XX означають можливу дату прийняття шкали.

В останнє десятиліття основними напрямками, в яких ведуться наукові дослідження і дискусії щодо вдосконалення МТШ є такі:

- розвиток термодинамічних методів визначення температур реперних точок (акустична термометрія, шумова термометрія, абсолютні радіометричні вимірювання);
- розширення набору реперних точок у високотемпературній області за рахунок введення в шкалу точок фазових переходів евтектичних сплавів (eutectic alloys) метал -вуглець.

Основні напрямки запланованих досліджень такі:

- встановити мінімальні вимоги до чистоти матеріалів реперних точок і визначити надійних постачальників матеріалів;
- дослідити процес створення комірок реперних точок, які можуть гарантувати відтворюваність температури на рівні ± 500 мК і виробити рекомендації щодо технології створення комірок;
- провести дослідження довготривалої стабільності реперних точок;

- виробити технічні рекомендації з підвищення надійності комірок (nucleus);
- виробити технічні рекомендації до конструкції печей;
- кількісно визначити вплив печі на випромінювальну здатність системи піч – порожнина комірки;
- побудувати бюджет невизначеності для температур реперних точок, що включає вплив термометрів, печі, комірки;
- провести двоступеневі міжнародні звіряння вибраного набору реперних евтектичних точок, перший ступінь повинен включати дослідження поточних проблем радіометрії та можливості їх вирішення, другий ступінь включає присвоєння точкам значень термодинамічних температур.

Значення температур між постійними температурами станів рівноваги визначають за інтерполяційними формулами за допомогою еталонних засобів вимірювань. Як такі засоби вимірювань для температур від 13,81 до 903,89 К (630,74 °С) використовують термометр опору із платинового дроту, для температур від 903,89 до 1337,52 К (1064,3 °С) – платинородій платиновий термоелектричний термометр, від 1337,58 до 6300 К – монохроматичний пірометр випромінювання.

Засіб вимірювання температури, призначений для вироблення сигналу у формі, зручній для сприйняття спостерігачем, автоматичної обробки, передачі й використання в автоматичних системах керування, називається термометром.

2.3 Класифікація приладів для вимірювання температури

Прилади для вимірювання температури поділяються в залежності від використаних в них фізичних властивостей речовин на групи, показані в таблиці 2.1.

Термометри розширення побудовані на властивості тіл змінювати під дією температури свій об'єм або довжину, термоелектричні термометри – на властивості різнорідних металів і сплавів утворювати термо-е.р.с., що залежить від температури спаю (ефект Зеебека), манометричні термометри працюють на принципі зміни тиску рідини, газу або пари з рідиною в замкненому об'ємі з нагріванням або охолодженням цих речовин, а термометри опору – на властивості тіл змінювати залежно від нагрівання електричний опір.

Таблиця 2.1 – Прилади для вимірювання температури

Тип засобу вимірювання	Різновид засобу вимірювання	Межа довготривалого використання, °С	
		нижня	верхня
Термометри розширення	Рідинні скляні термометри	-200	600
	Манометричні термометри	-200	1000
Термометри пору	На основі металів	-260	1100
	На основі напівпровідників	-272	600
Термоелектричні термометри	Термоелектричні термометри	-200	2200
Пірометри	Квазімонохроматичні	700	6000 (100 000)
	Спектрального відношення	300	2800
	Повного випромінювання	-50	3500

Особливе місце займають засоби вимірювань температури за тепловим електромагнітним випромінюванням, названі пірометрами. Пірометри служать для безконтактного вимірювання температури.

2.4 Рідинні термометри розширення

Фізична властивість речовин змінювати свої розміри залежно від температури широко використовується для її вимірювання. На цьому принципі ґрунтується робота рідинних скляних і дилатометричних термометрів.

Рідинні скляні термометри є показуючими приладами, розташованими в місці вимірювання. Принцип їхньої дії базується на тепловому розширенні рідини в скляному резервуарі, залежно від вимірюваної температури. Як робочі речовини використовуються ртуть і органічні речовини – толуол, етиловий спирт, гас тощо (табл. 2.2).

Скляний рідинний термометр (рис. 2.1) складається з резервуара 4 з робочою рідиною й припаяного, закритого із протилежного кінця скляного капіляра 5. Уздовж капіляра розташована шкала 3, на якій нанесені цифрові позначки температури в градусах Цельсія. За верхньою оцінкою шкали є запасний об'єм капіляра 1, заповнений інертним газом під тиском, Цей об'єм захищає прилад від ушкоджень при перегріві. Всі зазначені деталі термометра розміщені в скляній захисній оболонці 2.

Таблиця 2.2 – Характеристики термометричних рідин

Рідина	Середня температура		Межі використання		Середній ТКOP, $10^5 \cdot K^{-1}$	
	тверднення	кипіння	нижній	верхній	дійсний	видимий
Ртуть	-38,9	356,6	-35	600	18	16
Толуол	-97,2	109,8	-90	200	109	107
Етиловий спирт	-114,5	78,0	-80	70	105	103
Гас	–	до 325	-60	200	95	93
Петролейний ефір	–	до 70	-120	25	152	150
Пентан	-200	36	-200	20	92	90

Рідинні термометри за конструкцією бувають: з вкладеною шкалою (а), паличкові (stick) (б), з розривним стовпом (в).

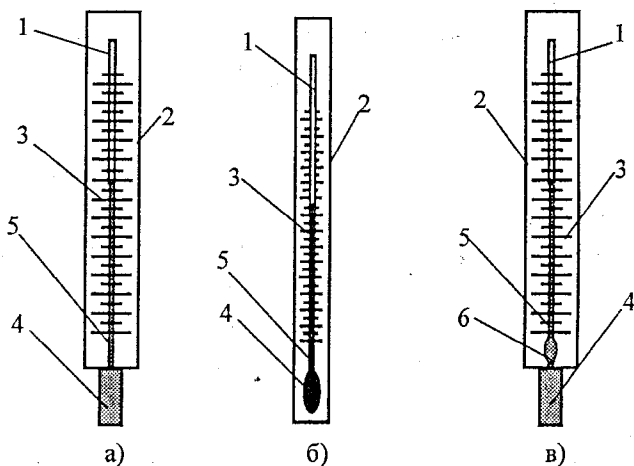


Рисунок 2.1 – Конструкції скляних рідинних термометрів

Паличкові термометри виготовлені з каліброваних товстостінних скляних або кварцових трубок, на поверхню яких нанесена шкала механічним способом при градуванні. Термометри з розривним стовпом після резервуара мають розширення капіляра б. Термометрична рідина при охоло-

дженні розривається і залишок рідини в капілярі показує зафіксовану температуру. Такі термометри повертають в робоче положення струшуванням.

Температуру вимірюваного середовища, яка міститься у резервуарі і частині капіляра скляного термометра, визначають за зміною об'єму термометричної рідини, який відлічується за положенням рівня рідини в капілярі. Зміна в капілярі рівня рідини при нагріванні резервуара (від температури t_1 до t_2

$$\Delta h = 1,27[V_1(\alpha_p - \alpha_c)(t_2 - t_1)]/d^2, \quad (2.2)$$

де V_1 , – об'єм рідини при температурі t_1 ;

α_p і α_c – середні коефіцієнти температурного розширення рідини й скла;

d – внутрішній діаметр капіляра.

Чим більший резервуар (container) і менший внутрішній переріз капіляра, тим більш помітна зміна висоти стовпа рідини, тобто тим більше чутливий термометр і меншою є ціна поділки шкали. Оскільки в термометрі одночасно з розширенням рідини відбувається розширення скляних резервуара й капіляра, різниця $\alpha_p - \alpha_c$ називається коефіцієнтом видимого розширення рідини в склі.

З рідинних термометрів найпоширенішими є ртутні, що мають ряд переваг: ртуть не змочує скло (стілки капіляра), у широкому діапазоні температур залишається рідкою і має стабільний коефіцієнт розширення. Це приводить до того, що ртутні термометри мають майже рівномірну шкалу і забезпечують високу точність вимірювання температури. Нижня межа вимірювання (мінус 35 °С) визначається температурою затвердіння ртуті, а верхня (650 °С) – температурою початку розм'якшення скла. Недоліком ртутних термометрів є порівняно невеликий коефіцієнт розширення.

Скляні термометри з органічними рідинами застосовують за більш низьких температур від мінус 200 до плюс 200 °С. Недоліками таких рідин є змочування скла й несталість коефіцієнта розширення. Залежно від методу градування розрізняють дві групи термометрів: градуйовані при повному й неповному зануренні із заданою температурою їхньої виступаючої частини (зазвичай 20 °С).

Термометри першої групи мають більш високу точність вимірювання й використовуються в лабораторних умовах, термометри другої групи (технічні) – для вимірювання температур у промисловості (глибина їхнього занурення в міліметрах зазначена на звороті шкали). Технічні термометри за формою нижньої частини з резервуаром бувають прямими типу А і ку-

товими типу Б (нижня частина вигнута під кутом 90° відносно шкальної частини).

Межі основної похибки скляних термометрів вказуються в їхньому паспорті й залежать від діапазону вимірювань, ціни ділення шкали й виду термометричної рідини. Якщо при вимірюваннях температура виступаючої частини технічного термометра відрізняється від температури його градування, виникає додаткова похибка за рахунок виступаючого стовпчика рідини. Її усувають поправкою до показань термометра. Цю похибку необхідно враховувати для термометрів з органічними рідинами.

Іншою додатковою похибкою, характерною для скляних термометрів, є зсув їхньої нульової точки в бік зменшення температури. Це пояснюється тим, що скло після нагрівання при вимірюванні в нормальних умовах не відразу приймає свій первісний об'єм, причому чим вище вимірювана температура, тим зсув більший. Наприклад, у технічних термометрів зі шкалою $0 - 600^\circ\text{C}$ зсув досягає 3°C .

Точність показань технічних термометрів залежить від способу й місця їх установлення. Застосовують два способи установлення ртутних термометрів: у захисних оправах (гільзах) і без них прямим зануренням термометрів у вимірюване середовище. Перший спосіб використовують для вимірювання температури середовища, що перебуває під надлишковим тиском, при цьому довжина захисної гільзи залежить від необхідної глибини занурення.

При установленні ртутного термометра без гільзи зменшується відведення теплоти від резервуара, підвищується швидкість приладу, але зростає вплив тиску вимірюваного середовища на показання термометра (стиск резервуара з видавлюванням ртуті в капіляр). Тому такий спосіб використовують для середовищ із невеликими тисками й звичайно при короткочасних точних вимірюваннях їхньої температури. Для регулювання температури й сигналізації в лабораторних і промислових умовах застосовують електроконтактні ртутні термометри в інтервалі від мінус 30 до плюс 300°C . Їх випускають із постійними робочими контактами, упаяними в капіляр. Скляні рідинні термометри є одним з найбільш точних засобів вимірювань температури, але мають вузький діапазон використання.

Отже, підсумуємо поправки до рідинних термометрів

- основна, яка приймається з свідоцтва на термометр;
- на температуру виступаючого стовпа ртуті, яка вводиться тільки до показів лабораторних та зразкових термометрів в тих випадках, коли при

вимірювання частина ртутного стовпчика значно виступає із захисної гільзи, а температура навколишнього середовища значно відрізняється від температури вимірювання. Тоді стовп має температуру, яка не дорівнює температурі вимірюваного середовища, а ТКОР (температурний коефіцієнт об'ємного розширення) стовпа знаходиться між значеннями ТКОР при температурах вимірюваного середовища і навколишнього середовища.

Поправка

$$\Delta t_b = n \cdot \alpha_b (t_r - t_a), \quad (2.3)$$

де n – число градусів у виступаючій частині ртутного стовпа;

α_b – температурний коефіцієнт видимого розширення ртуті в склі K^{-1} ;

t_r – показання термометра;

t_a – середня температура виступаючого стовпа ртуті;

- на зміщення положення нульової точки, періодично перевіряється в процесі експлуатації за допомогою термостата плавлення льоду.

2.5 Дилатометричні (dilatometric) й біметалеві термометри

Тверді речовини, як і рідини, залежно від температури змінюють свої геометричні розміри. Наприклад, залежність довжини твердого тіла від його температури

$$L = L_0 [1 + \alpha(t - t_0)], \quad (2.4)$$

де L_0 – початкова довжина речовини при фіксованій температурі t_0 ;

α – коефіцієнт температурного розширення;

t – поточна температура речовини.

До дилатометричних термометрів відносяться стержневий і пластинчастий (біметалевий) термометри, дія яких оснований на різниці відносного видовження двох різних тіл, що мають різні температурні коефіцієнти лінійного розширення під дією температури. Через нестабільність коефіцієнта α дилатометричні термометри не одержали широкого розповсюдження. Їх застосовують як чутливі елементи сигналізаторів температури, а іноді для компенсації впливу температури навколишнього середовища на показання приладів, у які їх вбудовують.

Значення середніх температурних коефіцієнтів лінійного розширення для деяких матеріалів, в інтервалі температур 0 – 200 °С вказані в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Середні температурні коефіцієнти лінійного розширення

Матеріал	$\alpha \cdot 10^6, K^{-1}$	Матеріал	$\alpha \cdot 10^6, K^{-1}$
Алюміній	24	Латунь	18,5
Залізо	12,5	Нікель	14
Інвар (64%Fe, 36%Ni)	3,5	Сталь немагнітна (X18H10T)	17
Кварц плавлений	0,55	Фарфор	3,5

Біметалеві термометри реалізуються у вигляді двох металевих стрічок, з'єднаних між собою, які мають різні коефіцієнти теплового розширення. При зміні температури система вигинається (bending) і по вигину визначається температура.

2.6 Манометричні термометри

Принцип дії манометричних термометрів ґрунтується на залежності тиску робочої речовини (рідини, газу або пари з ридиною), що займає закритий об'єм (термосистему), від температури. За видом робочої речовини ці термометри поділяють на газові, конденсаційні й рідинні. Робочу речовину вибирають, виходячи із заданого діапазону вимірювань і умов роботи.

Відомо, що при підвищенні температури тиск збільшується, а при зниженні зменшується. Зміна тиску робочої речовини передається через капіляр пружині манометра (рис. 2.2), що частково випрямлюється, викликаючи переміщення стрілки по шкалі приладу.

Манометричні термометри мають ряд похибок вимірювання. Крім основної, що викликається недосконалістю роботи пружини і передавального механізму ці прилади мають також додаткові похибки: барометричну, пов'язану зі зміною барометричного тиску в процесі вимірювань, температурну (в газових і рідинних), що виникає при коливаннях температури навколишнього повітря, гідростатичну (в рідинних і конденсаційних), яка з'являється з установленням термобалона і пружини на різних висотах, один відносно одної.

Газові манометричні термометри, заповнювані азотом, випускаються для вимірювання температур від мінус 200 до плюс 600 °С, класом точнос-

ті 1 і 1,5 і мають рівномірну шкалу. Залежність зміни тиску газу при постійному об'ємі пропорційна зміні температури: $P_2 - P_1 = \beta \cdot P_1(t_2 - t_1)$. Тут P_1 і P_2 початковий і кінцевий тиск робочої речовини МПа, β – температурний коефіцієнт тиску, K^{-1} . Для газів коефіцієнт тиску рівний коефіцієнту об'ємного розширення α , який має практично постійне значення, рівне $3,66 \cdot 10^{-3} K^{-1}$. Таким чином, для газів

$$P_2 - P_1 = \alpha \cdot P_1(t_2 - t_1). \quad (2.5)$$

Барометрична похибка газового термометра зменшується з підвищенням в системі початкового тиску, тому заповнення термобалона азотом проводять під тиском 3,5 МПа.

На показання газових манометрів може впливати температура навколишнього середовища. Відмінність цієї температури від її значення, прийнятого при градуванні приладу ($t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$), викликає зміну тиску газу в термометрі, що позначається на його показаннях.

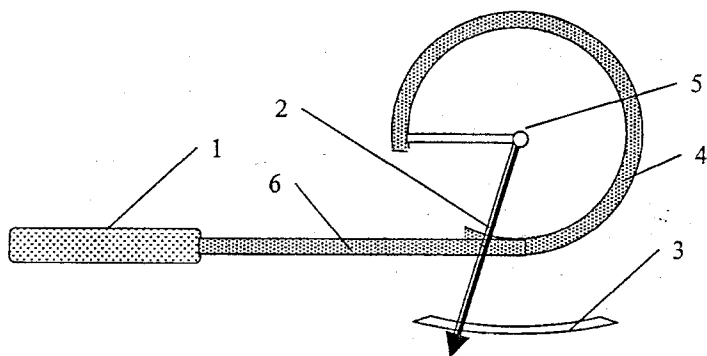


Рисунок 2.2 – Схема манометричного термометра
 1 – термобалон – металева трубка з робочим тілом;
 2 – покажчик; 3 – шкала; 4 – одновиткова пружина;
 5 – вісь; 6 – манометричний капіляр

Конденсаційні манометричні термометри випускаються для вимірювання температур від мінус 50 до плюс 300 $^\circ\text{C}$ класом точності 1,5; 2,5 і мають нерівномірну шкалу. Термобалон заповнюють низькокиплячою рідиною (фреоном, пропіленом, ацетоном, етилбензином), що перебуває в рівновазі

з насиченою парою. Капіляр і пружину зазвичай заповнюють іншою рідиною (наприклад, метаксилолом). При цьому температура рідини нелінійно залежить від тиску насиченої пари. Дія цих приладів оснований на законі Дальтона, який дає однозначну залежність між тиском і температурою насиченої пари аж до критичної температури речовини. Перевагами цих термометрів є незалежність показань від температури навколишнього середовища, більша швидкодія, чим у газових термометрів, слабкий вплив коливань атмосферного тиску на показання, а їхніми недоліками – нерівномірність шкали, особливо початкової ділянки, залежність показань від розташування термобалона й корпусу приладу. Якщо термобалон розташований вище корпусу, показання приладу будуть завищені, якщо нижче – занижені. Внаслідок цієї похибки довжина капіляра не перевищує 25 м.

Рідинні манометричні термометри випускають для вимірювання температур від 150 до 300 °С, класом точності 1; 1,5 і мають рівномірну шкалу. Їх заповнюють силіконовими рідинами, метаксилоном, пропіловим спиртом.

Рідинні термометри відрізняються від газових і конденсаційних тим, що їхня робоча речовина нестислива, завдяки чому забезпечується найбільша серед манометричних термометрів швидкодія. Зміни атмосферного тиску на показання манометра впливу не роблять. Недоліки рідинних термометрів – залежність їхніх показань від температури навколишнього середовища, а також суттєва гідростатична похибка через різні рівні розташування термобалона й вимірювального приладу. Для усунення першого недоліку застосовують ті ж способи, що й у газових термометрах, а для усунення другого обмежують довжину капіляра до 10 м.

2.7 Термоелектричні термометри

Термопари є активним електричним датчиком температури, придатним для точного вимірювання температур не лише в газових або рідинних середовищах, а й на твердих поверхнях. Завдяки своїй простоті, надійності, стабільності, простоті автоматизації і можливості дистанційного контролю вимірюваної температури вони надзвичайно широко використовуються для контролю і вимірювання температур в лабораторній практиці і в промисловості.

Принцип дії термоелектричних термометрів оснований на властивості металів та їх сплавів створювати термо-е.р.с. (thermoelectric power) в місці

спаю двох різнорідних провідників, яка пропорційна температурі на гарячому і холодному кінцях спаю. Ця термо-е.р.с. визначається, як

$$E = \alpha \cdot (t_{\text{гар}} - t_{\text{хол}}), \quad (2.6)$$

де α – диференційний коефіцієнт термо-е.р.с пари, мкВ/К;

$t_{\text{гар}}$ і $t_{\text{хол}}$ – температури гарячого і холодного спаїв термопари відповідно.

Термометри складаються із двох різнорідних провідників, спаяні кінці яких називають гарячими або робочими, а вільні – холодними.

Знаючи закон зміни термо-е.р.с. термометра залежно від температури, за допомогою електровимірювального (electrical measuring) приладу можна визначити шукану температуру. При цьому термоелектричний термометр є первинним вимірювальним перетворювачем, а як вторинний прилад використовують мілівольтметри й потенціометри.

Розглянемо замкнуте коло із двох різнорідних провідників А і В (рис. 2.3).

У спах (точки 1 і 2) виникають дві термо-е.р.с. Спай 1, що занурюється у вимірюване середовище, називають робочим кінцем, а спай 2 – вільним кінцем термоелектричного термометра. При цьому температура в проміжних точках дротів не впливає на величину термо-е.р.с., якщо дроти мають однорідну структуру. Основним правилом роботи з термопарами є те, що якщо в коло термопари включено ще один дріт, кінці якого мають однакові температури, то він не впливає на величину термо-е.р.с. Це дає змогу включати в коло прилад, для вимірювання термо-е.р.с, розташовуючи його на суттєвій відстані від гарячого спаю термопари. Для провідників термопар використовують дріт діаметром від 0,1 до 2 мм.

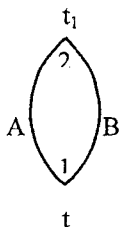


Рисунок 2.3 – Коло термоелектричного термометра

Залежно від значення термо-е.р.с. й загального електричного опору в контурі провідників виникає електричний струм, який можна виміряти. Для вимірювання струму, а отже, і термо-е.р.с. термометра, в його коло за допомогою з'єднувальних контактів включають вимірювальний прилад ВП двома способами: розривають коло у спаї 2 або один із дрітів термометра (рис. 2.4).

Перший спосіб приєднання вимірювального приладу одержав більше поширення.

Міжнародною електротехнічною комісією рекомендовано градуювальні таблиці (табл. 2.4) для шести типів термопар (в дужках позначення, що рекомендовані Національним інститутом стандартів США).

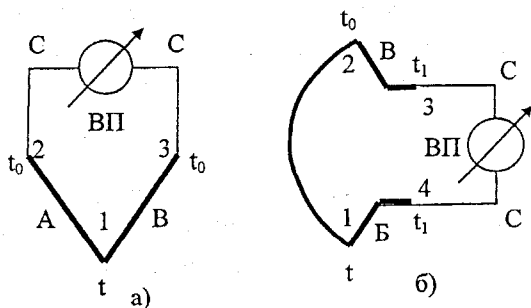


Рисунок 2.4 – Схеми включення вимірювального приладу в коло термоелектричного термометра а) у місце спаю, б) в один із термопарних дрітів

Вимірювання температури термоелектричним термометром допускається тоді, коли точно відома температура t_0 його вільного кінця. Залежність термо-е.р.с. $E(t)$ термометра від температури робочого кінця при температурі його вільних кінців $t_0 = 0^\circ\text{C}$ визначається експериментально й називається градуювальною характеристикою термометра. На підставі цієї залежності складають градуювальні таблиці й графіки для визначення температури за термо-е.р.с. термопари.

Мідь – константан [МКн], (Т)

Константан – сплав міді з нікелем, складу $\text{Cu}_{57}\text{Ni}_{43}$, марка МНМц 43-0,5. Термопара мідь – константан (МКн) недорога, точна і дозволяє надійно вимірювати температуру від -260 до $+400^\circ\text{C}$.

Таблиця 2.4 – Термоелектричні термометри стандартних градуювань

Позначення типів термоелектричних термометрів	Найменування матеріалів термоелектродів	Позначення градуювання	Діапазон вимірювань при тривалому застосуванні	Межа вимірювань, що допускається, при короткотривалому застосуванні
ТПП (S, R)	Платинородій (10% родію) – Платина, Платинородій (13% родію) – Платина,	ПП10/0 ПП13/0	0–1300	1600
ТПР (В)	Платинородій (30% родію) – Платинородій (6% родію)	ПР30/6	300–1600	1800
ТВР (С, G)	Вольфрамрений (5% ренію) – Вольфрамрений (20% ренію)	ВР5/20	0–2200	2500
ТХА (К)	Хромель – Алюмель	ХА	–200–1000	1300
ТХК (Е)	Хромель – Копель	ХК	–200–600	800
ТМК (Т)	Мідь – Константан	МК	–260–400	500
ТЖК (J)	Залізо – Константан	ЖК	–200–750	750

Залізо – константан [ЖКн], (J)

Термопара залізо – константан широко використовується до 750 °С. Вона дозволяє вимірювати вдвічі більшу температуру ніж термопара МКн.

Її перевага також в можливості використання як в окислювальних, так і в відновлювальних середовищах, причому в останньому випадку робочі температури можуть бути більшими. Однак, оскільки Fe менш однорідний ніж Cu, в цій термопарі спостерігаються паразитні термо-е.р.с. вздовж обох віток, а її точність приблизно вдвоє нижча (як і ціна) в порівнянні з термопарою мідь – константан.

Хромель – константан [ХК], (E)

Хромель – сплав складу Ni₉₀Cr₁₀ (НХ9,5), який деколи позначають як хромель-Р. Термопара ХК має найвищу термо-е.р.с з шести стандартизованих термопар. Вона може використовуватись приблизно від мінус 250 до 750 °С, в тому числі і в слабоокислювальній (poor oxidizing) або в відновлювальній (renewable) атмосфері. Висока термо-е.р.с. робить цю термопару придатною для диференційного вимірювання температури.

Хромель – алюмель [ХА], (K)

Алюмель досить складний нікелевий сплав складу Ni₉₄Mn₃Al₂Si, (НМцАК 2-2-1), розроблений як термопарний матеріал з термо-е.р.с. про-

тилежного знаку відносно хромелю. Пара хромель – алюмель має постійну термо-е.р.с. ≈ 40 мкВ/К в інтервалі температур 250 – 1000 °С. Термопара ХА може короткий час працювати до 1300 °С, вона більш окисостійка ніж інші термопари і може використовуватися до температур 1200 °С без швидкого окислення. У відновлювальній атмосфері термопару ХА використовувати не можна. Для низьких температур її характеристики приблизно такі ж як мідь – константан, хоча для вимірювань температур нижче кімнатної рекомендується інший склад хромелю: $\text{Ni}_{64}\text{Fe}_{25}\text{Cr}_{11}$ (хромель-Х).

Вольфрам – вольфрамреній [BP5/20 і BP10/20], (С і G).

Ці термопари, що складаються з тугоплавких металів, можна використовувати до температур 2700 – 3000 °С. Потрібно пам'ятати, що термопари типу ВР нестабільні в окислювальному середовищі і повинні використовуватися в вакуумі або в атмосфері водню чи інертного газу. Не дивлячись на відносну крихкість чистого вольфраму, за кордоном широко використовуються термопари (W – W+Re₂₆ – типу G).

Платина – платинородій (R, S, B).

Це базисні термопари, які відіграють велику роль в термометрії внаслідок прекрасних механічних і хімічних властивостей і високого ступеня гомогенності. Термопари мають такий склад: ПР 10/0 – (Pt – Pt₉₀Rh₁₀ тип S), ПР 13/0 – (Pt – Pt₈₇Rh₁₃, тип R), ПР 30/6 (Pt₇₀Rh₃₀ – Pt₉₄Rh₆, тип В). Термопари S, R і В, які постачаються, мають або високоякісну калібрувальну, або нормальну стандартну шкалу. Їх можна тривалий час використовувати на повітрі та в інертній атмосфері. У вакуумі термопари цих типів використовувати не можна.

Для вимірювання температур термопарами один із спаїв термостатують при 0 °С. Таблиці саме і складені для випадку, коли холодний спай має 0 °С. Якщо з якихось причин спай не вдається термостатувати при 0 °С, то в цьому випадку, знаючи, що термо-е.р.с. пропорційна $T_1 - T_2$, для визначення температури необхідно внести поправку на температуру холодного спаю. Для цього іншим термометром (наприклад ртутним) вимірюють температуру навколишнього середовища, в якому знаходяться холодні спай термопари і віднімають від різниці $T_1 - T_2$. За визначеним ΔT з таблиць чи графіків визначають температуру. Клас точності ртутного термометра, яким вимірюють температуру навколишнього середовища, для врахування поправки на холодний спай не повинен бути нижчим за клас точності термопари.

На практиці температура вільних кінців термометра, хоча й підтримується постійною, але не дорівнює $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, тому термо-е.р.с. теж змінюється й доводиться вносити поправки в показання приладу.

Для введення поправки необхідно до отриманої термо-е.р.с. термометра $E(t)$ додати термо-е.р.с. $E(t_0)$, взяту з градуювальних таблиць даних термоелектродів. За отриманою сумою за допомогою градуювальних таблиць визначають шукану температуру.

2.8 Компенсаційні проводи

Вільні (холодні) спаї термопар повинні знаходитись з температурою $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, або їх температура повинна бути постійною, щоб можна було ввести поправку на холодний спай. Якщо вільні кінці розташувати в головці термоелектричного термометра, там де закінчуються термоелектроди термометра, то сталу температуру вільних спаїв забезпечити буде неможливо внаслідок невеликої відстані до вимірюваного середовища, нерівномірного температурного поля і високого температурного градієнта в точці знаходження вільних спаїв. В зв'язку з цим виникає необхідність подовжити термоелектричний термометр, не спотворюючи його термо-е.р.с., щоб відвести вільні кінці в таке місце, де буде зручно їх термостатувати, або встановити пристрій для автоматичного введення поправки. Це робиться за допомогою компенсаційних проводів. Для виключення паразитних термо-е.р.с. компенсаційні (подовжувальні) проводи повинні мати ту ж саму градувальну характеристику, що й сам термометр. В таблиці 2.5 вказані рекомендовані типи компенсаційних проводів для різних видів термопар.

Таблиця 2.5 – Рекомендовані подовжувальні компенсаційні проводи

Термопара	Подовжувальні термопарні проводи			
	Позначення	Пара жил	Фарбування ізоляції	Термо-е.р.с.
Мідь – копель	МК	мідь – копель	червоно – жовта	4,79
Хромель – копель	ХК	хромель – копель	фіолетово – жовта	6,9
Хромель – алюмель	М	мідь – константан	червоно – коричнева	4,1
Платинородій – платина	П	мідь – ТП	червоно – зелена	0,64
Вольфрамрений – вольфрамрений	М-МН	мідь – МН2,4	червоно – синя	1,4

Кожен матеріал проводу має свій колір ізоляції або свої кольорові нитки в обмотці проводів.

2.9 Методи вимірювання термо-е.р.с.

Вимірювання мілівольтметром. Коли термо-е.р.с. термометра вимірюється мілівольтметром, необхідно мати на увазі, що фактично мілівольтметр вимірює не термо-е.р.с., а струм, що протікає по рамці приладу. Тому для однозначної залежності між термо-е.р.с. і показами мілівольтметра необхідно, щоб опір всього кола був сталим. Якщо врахувати ще й вимогу правильності показів, то необхідно, щоб опір всього кола був рівний тому значенню опору кола, який був при градууванні вольтметра. На рис. 2.5 подана типова схема підключення термопар до мілівольтметра. Для підгонки опору зовнішнього кола до градуовального значення використовується підганяльна котушка $R_{\text{п}}$. Щоб зменшити вплив зміни опору зовнішнього кола на показання мілівольтметра, необхідно зменшити опір термометра, з'єднувальних і подовжувальних проводів, щоб їх частка в загальному опорі всього кола була незначною. Для цього електроди термометра виготовляються в більшості випадків з якнайтовстішого дроту (2 – 3 мм), а подовжувальні проводи використовують перерізом до $2,5 \text{ мм}^2$. В цьому випадку опір зовнішнього кола не перевищує 3 – 5 Ом. Опір мілівольтметра робиться в сотні раз більшим, ніж опір зовнішнього кола.

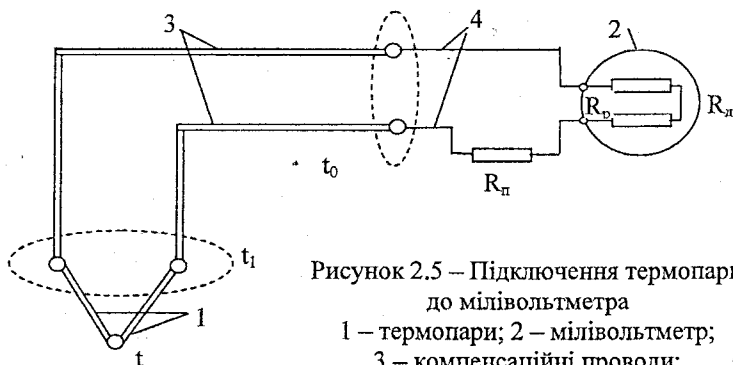


Рисунок 2.5 – Підключення термопар до мілівольтметра

- 1 – термопарі; 2 – мілівольтметр;
- 3 – компенсаційні проводи;
- 4 – з'єднувальні проводи

Тут $R_{\text{п}}$ – додатковий манганіновий опір для зменшення температурного коефіцієнта мілівольтметра. Таким чином, зміна опору кола термопара – мілівольтметр, що викликається зміною температури навколишнього сере-

довища, значно зменшена, а разом з нею зменшені і температурні похибки вимірювальної системи.

Компенсаційний метод ґрунтується на врівноваженні термо-е.р.с., яка вимірюється, спадом напруги, значення якої може бути визначено дуже точно.

На рис. 2.6 зображено найпростіший варіант компенсаційного методу вимірювання термо-е.р.с.

Джерело е.р.с. (термопара) E_T підключено до подільника напруги R_p , що живиться від джерела струму E таким чином, що спад напруги U_{ab} на подільнику включено зустрічно E_T . Змінюючи величину плечей R_p можна знайти положення, коли $U_{ab} = E_T$. Тоді термо-е.р.с. E_T буде скомпенсована, а нуль-прилад (НП) покаже нуль. Щоб визначити значення термо-е.р.с. E_T , потрібно визначити спад напруги: $U_{ab} = I \cdot R_{ab}$. Значення струму I , що протікає в робочому контурі, може бути визначене за показами міліамперметра.

Коли термо-е.р.с. вимірюють просто мілівольтметром, опір кола впливає на результати вимірювань. Тут цього не відбувається але необхідно, щоб клас точності міліамперметра був якомога вищим.

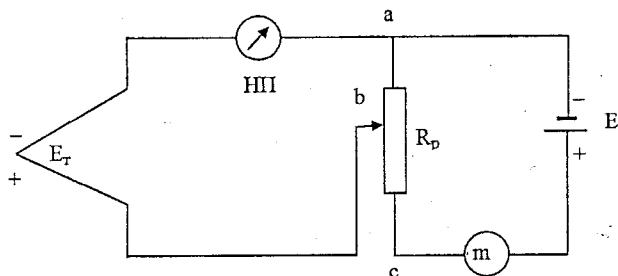


Рисунок 2.6 – Компенсаційний метод вимірювання термо-е.р.с.

Цього недоліку позбавлена схема з постійною силою робочого струму (рис. 2.7).

Потенціометр живиться від джерела струму напругою E , значення робочого струму може змінюватися змінним резистором R_y . Для точного установлення робочого струму спад напруги на резисторі з відомим опором R_k порівнюється з е.р.с. нормального елемента (НЕ). Нормальний елемент – електрохімічне джерело ЕРС, яка відома з високим ступенем точності, наприклад 1,0186 В. Для контролю правильності роботи та налагодження схеми, в схемі з е.р.с. НЕ порівнюється спад напруги на резисторі R_k . Перемикач стоїть в положенні "Контроль" (К). Якщо стрілка нуль-

гальванометра відхиляється від середнього значення, то за допомогою резистора R_y добиваються рівності спаду напруги на ділянці ab (U_{ab}) з е.р.с. НЕ.

Після цього перемикач переводиться в положення "Вимірювання" (В) і термо-е.р.с. E_T термопарі врівноважується спадом напруги на ділянці bc , зміною опору резистора R_p . Якщо значення R_p , R_k і $E_{не}$ залишаються сталими, а зміна опору в резисторі R_p є лінійною, то положення реохорда резистора R_p можна відградувати в одиницях спаду напруги (мВ), а потім за таблицями визначати температуру гарячого спаю термопарі.

Переваги схеми:

- незалежність показів від зміни опорів зовнішнього кола;
- підвищення точності вимірювань за рахунок підвищення точності установлення струму ($\Delta E_{не} \leq 0,01\%$; $\Delta R_{не} \leq 0,02\%$);
- гранична похибка потенціометрів становить 0,05% і менше.

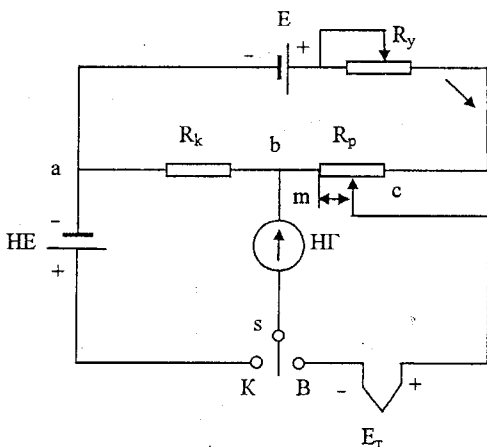


Рисунок 2.7 – Потенціометр з постійною силою робочого струму

Крім ручних існують ще й автоматичні потенціометри, які можуть проводити вимірювання без участі оператора, в автоматичному режимі.

Автоматичний потенціометр (рис. 2.8) застосовується для компенсаційних вимірювань термоелектрорушійної сили (термо-е.р.с.) без участі людини. В них поправка на температуру вільних кінців вводиться автоматично. Живлення вимірювальної схеми виконується від джерела стабілізованого живлення.

Термо-е.р.с. терморпари (E_T) врівноважується спадом напруги на ділянці $b - e$. Якщо $U_{b-e} \neq E_T$, то на вхід електронного блока надходить різниця сигналів $\Delta U = U_{b-e} - E_T$, яка в електронному блоці перетворюється з постійного струму в змінний та підсилюється за напругою та потужністю.

Результуючий вихідний сигнал з електронного блока надходить на реверсний двигун, який переміщує повзун реохорду так, щоб $\Delta U = 0$, тоді $U_{b-e} = E_T$. Разом з переміщенням повзунка реохорду переміщується стрілка приладу та перо на папері. Стабілізує робочий струм джерело стабілізованого живлення (ДСЖ). Для автоматичного введення поправки на температуру вільних кінців є опір R_M .

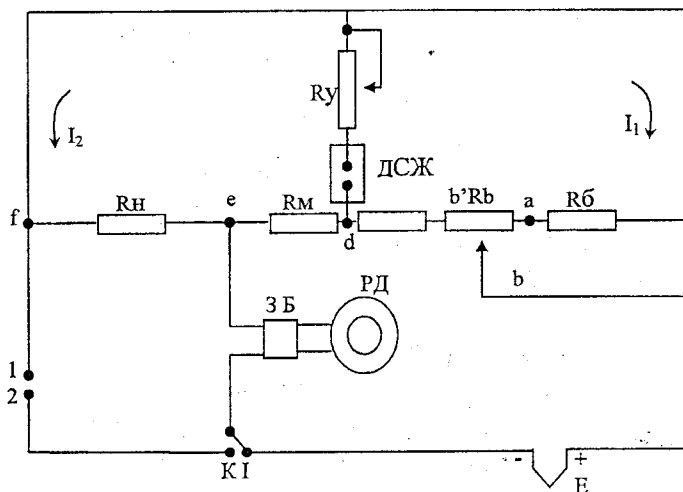


Рисунок 2.8 – Схема автоматичного потенціометра

2.10 Термометри опору та методи вимірювання опорів

Для вимірювань порівняно невисоких температур (не більше $650\text{ }^\circ\text{C}$) часто застосовують термометри опору (ТО), принцип дії яких оснований на властивості металів і напівпровідників змінювати свій електричний опір при зміні температури. Параметр, що характеризує зміну електричного опору із зміною температури, називають температурним коефіцієнтом електроопору. Для матеріалів, в яких температурний коефіцієнт не залежить від температури, він визначається

$$\alpha = (R_t - R_0)/(R_0 t), \quad (2.7)$$

де R_t і R_0 опір для температури t і 0 °С.

Для матеріалів в яких ТКО залежить від температури, для кожного значення температури він визначається

$$\alpha = (1/R_0)/(dR_t/dt). \quad (2.8)$$

Розмірність ТКО °С⁻¹, або К⁻¹. Для більшості чистих металів він знаходиться в межах 0,0035–0,0065 К⁻¹. Для напівпровідників ТКО на порядок більший і має від'ємне значення: –(0,01–0,15) К⁻¹.

Отже, за нагрівання металів їхній опір збільшується у вигляді такої лінійної залежності

$$R_t = R_0(1 + \alpha t). \quad (2.9)$$

Матеріали для термометрів опору мають відповідати тим же вимогам, що й терморезистивні матеріали: стабільність градувальної характеристики і її відтворюваність. Якщо ці умови не виконуються, то матеріал використовувати для датчиків не можна. Всі інші вимоги: лінійність характеристики, високий питомий опір тощо є не обов'язковими, а бажаними. Зараз для датчиків використовують мідь, платину та нікель. Найчастіше для невисоких температур використовують мідь: вона дешева, пластична, має практично лінійну характеристику (2.9). Недоліки: вона має невеликий питомий опір ($\rho = 1,7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м) і окисляється, тому датчики з міді використовують до температур 200 °С.

Термометри опору з металів виготовляють шляхом намотки тонкого дроту на каркас з ізоляційного матеріалу. Для захисту від пошкоджень дріт разом з каркасом поміщають в захисну оболонку.

Мідні термометри опору за вимогами ГОСТ 6651–78 можуть використовуватись для тривалого вимірювання температур від –200 до 200 °С. Вони випускаються II і III класів. Номінальні опори для 0 °С складають 10, 50 і 100 Ом, і маркуються 10М, 50М, 100М. Межа допустимої основної похибки вибирається з ряду: 0,2; 0,3; 0,5; 1; 2; 3; 5; 10 і 20 °С. Для термометрів II класу це, як правило 0,3 чи 0,5 °С, а для III класу 1 або 2 °С.

Нікелеві термометри опору випускаються III класу і працюють в інтервалі –60 +180 °С. Їхні номінальні опори 50Н і 100Н. Нікель має високий

ТКО і високий питомий опір, що дозволяє виготовляти датчики чутливі і з малими габаритами.

Платинові термометри опору використовуються на температурах -260 $+1100$ °С (ГОСТ 6651–78) і мають такі опори: 1П; 5П; 10П; 50П; 100П і 500П. Недоліком платини є її забруднення у відновлювальному середовищі парама металів та окисом вуглецю при високих температурах.

Напівпровідникові ТО мають температурну залежність характеристики, що може бути описана виразом $R_T = R_0 \exp\left(B \frac{T_0 - T}{T_0 T}\right)$, де R_0 визначає опір

термометра для температури T_0 (як правило 20 °С). Оскільки сучасні технології не дозволяють отримувати напівпровідники з ідентичними характеристиками, всі напівпровідникові перетворювачі мають індивідуальні градувальні характеристики.

2.11 Способи підключення термометрів опору

Принцип дії ТО базується на залежності між температурою та активним опором металевого провідника. Опір вимірюється логометром чи врівноваженими мостами, що градуйовані в градусах Цельсія.

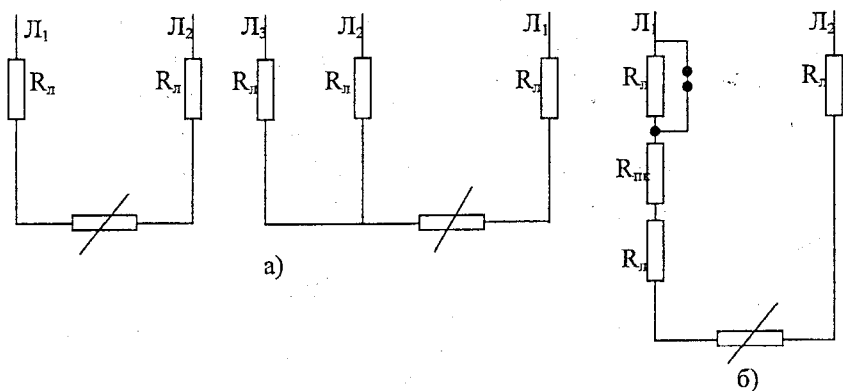


Рисунок 2.9 – Схема підключення ТО

а) дво- та трипровідна схеми підключення ТО

б) схема підгонки опорів провідів двопровідної лінії

ТО випускаються двох моделей: одинарні і подвійні. У подвійному термометрі в арматуру вмонтовані два чутливих елементи, електрично не пов'язаних між собою. Кожний чутливий елемент має свою пару затискачів в головці термометра, до якої підключається вторинний прилад.

Особливістю використання ТО є те, що під час вимірювання через ТО повинен проходити струм. При цьому за законом Джоуля-Ленца виділяється теплота $Q = I^2R$, яка нагріває термометр до більш високої температури, ніж температура вимірюваного середовища, що викликає відповідну зміну його опору.

Мостові схеми підключення ТО бувають врівноважені – коли за трьома відомими опорами визначають четвертий – невідомий, та не врівноважені, для безпосередніх вимірювань застосовуються рідко, але знайшли широке використання в газоаналізаторах, концентратомірах тощо. Найпоширенішими є двоплечові врівноважені мости, коли рухомий контакт входить в вимірювальну діагональ. В цьому випадку в момент рівноваги струм у вимірювальній діагоналі дорівнює нулю і тому опір перехідного контакту змінного резистора на впливає на результат (рис. 2.10).

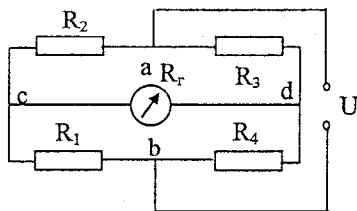


Рисунок 2.10 – Принципова схема моста

протікає через вимірювальний прилад в діагоналі cd , визначається формулою

Щоб установити залежність між значеннями елементів схеми скористаємось теоремою про еквівалентний генератор, згідно з якою струм I_{cd} дорівнює напрузі холостого ходу U_{cd} , поділеній на суму опорів діагоналі cd і опору між кінцями діагоналі cd при короткому замиканні всіх ЕРС в колі. Тоді струм, що

$$I_{cd} = \frac{U_{cd}}{R_r + R_{(c-d)к.з.}} = \frac{U \frac{R_1}{R_1 + R_2} - U \frac{R_4}{R_3 + R_4}}{R_r + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4}} = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{R_r (R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + R_1 R_2 (R_3 + R_4) + R_3 R_4 (R_1 + R_2)} \quad (2.10)$$

З цього виразу витікає, що можливі два режими роботи моста:

1) рівноважний, коли зміною опору одного або декількох резисторів добиваються виконання умови $I = 0$, яка можлива, коли: $R_1 R_3 = R_2 R_4$;

2) нерівноважний, коли $I = f(U, R_1, R_2, R_3, R_4, R_T)$. В цьому випадку необхідною умовою є однозначна залежність вимірюваного струму від опору якогось резистора, а для цього потрібно, щоб усі інші елементи схеми мали сталі значення.

Для врівноваження моста вимірюється опір зразу двох плечей або співвідношення опорів плечей. Найпопулярнішою є трипровідна схема включення термометра.

Використання третього з'єднувального дроту аб

переміщує одну з вершин моста безпосередньо в голів-ку термометра, в результаті чого вдвоє зменшується опір лінії, що входить разом з термометром у вимірювальне плече моста і тому частково знижується похибка вимірювань. Якщо R_1 і R_2 рівні (симетричний міст), використання трипровідної схеми повністю виключає вплив опору $R_{л}$. В цьому випадку, при рівновазі моста

$$R_1(R_T + 0,5R_{л}) = R_2(R_3 + 0,5R_{л}), \quad (2.11)$$

або, після скорочення $R_T = R_3$.

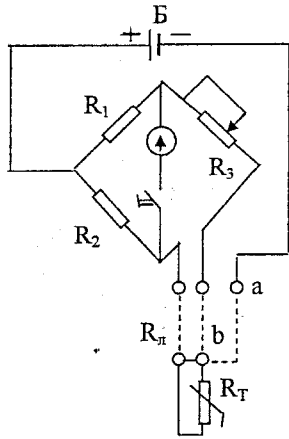


Рисунок 2.11 – Схема включення ТО в трипровідний міст

2.12 Логометр

Принцип дії логометра базується на вимірюваннях відношення струмів в двох колах. В одне з них включений термометр опорю, а в друге – постійний опір (рис. 2.12).

Логометр складається з двох рамок 1 і 2, які жорстко скріплені між собою та зі стрілкою 3. Рамки розміщені в повітряному зазорі між полюсними наконечниками 4 і 5 постійного магніту та зовнішнім осередям 7. Цей

зазор нерівномірний (магніт має форму еліпса) і тому значення магнітної індукції в різних точках зазору будуть різними.

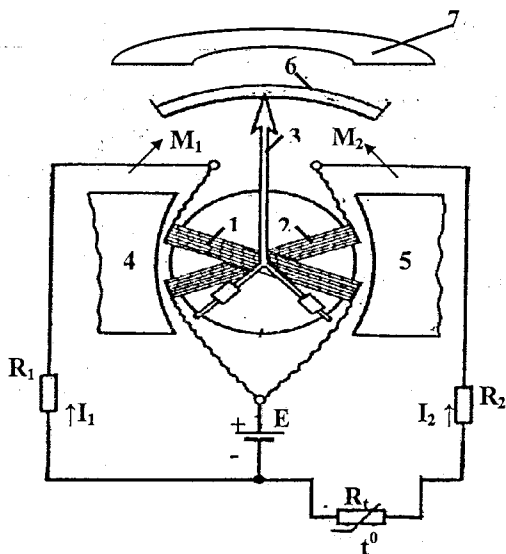


Рисунок 2.12 – Логометр

1,2 – рамки; 3 – стрілка; 4,5 – полюсні наконечники;
6 – шкала; 7 – осердя

Повітряний зазор (clearance) зміщений від центра до країв полюсних наконечників і, відповідно, від центра до країв наконечників зростає магнітна індукція у зазорі. Обидві рамки живляться від одного джерела постійного струму, а їх обертальні моменти направлені назустріч один одному.

$$M_1 = 2 \cdot r_1 \cdot n_1 \cdot I_1 \cdot B \cdot y_1, \quad (2.12)$$

$$M_2 = 2 \cdot r_2 \cdot n_2 \cdot I_2 \cdot B \cdot y_2, \quad (2.13)$$

де M_1, M_2 – обертальні моменти рамок;

$r_1 = r_2$ – опори рамок, Ом;

$n_1 = n_2$ – число витків в рамці;

$l_1 = l_2$ – довжина витка.

Рівновага буде, коли $M_1 = M_2$.

$$B_1 I_1 = B_2 I_2, \quad (2.14)$$

де B – магнітна індукція,

$$\frac{B_2}{B_1} = f(\varphi), \quad (2.15)$$

де φ – кут оберту рамки.

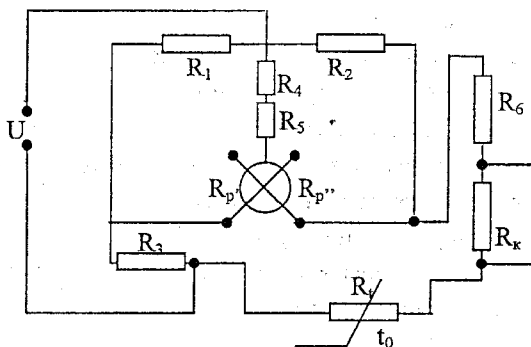


Рисунок 2.13 – Симетрична мостова схема логометра

Відношення $\frac{I_1}{I_2}$ залежить від опору резисторів.

$$\varphi = F(R_t), \quad (2.16)$$

де R_t – опір термометра опору.

Зміна температури змінює опір резистора, змінює відношення $\frac{I_1}{I_2}$ і змі-

нює рівновагу рухомої системи. Для підвищення чутливості застосовують логометр з симетричною мостовою схемою. Резистор R_4 зроблений з міді і дозволяє зміни в бік зменшення температурного коефіцієнта приладу. Опори $R_1 = R_2$. Резистори R_3 і R_5 служать для встановлення діапазону вимірювань. R_6 потрібний для підгонки опору з'єднувальних проводів до градуйованого значення. Для цього R_t закорочується, а з R_k знімається закоротка. Опір R_k дорівнює опору термометра, який відмічений на шкалі червоною рисою. Тому при включенні R_k замість R_t стрілка логометра по-

винна стати на червону риску, якщо опір з'єднувальних проводів буде рівним градуированому. Коли ця умова не виконується, то підстроювальним резистором змінюється опір кола до того моменту, поки стрілка не стане на червону лінію.

2.13 Пірометри

У розглянутих раніше термометрах (термометри розширення, термоелектричні, опору) передбачається безпосередній контакт між їхнім чутливим елементом і вимірюваним середовищем. Верхня межа таких контактних методів вимірювання обмежується температурою 1800 °С. Для визначення більш високих температур без безпосереднього контакту термометрів з вимірюваним середовищем застосовують пірометри. Шкали пірометрів градуують за випромінюванням абсолютно чорного тіла. Оскільки всі фізичні тіла випромінюють меншу енергію, ніж чорне тіло, пірометри показують температуру більш низьку, ніж дійсна температура нагрітого тіла.

За принципом дії розрізняють пірометри оптичні (монохроматичні) і радіаційні (повного випромінювання).

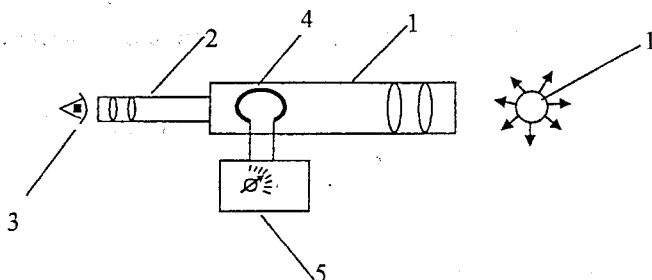


Рисунок 2.14 – Схема оптичного пірометра із "зникаючою" ниткою
1 – об'єктив; 2 – окуляр; 3 – оператор;
4 – "зникаюча" нитка; 5 – регулятор потужності; 6 – об'єкт.

В оптичних пірометрах порівнюється яскравість випромінювання певної довжини хвилі нагрітого тіла, температура якого вимірюється, і розжарення нитки спеціальної фотометричної лампи, вбудованої в прилад. Порівняння інтенсивності відбувається після пропускання випромінювання обох тіл через червоний світлофільтр. Пірометри відносять до візуальних приладів.

Існує інший тип оптичних пірометрів – фотоелектричні ФЕП, що випускаються класом точності 1. У них яскравісні температури об'єкта й нитки порівнюються фотоелементами або фотоопорами, а вимірювання виконуються потенціометрами.

Дія радіаційних (повного випромінювання) пірометрів базується на фокусуванні теплового випромінювання тіла за допомогою телескопа стандартного типу (наприклад, ТЕРА) у місці робочих спаїв термобатарей, встановленої в ньому. Виникаюча термо-е.р.с. надходить на вторинний прилад – мілівольтметр або автоматичний потенціометр.

3 МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПОТОКІВ. ТЕПЛОМІРИ

Вимірювання витрати і кількості теплоти відіграє важливу роль при автоматизації систем теплопостачання. Прилад, що вимірює кількість теплоти, перенесеної теплоносієм в одиницю часу, називається тепломіром.

Прилад, що вимірює кількість теплоти, перенесеної теплоносієм за деякий проміжок часу, називається тепловим лічильником.

У теплоенергетиці може вимірятися або витрата теплоти з потоком теплоносія (теплова потужність потоку), або кількість теплоти, що виробляється чи споживається різними установками. У першому випадку витрата j визначається через масову витрату G_m і ентальпію h потоку відповідно до відомого виразу

$$q = G_m \cdot h. \quad (3.1)$$

Тепломіри, що реалізують цей вираз, називаються тепломірами потоку.

В другому випадку витрата теплоти може бути визначена як різниця теплових потужностей на вході і виході установки

$$q = (G_m \cdot h)_{\text{вх}} - (G_m \cdot h)_{\text{вих}}. \quad (3.2)$$

Тепломіри, що реалізують цей вираз, називаються різницевиими.

При рівності витрати теплоносія на вході і виході останній вираз спрощується

$$q = G_m (h_{\text{вх}} - h_{\text{вих}}). \quad (3.3)$$

Калориметричні вимірювання дозволяють визначати енергії змін агрегатних станів у широкому діапазоні фізичних параметрів з точністю не гірше 1%.

3.1 Використання енергії зміни агрегатного стану

Для фізичних експериментів особливо зручні перетворення твердої фази в рідку й назад. Лінія таких переходів для більшості речовин звичайно значно віддалена від потрійної точки й збігається з ізотермою, а енергіями стиснення для твердих і рідких середовищ можна знехтувати. Тому енергія агрегатного перетворення практично не залежить від тиску.

Прямий трубопровід

Зворотний трубопровід

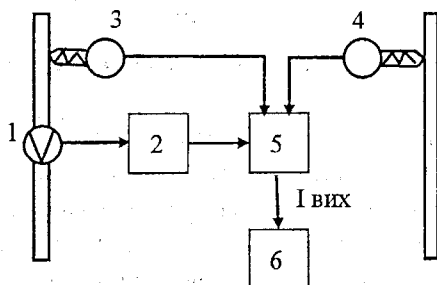


Рисунок 3.1 – Функціональна схема теплового лічильника
1,2 – електромагнітний витратомір; 3,4 – термометри опору;
5 – обчислювальний пристрій, 6 – показуючий прилад

3.2 Рідинно-ентальпійний метод

Цей метод оснований на тому, що під дією вимірюваного теплового потоку змінюється теплоємність рідини, що охолоджує приймальний орган. Він застосовується так само часто як і методи, основані на зміні агрегатного стану. Відмінність їх у тому, що для визначення зміни інтегральної теплоємності крім витрат охолоджувального середовища необхідно вимірювати зміну температури. Останнє пов'язане з великими труднощами – там де підводиться (або відводиться) вимірювана теплота, температура неминуче розподілена нерівномірно в охолоджувальному середовищі. Якщо ж середовище встигає досить добре перемішатися (на що потрібен час) – впливають втрати й збурення.

При вимірюванні променистої енергії в атмосфері застосовується так званий водострумний актинометр (піргеліометр), запропонований в 1900 р. В. А. Міхельсоном і розроблений в 1905 р. Ч. Г. Абботом (рис. 3.2).

Приймач виконаний у вигляді порожньої конічної моделі абсолютно чорного тіла, омиваної водою. Для зменшення похибок вимірювання температура охолоджувальної води підтримується на рівні температури навколишнього повітря.

Для дослідження тепловіддачі від струменя гарячого газу до охолоджуваної плити при різних умовах натікання струменя Перрі використовував мініатюрний водяний калориметр, схема якого подана на рисунку 3.3.

Плита, що обдувається гарячим струменем, охолоджувалася проточною водою. Власне тепломір (металева пробка діаметром 16,5 мм) вставлявся в отвір у плиті на слюдяній теплоізоляційній прокладці товщиною 0,1 мм. Підвищення температури води, що охолоджує тепломір, вимірялося хромель-константановою батареєю з 40 термопар. Перевага пристрою полягає в тому, що температура поверхні термоміра не відрізняється від температури сусідніх ділянок плити. Отже, тепломір не вносить збурень у теплову й гідродинамічну картину досліджуваного явища.

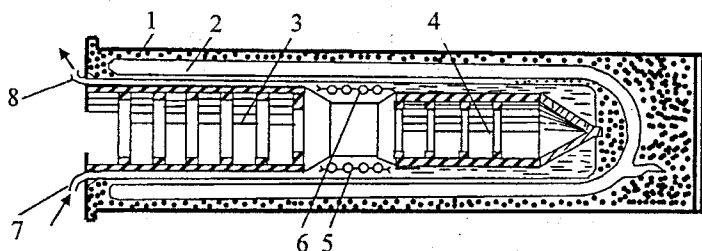


Рисунок 3.2 – Водострумнинний піргеліометр Ч. Г. Аббота

- 1 – корпус приладу; 2 – посудина Дьюара; 3 – калібрована частина;
 4 – приймально-поглинаюча частина; 5 – термометричний пристрій на вході; 6 – термометричний пристрій на виході;
 7 – вхід охолодної води; 8 – вихід охолодної води

3.3 Електрометричний метод

В експериментальній практиці часто використовують електронагрівальні пристрої. Переваги їх полягають у простоті регулювання, компактності й високій точності вимірювань енергії, що підводиться. Для створення контрольованого теплового потоку на досліджуваній ділянці поверхні необхідна надійна ізоляція, яку можна одержати, застосовуючи захисні й

компенсаційні нагрівачі. Організація ефективного контролю втрат тепла ускладнює експеримент і робить установку громіздкою.

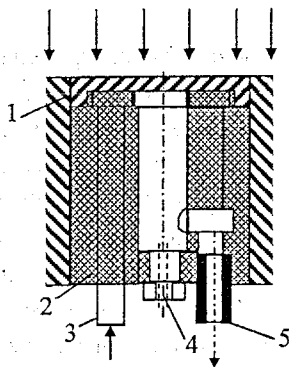


Рисунок 3.3 – Схема водоструминного тепломіра Перрі

- 1 – приймальна пластинка; 2 – корпус тепломіра;
- 3 – вхідний патрубок охолодної води;
- 4 – сальник диференціальної термопари;
- 5 – вихідний патрубок охолодної води

Одна з перших вдалих пропозицій належить М. В. Кірпічову. При вивченні тепловіддачі від циліндра, що обдувається поперечно, він щільно розташовував по твірній ряд платинових смужок. Кожна смужка одночасно виконувала роль нагрівача, тепломіра й термометра опору. Оскільки циліндр повністю оточений нагрівачами, витоком тепла від смужок у тіло циліндра-основи можна знехтувати.

3.4 Дилато-резистометричні й термоелектричні методи

Основний принцип дилатометричних методів можна пояснити на прикладі актинометра (actinometer) Калітіна (рис. 3.4).

На інваровому стояку закріплюється чорнена константанова стрічка. У середній частині ця стрічка відтягується убік пружиною. При підвищенні температури стрічки збільшується її стрілка провисання під дією зусилля пружини. Зміна стрілки провисання реєструється індикатором. Стрічка кріпиться на ізоляторах, завдяки чому прилад можна градувати за поту-

жністю електричного струму, що пропускається через неї. При малій товщині стрічки кінцеві ефекти за рахунок теплопровідності незначні.

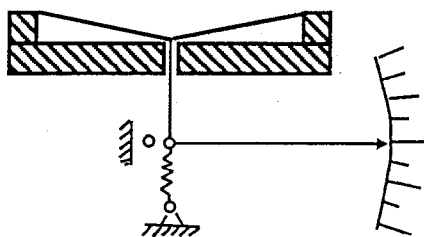


Рисунок 3.4 – Схема монометалевого актинометра Калітіна

В 1887 р. Бойс запропонував замкнути накоротко термоелектричний контур і, помістивши його в магнітне поле, використовувати як рамку гальванометра. Схематичне креслення такого пристрою, названого автором мікрорадіометром, наведений на рисунку.

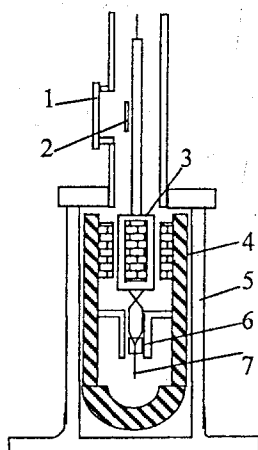


Рисунок 3.5 – Мікрорадіометр Бойса

- 1 – вікно; 2 – дзеркало; 3 – контур-рамка; 4 – магніт;
5 – корпус; 6 – приймальна площадка; 7 – термоспай

Рамка підвішена на кварцовій нитці, що за однакової міцності еластичніша за металеві підвіски гальванометрів.

Радіометрична система, у якій зміна температури під дією вимірюваного випромінювання реєструється за допомогою термометра опору, називається болометром.

3.5 Евапорографічний метод

Одна з перших спроб одержання зображень в інфрачервоному світлі евапорографічним методом була успішно здійснена М. Чорни (рис. 3.6).

Робоча камера утворюється в скляній трубці 2 діаметром 50 мм і довжиною 150 мм. Верхній край трубки на пальнику обробляється під коркову пробку 1, нижній – запліровується й на ньому кріпиться целулоїдна мембрана 5 товщиною 0,5 мкм, покрита знизу скипидарною сажею.

У камері на нагрівальній спіралі 3 підвішена мініатюрна скляна пробірка 4, заповнена камфорним маслом, нафталіном або будь-яким важким вуглеводнем.

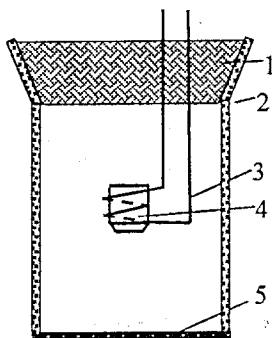


Рисунок 3.6 – Інфрачервона камера М. Чорни
1 – пробка; 2 – скляна трубка; 3 – нагрівальна спіраль;
4 – випарна посудина; 5 – приймальна мембрана.

Для підготовки камери включають нагрівальну спіраль 3. Вуглеводень, що заповнює пробірку, плавиться, поступово випаровується й осідає тонким шаром на стінках камери й целулоїдній мембрані 5. Нагрівання пробірки припиняють, коли осідаючий білий матовий шар рівномірно згасить власну інтерференційну картину плівки.

При експонуванні зображення на чорнену сторону плівки зі зворотної сторони плівки сублімує камфора зі швидкістю, пропорційною енергетичній освітленості ділянки. У такий спосіб були отримані перші довгострокові видимі зображення предметів в інфрачервоному світлі.

Для візуального спостереження картин, експонованих в інфрачервоному світлі, масляну плівку висвітлюють "холодним" видимим світлом. Роздільна здатність доходить до 14 ліній на 1 мм при різниці температур у 10 градусів. За кольором інтерференційних полів можна з великою точністю судити про енергетичну освітленість ділянки, а виходить, і щільності падаючої енергії.

Деякі попередньо збуджені люмінофори під дією інфрачервоного випромінювання починають світитися у видимій частині спектра. Ця властивість була покладена в основу метаскопа і може бути застосована для порівняльних оцінок потоків довгохвильової енергії.

3.6 Пневматичний і оптичний методи

В основу приладів пневматичного методу покладені газові термометри, які мають найвищу чутливість і точність вимірювань.

На відміну від метрологічних газових термометрів об'єми приймальних камер пневматичних індикаторів променистої енергії зазвичай не перевищують 1 см^3 , а інтегральна теплоємність дорівнює 10^{-3} Дж/град. Такі малі значення відповідають теплоємності найтонших (0,02–0,05 мкм) плівкових огорожень робочих об'ємів і дозволяють при великих значеннях потоків досягати зниження постійної часу до мілісекунд. Чутливість за температурою може бути доведена до 10^{-5} град. При проектуванні приладу на тривалі експозиції порядку 100 секунд це дає можливість реєструвати гранично малі потоки порядку 10^{-10} Вт.

Гази поглинають променисту енергію лише у вузьких смугах спектра. Для розширення спектра поглинання приймальну камеру заповнюють сорбентом поглиначем (найтоншим пухом рослинного або тваринного походження) і наступною термообробкою домагаються його обвуглювання. Такий вугільний "пух" за помірної теплоємності має значну поглинальну здатність і його присутність більше підвищує чутливість, ніж інерційність приладу.

У пневматичних приймачах зі збільшенням чутливості зростає й постійна часу.

3.7 Інерційні тепломіри

Перші калориметричні прилади (Лавуазьє, Лапласа, Бунзена й ін.) були призначені для визначення теплоємності за кількістю теплоти, що виділя-

ється, та зміною температури. Наявність відомостей про теплоємність дозволяє вимірювати кількість поглиненого або втраченого тепла по зміні температури вимірювального тіла у часі.

Недолік описаних приймачів полягає в тому, що з їхньою допомогою не можна визначити напрямок вектора вимірюваної величини.

3.8 Фотоелектричні і радіометричні тепломіри

Для приладів на фотоелектричних ефектах, характерний безпосередній перехід променистої енергії фотонів в енергію електронів, що звільнюються. Головним їхнім недоліком є значна спектральна неоднорідність чутливості.

Практичне застосування знаходять приймачі, що використовують такі ефекти:

а) зовнішній фотоелектричний ефект, при якому поглинання фотона тонкою металевою плівкою супроводжується емісією електрона в прилеглий вакуумований або розріджений простір;

б) внутрішній фотоелектричний ефект, при якому поглинання квантів випромінювання супроводжується виділенням вільних електронів, здатних накопичуватися усередині твердого тіла у вигляді помітної різниці електричних потенціалів;

в) внутрішній фотоелектричний ефект, що супроводжується помітною зміною електричного опору.

Елементом всіх трьох підгруп властива селективність сприйняття, тому вони, як правило, застосовуються з вузькосмуговими світлофільтрами, як це має місце, наприклад, у серійних пірометрах ФЭП-3 і ФЭП-4.

Гранична чутливість фотоопорів до монохроматичного випромінювання на два порядки вища, ніж у болометрів, а постійна часу вимірюється мікросекундами. Тому фотоопори найчастіше застосовуються для вимірювання гранично малих потоків, коли чутливість приймального елемента стає головною необхідною властивістю.

3.9 Компенсаційні радіометри

Компенсаційні прилади можна класифікувати на одно- і двохелементні. Найчастіше тепла компенсація здійснюється за допомогою електричного нагрівання. В одноелементних приладах за допомогою компенсаційного нагрівання здійснюється періодичне градування елемента, чутливо-

го до вимірюваного потоку. При далекій аналогії ці прилади подібні до пружинних ваг, що перевіряються періодично по еталонних гирях.

Двохелементні радіометри створені на основі диференціального калориметра. Чутлива ланка дозволяє контролювати ідентичність підведення енергії. Один з елементів сприймає вимірюваний потік, другий – компенсаційне електричне нагрівання. Принципова основа цих приладів така ж, як і двоплечих важільних ваг.

3.10 Метод допоміжної стінки

Суть методу полягає у тому, що на шляху вимірюваного потоку розташовується стінка з відомою теплопровідністю. Залишається визначити питомий тепловий потік

$$q = \lambda \frac{\Delta t}{\delta}. \quad (3.4)$$

Зазвичай ефект присутності вимірювального датчика бажано звести до мінімуму, тому допоміжна стінка, за можливістю, не повинна бути додатковою, як її іноді називають. У тих же випадках, коли додатковий опір неминучий, необхідно знати не тільки абсолютну величину, але і його частку в сумарному тепловому опорі теплового кола, що проводить вимірюваний потік.

3.11 Тепломіри з поперечною складовою потоку

У цих приладах сприйнятий потік повністю або частково проходить через допоміжний орган, змінюючи свій первісний напрямок.

Схема приладу Р. Гардона подана на рисунку 3.7. Отвір у мідному блоці 2 закрито константановою пластиною 1, припаяною по периферії до блока. Енергія, сприймана константановою фольгою, частково розтікається радіально до мідного блока, а частково втрачається в навколишньому середовищі. Гарячий спай утвориться в центрі пластинки із припаяним мідним дротом 3. Товщина константанової пластинки зазвичай менше 0,3 мм. Тому стаціонарний режим настає порівняно швидко. Графік зміни температури по радіусу фольги поданий у правій частині рисунка. Максимальна температура t_1 відповідає центру, а мінімальна t_2 – блоку. За допомогою диференціальної термопари, складеної з мідного центрального дроту, константанової фольги й мідного блока, вимірюється різниця температур

Δt , за величиною якої судять про інтенсивність потоку енергії, що сприймається датчиком.

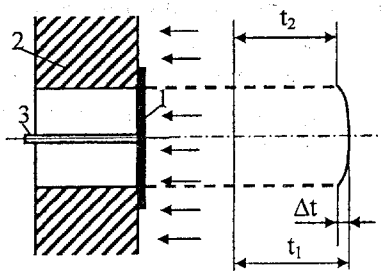


Рисунок 3.7 – Схема датчика Р. Гардона
1 – приймальна пластина; 2 – мідний блок;
3 – струмознімальний провідник

3.12 Аналітичні методи

Стосовно явищ теплопровідності, диференціальне рівняння, граничні і початкові умови однозначно описують температуру даного тіла в будь-якій точці в довільний момент часу. У силу однозначності такого зв'язку знання температури, наприклад, у двох точках у довільні моменти часу дозволяє визначити граничні умови по одному з параметрів (наприклад, потоку або температурі на границях). Такий підхід у рішенні зазвичай прийнято називати оберненою задачею теплопровідності.

3.13 Піроелектричні тешломіри

Піроелектрикою називається стан електричної поляризації, що обумовлена зміною температури й збігається з оптичною поляристістю. Вперше це явище спостерігалось на мінералах групи турмаліну, для яких головна вісь симетрії кристалів є головною піроелектричною віссю. Зміна температури на 1 градус по цій осі приводить до появи заряду до 10^{-5} Кл/м².

4 МЕТОДИ І ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ РІЗНИЦІ ТИСКІВ ТА РОЗРІДЖЕННЯ

Широке використання тиску в наукових дослідженнях і в різних галузях промисловості викликає необхідність застосування великої кількості засобів вимірювання тиску й різниці тисків, різних за принципом їхньої дії, конструкцією, призначенням й точністю. При вимірюванні тиску нас можуть цікавити абсолютний, надлишковий й вакуумметричний тиски.

Основною одиницею вимірювання тиску є Паскаль: $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$, який складає приблизно одну стотисячну частку атмосферного тиску. Ця одиниця досить зручна для вимірювання розріджень, але мало практична для більшості інших випадків. Для вимірювань атмосферного тиску використовують барометри, котрі можуть бути проградуйовані або в міліметрах ртутного стовпчика ($1 \text{ мм рт.ст.} = 133,332 \text{ Па}$), або в кілопаскалях ($1 \text{ кПа} = 1000 \text{ Па}$). Барометричний тиск, як правило, позначається літерою B .

Під терміном "абсолютний тиск" маємо на увазі повний тиск, під яким перебуває рідина, газ або пара. Він дорівнює сумі надлишкового тиску P_m і атмосферного тиску B

$$P = P_m + B. \quad (4.1)$$

Надлишковий тиск дорівнює різниці між абсолютним тиском, більшим атмосферного, і атмосферним тиском.

Під терміном "вакуумметричний тиск" (розрідження або вакуум) маємо на увазі різницю між атмосферним тиском і абсолютним тиском, меншим атмосферного

$$P_v = B - P_a. \quad (4.2)$$

Прилад, що вимірює атмосферний тиск, називають барометром, звідси атмосферний тиск – барометричним. Прилад, призначений для вимірювання абсолютного тиску, називають манометром абсолютного тиску. Прилад, що вимірює надлишковий або вакуумметричний тиск, – відповідно манометром надлишкового тиску й вакуумметром. Прилад, що вимірює малий надлишковий тиск і розрідження газу називається відповідно напороміром і тягоміром.

Прилад, призначений для вимірювання вакуумметричного й надлишкового тисків, називають мановакуумметром, а для вимірювання малих тисків і розріджень газу – тягонапороміром. Прилад, що вимірює дуже ма-

лі тиски (нижчі й вищі барометричного) і незначні різниці тисків, називають мікроманометром; прилад, призначений для вимірювання різниці тисків, – диференціальним манометром (дифманометром).

4.1 U-подібні й чашкові манометри

Для вимірювання невеликих надлишкових тисків еталонним приладом є рідинний U-подібний манометр, який можна застосовувати і для вимірювання різниці тисків. Надлишковий тиск в U-подібній трубці манометра врівноважується стовпом рідини висотою h . Тоді за основним рівнянням гідростатики надлишковий тиск дорівнюватиме

$$P_m = h \cdot \rho \cdot g, \quad (4.3)$$

де ρ – густина рідини в манометрі;

g – прискорення вільного падіння.

Як рідину в таких манометрах найчастіше використовують ртуть або воду. Для прецизійних вимірювань такими манометрами необхідно враховувати залежність густини рідини від температури, залежність g від географічної широти і коефіцієнта термічного розширення матеріалу трубок, з якого виготовлене U-подібне коліно. Такі похибки рідко становлять в сумі більше 0,5% від величини тиску і розрахункові формули для визначення поправок до формули (4.3) наводяться в спеціальній літературі.

Прилади U-подібні (двотрубні) і чашкові (однотрубні) належать до групи рідинних приладів з видимим рівнем. Вони застосовуються як манометри (напорометри) для вимірювання надлишкового тиску повітря й неагресивних газів до 700 мм вод. ст. (7000 Па) і 735 мм рт. ст. (0,1 МПа), тягоміврів для вимірювання розрідження газових середовищ до 700 мм вод. ст. (7000 Па), вакуумметрів для вимірювання вакууму (розрідження) до 760 мм рт. ст. (0,101 МПа) і диференціальних манометрів для вимірювання різниці тисків неагресивних газів, що перебувають під тиском, близьким до атмосферного, до 700 мм вод. ст. (7000 Па) і неагресивних рідин, газів і парів, що перебувають під тиском 0,09 МПа.

Прилади U-подібні і чашкові використовуються в промисловості як місцеві прилади, тобто вони встановлюються на площадках обслуговування або на окремих елементах технологічного обладнання, Прилади цього типу застосовують як контрольні і зразкові манометри і вакуумметри для пере-

вірки робочих приладів, розрахованих на ті ж діапазони вимірювання тиску, розрідження або різниці тисків.

В рідинних манометрах вимірюваний тиск або різниця тисків врівноважується тиском рівня рідини. В приладах використовується принцип сполучених посудин, в яких рівні робочих рідин збігаються при однакових тисках над ними, а при різних тисках займають таке положення, коли залишковий (residual) тиск в одній посудині врівноважується гідростатичним тиском надлишкового стовпа рідини в другій. Більшість їх має видимий рі-

вень робочої рідини і шкалу для зняття показань.

Принципова схема таких манометрів подана на рис. 4.1. Дві сполучені вертикальні скляні трубки закріплені на основі, якій розміщена шкальна пластинка. Трубки заповнені робочою рідиною до нульової відмітки. В одну трубку подається вимірюваний тиск, а інша з'єднана атмосферою. Для вимірювання різниці тисків, вимірювані тиски підводяться до обох трубок. Стови рідини врівноважується різницею тисків

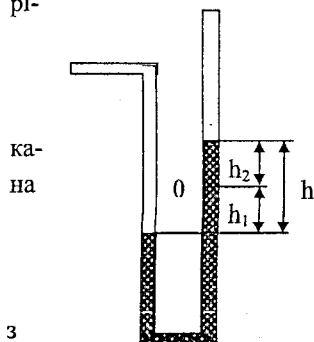


Рисунок 4.1 – Схема U-подібного манометра

$$P_1 - P_2 = \rho g h, \quad (4.4)$$

$$h = \frac{1}{\rho g} (P_1 - P_2), \quad (4.5)$$

де ρ – густина робочої рідини;

g – місцеве прискорення вільного падіння.

Двотрубні манометри з водяним заповненням використовуються для вимірювання тисків, розрідження, різниці тисків повітря і неагресивних середовищ в діапазоні ± 10 кПа. Якщо манометр заповнити ртуттю, то межі розширюються до 0,1 МПа. Похибка вимірювань залежить від ціни поділки шкали. Без додаткових оптичних пристосувань для ціни поділки шкали похибка зчитування різниці рівнів складає ± 2 мм з врахуванням похибок нанесення шкали.

4.2 Однотрубні манометри

В порівнянні з двотрубними, однотрубні манометри мають підвищену точність підрахунку. Складаються з трубки із шкалою і широкої посудини, в яку подається більший з вимірюваних тисків (рис. 4.2). Робоча рідина заливається в манометр до нульової відмітки. Оскільки об'єм рідини, яка вилетіла з широкої посудини, дорівнює об'єму рідини, що поступила у вимірювальну трубку

$$h_1 = \frac{h_2 f}{F}, \quad (4.6)$$

де f і F – площі поперечного перерізу вимірювальної трубки і широкої посудини.

Для $f \ll F$ $h_1 \ll h_2$ і якщо $F/f \geq 400$ то зміною рівня у широкій посудині нехтують, а у вимірюваннях враховується тільки зміна рівня рідини в трубці. В такому манометрі похибка складає ± 1 мм. Мінімальний діапазон вимірювання однотрубних манометрів з водяним заповненням 1,6 кПа. Мікроманометри використовують для вимірювання тисків і різниць тисків до 3 кПа. Як правило, виготовляються з похилою трубкою і мають спеціальні пристрої або для зниження ціни поділки шкали, або для підвищення точності зчитування за рахунок використання оптичних чи інших пристроїв.

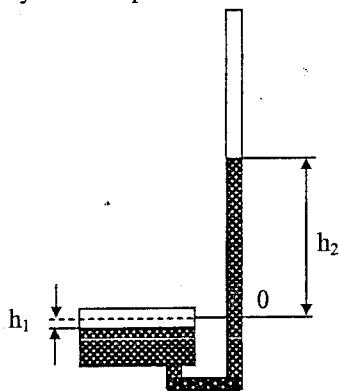


Рисунок 4.2 – Схема однотрубного манометра

Як робочу рідину (working fluid) звичайно застосовують воду або ртуть, а іноді й інші рідини. Внутрішній діаметр скляної трубки для виготовлення U-подібного приладу повинен бути не менш 8–10 мм і по можливості однаковий по всій її довжині. При малому діаметрі трубки капілярні властивості води не дозволяють застосовувати її як робочу рідину в приладах цього типу. У цьому випадку як робочу рідину рекомендується застосовувати спирт.

При застосуванні U-подібний манометр повинен встановлюватися вертикально по виску.

Для вимірювання надлишкового тиску в об'єкті праве коліно трубки приладу з'єднують із об'єктом, а ліве залишають відкритим (сполученим з атмосферою); при вимірюванні розрідження – ліве коліно приладу з'єднують із об'єктом, а праве – залишають відкритим. При вимірюванні різниці тисків більший тиск підводить до правого, а менший – до лівого коліна трубки приладу.

Зазвичай за допомогою U-подібного приладу тиск, розрідження або різниця тисків вимірюють у міліметрах водяного або ртутного стовпа. Результат вимірювання може бути виражений не в міліметрах стовпа робочої рідини, а в Паскалях

$$p = h \cdot g(\rho - \rho_c), \quad (4.7)$$

де g – місцеве прискорення вільного падіння, м/с^2 ;

h – різниця рівнів робочої рідини, м ;

ρ – густина робочої рідини, кг/м^3 ;

ρ_c – густина середовища над робочою рідиною, кг/м^3 .

4.3 Мікроманометри

Мікроманометри є переносними приладами, їх застосовують у лабораторній практиці й у промислових умовах при проведенні випробувань теплосилових і інших установок для вимірювання малих тисків, розріджень або різниць тисків повітря й неагресивних газів. Прилади цього типу залежно від їхнього призначення підрозділяються на робочі й зразкові мікроманометри. Робочі мікроманометри у свою чергу підрозділяються на прилади технічні й підвищеної точності.

На рис. 4.3 показана схема мікроманометра з похилою скляною вимірювальною трубкою. Нахил вимірювальної трубки в цьому приладі зроблений з метою зменшення похибки вимірювань. Як робоча рідина в мікроманометрах цього типу застосовують етиловий спирт, що заливають у широку посудину настільки, щоб рівень його в похилій трубці перебував проти нульової оцінки шкали.

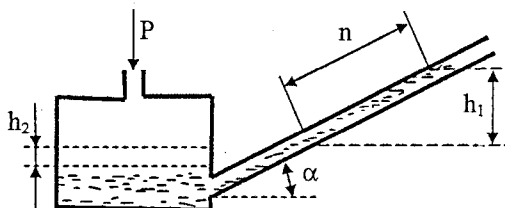


Рисунок 4.3 – Схема похилого мікроманометра

При вимірюванні тиску в будь-якому об'ємі до нього приєднують за допомогою трубки широку посудину приладу, а при вимірюванні розрідження – похилу трубку. У випадку вимірювання різниці тисків більший тиск подається в посудину, а менший – у вимірювальну трубку.

$$h = h_1 + h_2, \quad (4.8)$$

$$h_1 = n \cdot \sin \alpha, \quad (4.9)$$

де n – довжина стовпа рідини в похилій трубці.

Якщо F_1 і F_2 – відповідно площа перерізу похилої трубки й посудини, ρ – густина робочої рідини, кг/м^3 ; g – місцеве прискорення вільного падіння, м/с^2 , то значення вимірюваного тиску (Па)

$$p = \rho gh = \rho g n \left(\sin \alpha + \frac{F_1}{F_2} \right). \quad (4.10)$$

4.4 Прилади для вимірювання тиску із пружними елементами

Робота цих приладів базується на використанні деформації або згинального моменту пружних чутливих елементів, що сприймають вимірюва-

ний тиск середовища й перетворюють його в переміщення або зусилля. Такі прилади застосовують у різних областях техніки в широкому діапазоні вимірювань – від 50 Па до 1000 МПа. Вони виготовляються у вигляді тягомірів, напоромірів, тягонапоромірів, манометрів, вакуумметрів і мановакуумметрів. Ці прилади підрозділяються на такі різновиди:

а) прилади тиску прямої дії – як покажчики, так і самописні, у яких переміщення центра або вільного кінця пружного чутливого елемента, що викликане дією тиску, за допомогою додаткового механізму перетворюється в переміщення відлікового пристрою для показання або для показання й запису вимірюваної величини;

б) прилади тиску прямої дії й реле тиску (без відлікових пристроїв), обладнані електроконтактами й призначені для вимірювання й сигналізації або тільки сигналізації відхилення тиску від заданого значення, а також для роботи в схемах захисту, блокування або позиційного регулювання;

в) первинні прилади тиску з відліковими пристроями або без них, обладнані передавальними перетворювачами з уніфікованими вихідними сигналами змінного струму чи пневматичні із взаємозамінними вторинними покажчиками або самописцями – окремі вимірювальні комплекти. Деякі прилади цього типу використовуються також у системах автоматичного регулювання й керування;

г) первинні прилади тиску з відліковими пристроями або без них, обладнані передавальними перетворювачами з уніфікованим вихідним сигналом постійного струму й призначені для роботи із взаємозамінними вторинними покажчиками, самописними або інформаційно-обчислювальними машинами.

Залежно від призначення прилади тиску із пружними чутливими елементами поділяють на зразкові й робочі.

Як пружні чутливі елементи у приладах тиску використовуються мембрани, мембранні коробки (membrane boxes), сільфони (bellows) й трубчасті пружини. Мембрани, мембранні коробки й сільфони застосовують як чутливі елементи також і в дифманометрах.

4.5 Пружні чутливі елементи

Плоскі мембрани, виготовлені зі сталі й бронзи, являють собою круглі тонкостінні пластини постійної товщини. Під дією рівномірно розподіленого тиску або зосередженої сили затиснена по краях плоска мембрана

прогинається за наявності не тільки згинальних деформацій, але й розтяжних напруг i , внаслідок цього, має нелінійну статичну характеристику. При використанні плоских мембран як робоча ділянка використовується зазвичай невелика частина можливого її ходу.

Плоскі мембрани знаходять застосування головним чином у приладах тиску спеціальних конструкцій, наприклад п'єзокварцових, смісних, індуктивних, з тензоперетворювачами тощо. Прилади цього типу мають малу інерційність і їх можна використовувати для вимірювання змінних тисків із частотою до декількох сотень і тисяч герц.

Опуклі (клацаючі) мембрани (рис. 4.4), виготовлені зі сталі або бронзи, можуть бути використані в реле.

При впливі тиску p на мембрану її прогин λ на початковій ділянці oe статичної характеристики зростає плавно. Далі за збільшення тиску відбувається втрата стійкості мембрани й вона змінює свій прогин стрибком (ділянка ab характеристики). При цьому мембрана замикає або розмикає електроконтакти. При подальшому збільшенні тиску прогин мембрани на ділянці характеристики bc буде знову зростати монотонно. Якщо тиск зменшиться до значення p_2 , то мембрана також стрибком вертається на ділянку характеристики oe . Розміри клацаючих мембран зазвичай підбирають дослідним шляхом.

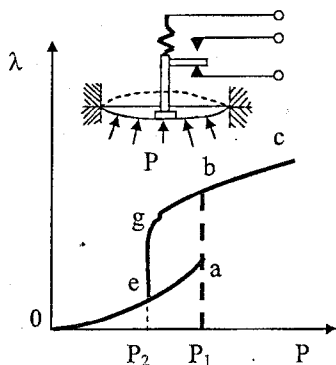


Рисунок 4.4 – Робота клацаючої мембрани

Гофрування (corrugated) поверхні мембрани (рис. 4.5) підвищує надійність її роботи й спрямляє характеристику мембрани. Найбільше застосування в приладах тиску одержали мембранні коробки, утворені двома спа-

яними або звареними гофрованими мембранами, і блоки із двох або декількох мембранних коробок.

У тих випадках, коли необхідно мати мінімальний обсяг внутрішніх порожнин чутливого елемента, наприклад при вимірюванні перепаду тиску (що є бажаним особливо для дифманометрів-витратомірів), застосовують блок, що складається із двох складних мембранних коробок з рідинним заповненням.

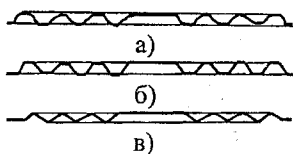


Рисунок 4.5 – Види мембран

а) синусоїдальна, б) трапецієподібна, в) пилкоподібна

Сильфон (рис. 4.6) є тонкостінною трубкою з поперечним гофруванням. Сильфони застосовуються в напоромірах і тягомірах для вимірювання невеликого тиску 40 кПа), у приладах для вимірювання вакуумметричного тиску до 0,1 МПа, абсолютного тиску до 2,5 МПа, надлишкового тиску до 60 МПа і різниці тисків до 0,25 МПа.

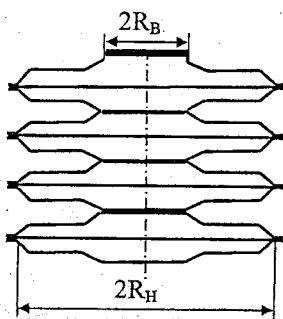


Рисунок 4.6 – Сильфон

Трубчасті пружини найчастіше виконуються у вигляді одновиткових, центральна вісь яких являє собою дугу окружності із центральним кутом, рівним $200-270^\circ$. Із числа цих пружин найбільш широке застосування одержали пружини Бурдона (рис. 4.7) еліптичного й плоскоовального перері-

зу. Один кінець пружини Бурдона закріплюють нерухомо, а інший – вільний, закритий пробкою й запаяний – з'єднують із механізмом приладу.

Під дією тиску, що подається у внутрішню порожнину трубки, пружина Бурдона деформується в поперечному перерізі, приймаючи форму, зображену пунктиром.

Трубчаста пружина тим чутливіша, чим більший радіус її кривизни R_k і чим менша товщина δ стінок трубки.

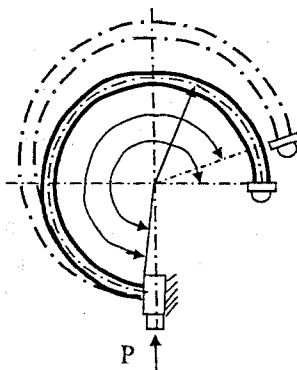


Рисунок 4.7 – Манометр з трубчастою пружиною Бурдона

4.6 Прилади прямої дії для вимірювання тиску

Прилади прямої дії застосовують у широкому діапазоні вимірювання від декількох десятків міліметрів водяного стовпа й до тиску в кілька тисяч атмосфер як у лабораторних, так і промислових умовах.

Під впливом вимірюваного надлишкового тиску пружний чутливий елемент деформується й тягне повідця. Повідець повертає зубчастий сектор і відповідно трибку зі стрілкою. Рухаючись уздовж шкали стрілка показує значення вимірюваного надлишкового тиску. Переміщення вільного кінця пружини, а отже і кут повороту стрілки, практично пропорційні вимірюваному тиску, тому шкала таких приладів рівномірна.

4.7 Прилади тиску електричні. П'єзоелектричні манометри

Дія манометрів цього типу базується на використанні п'єзоелектричного ефекту, що спостерігається в ряді кристалів кварцу, турмаліну (tourmaline), титанату барію, сегнетової солі тощо). П'єзоелектричні манометри

метри, що використовують як первинний перетворювач кварц (двоокис кремнію SiO_2), знайшли найбільше практичне застосування в порівнянні із приладами, що використовують інші кристали, завдяки істотним перевагам кварцу, що негігроскопічний, має велику механічну твердість, гарні ізоляційні якості й незалежність п'єзоелектричних властивостей від температури порівняно в широкому інтервалі ($20 - 400^\circ\text{C}$).

У кристалі кварцу (рис. 4.8, б) розрізняють такі осі: оптичну, що проходить через вершини кристала; електричну, яка проходить через ребра (їх три зі зсувом в 120°) та перпендикулярна до оптичної; механічну (або нейтральну), що розташована нормально до граней кристала (їх також три). Якщо із кристала кварцу вирізати прямокутну пластину із гранями, паралельними осям (зріз Кюрі), і піддати її стиску (або розтягненню) уздовж електричної осі, то на гранях, перпендикулярних до цієї осі, з'являться електростатичні заряди, рівні за значенням і протилежні за знаком. При переході від стиску до розтягання й назад знаки зарядів змінюються на протилежні.

П'єзокварцові манометри, що дозволяють вимірювати тиск до 100 МПа і вище, широко застосовуються при вимірюваннях швидкозмінних тисків. При цьому чим швидше протікає досліджуваний процес, тим достовірніший даний метод. Практично п'єзоелектричний ефект можна вважати безінерційним і досить стабільним.

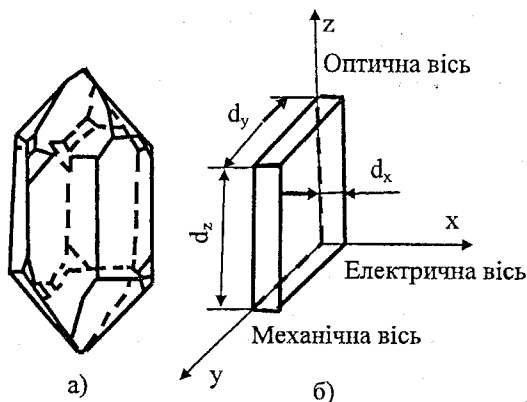


Рисунок 4.8 – Кристал кварцу (а) і пластина кварцу та її осі (б)

4.8 Манометри опору

Дія манометрів опору ґрунтується на зміні електричного опору речовин під дією зовнішнього надлишкового тиску. До числа таких речовин належать напівпровідники, платина, манганін, константан, вольфрам і ряд інших металів. Для цілей вимірювання тиску, а отже, і виготовлення первинного перетворювача (або чутливого елемента), як показали експериментальні дослідження, найбільшою мірою підходить манганін.

Манганін має лінійну залежність збільшення електричного опору від тиску

$$\Delta R = kR_p, \quad (4.11)$$

де k – коефіцієнт зміни опору манганіну, $1/\text{Па}$.

Лінійна залежність опору манганіну підтверджується дослідними даними аж до тиску 3000 МПа . Крім того, він має дуже малий температурний коефіцієнт електричного опору, що дає можливість не зважати при вимірюванні тиску на зміни температури навколишнього повітря. Невелика чутливість перетворювача обмежує застосування цього манометра вимірюваннями надвисоких тисків (більше 100 МПа).

Коефіцієнт зміни опору манганіну для різних партій лежить в інтервалі від $0,23 \text{ 1/Па}$ до $0,25 \text{ 1/Па}$, і манометри з перетворювачем з манганінового дроту потребують індивідуального градування.

5 ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТ ТА КІЛЬКОСТІ РЕЧОВИНИ

5.1 Види витрат і витратомірів

Витратою називають кількість речовини, що протікає через переріз трубопроводу в одиницю часу. Кількість речовини можна вимірювати або в одиницях маси [кілограм (кг), тонна (т)], або в одиниці об'єму [кубічний метр (м^3), літр (л)]. Відповідно до вибраних одиниць може визначатися або масова витрата G_m (одиниці кг/с , кг/год , т/год тощо), або об'ємна витрата V_m (одиниці $\text{м}^3/\text{с}$, л/с , $\text{м}^3/\text{год}$, тощо). Одиниці маси дають більш повні відомості про кількість або витрату речовини, ніж одиниці об'єму, тому що об'єм речовини, особливо газів, залежить від тиску і температури. Коли вимірюються об'ємні витрати газів для одержання порівнянних значень

результати вимірювань приводять до деяких загальноприйнятих (так званих нормальних) умов. Такими нормальними умовами прийнято вважати температуру $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, тиск $P = 101325\text{ Па}$ (760 мм рт. ст.) і відносну вологість $\varphi = 0$. У цьому випадку об'ємна витрата позначається V_n і виражається в об'ємних одиницях (наприклад, $\text{м}^3/\text{год}$).

Згідно з ДСТУ ГОСТ 8.586.5:2009 вимірювальний прилад, що служить для вимірювання витрати речовини, називається витратоміром, а прилад для вимірювання кількості речовини – лічильником кількості (лічильником). У кожному конкретному випадку до цих термінів варто додавати найменування контролюваного середовища.

Зазвичай в гідромеханіці рідкі й газоподібні речовини поєднують у єдиному понятті "рідини". На відміну від твердих тіл вони здатні змінювати свою форму під дією навіть дуже малих сил. Рідини за своїми механічними властивостями поділяють на малостисливі (краплинні) і стисливі (газоподібні).

За принципом вимірювань витратоміри класифікують за такими основними групами (вказується для кожної класифікаційної групи витратомірів, принцип перетворення належить до їхніх первинних перетворювачів – датчиків):

а) витратоміри змінного перепаду тиску (із звужуючими (narrowing) пристроями; з гідравлічними опорами; відцентрові; з напірними пристроями; струминні), ті, що перетворюють швидкісний напір у перепад тиску;

б) витратоміри обтікання (витратоміри постійного перепаду – ротаметри (VA meters), поплавкові, поршневі, гідродинамічні), які перетворюють швидкісний напір у переміщення тіла, яке обтікається струменем середовища;

в) тахометричні витратоміри (турбінні з аксіальною або тангенціальною турбіною; кулькові), які перетворюють швидкість потоку в кутову швидкість обертання обтічного елемента (лопаток турбіни або кульки);

г) електромагнітні витратоміри, що перетворюють швидкість провідної рідини, яка рухається в магнітному полі, в е.р.с.;

д) ультразвукові витратоміри, основані на ефекті захоплення звукових коливань середовищем, що рухається;

ж) інерційні витратоміри (турбосилові, коріолісові, гігроскопічні), робота яких базується на інерційному впливі маси рідини, що рухається з лінійним або кутовим прискоренням;

з) теплові витратоміри (калориметричні; термоанемометричні), що працюють на ефекті перенесення тепла середовищем, що рухається, від нагрітого тіла;

к) оптичні витратоміри, основані на ефекті захоплення світла рухомим середовищем (Фізо-Френеля) або розсіювання світла рухомими частками (Допплера);

л) міткові витратоміри (з тепловими, іонізаційними, магнітними, концентраційними, турбулентними мітками), основані на вимірюванні швидкості або на визначенні стану мітки при проходженні її між двома фіксованими перетинами потоку.

5.2 Вимірювання витрат й кількості рідин за перепадом тиску в звукувальному пристрої

Одним з найпоширеніший і вивчених є спосіб вимірювання витрат рідин, газів і пари в трубопроводах за перепадом тиску в звукувальному пристрої. Звукувальний пристрій виконує функції первинного перетворювача, встановлюється в трубопроводі й створює в ньому місцеве звуження, внаслідок чого при протіканні речовини підвищується швидкість у звуженому перерізі в порівнянні зі швидкістю потоку до звуження. Збільшення швидкості, а отже і кінетичної енергії, викликає зменшення потенціальної енергії потоку у звуженому перерізі. Відповідно статичний тиск у звуженому перерізі буде менший, ніж у перерізі до звукувального пристрою. Таким чином, при протіканні речовини через звукувальний пристрій створюється перепад тиску $\Delta p = p_1 - p_2$, що залежить від швидкості потоку й, отже, витрат рідини. Звідси випливає, що перепад тиску, створюваний звукувальним пристроєм, може слугувати мірою витрати речовини, що протікає в трубопроводі, а числове значення витрати речовини може бути визначене за перепадом тиску Δp , що вимірюється дифманометром.

Стандартні звукувальні пристрої можуть застосовуватися в комплекті з дифманометрами для вимірювання витрати і кількості рідин, газів і пари в круглих трубопроводах (для будь-якого їх розташування), діаметр яких не менший від значень, що складають для газів не менше як 50 мм і для рідин не менше 30 мм, якщо їхній розрахунок, виготовлення й установлення виконані правильно.

При необхідності використання звужувальних пристроїв на трубопроводах меншого діаметра вони повинні мати індивідуальне градування, тобто експериментально визначену залежність $\Delta p = f(G)$.

Як звужувальні пристрої для вимірювання витрат рідин, газів і пари широко застосовують стандартні діафрагми, сопла (nozzle) й сопла Вентурі. В особливих випадках вимірювань витрат знаходять також застосування ненормалізовані типи звужувальних пристроїв.

Діафрагма (рис. 5.1,а) є тонким диском із отвором круглого перерізу, центр якого лежить на осі труби. Звуження потоку починається до діафрагми, і на деякій відстані за діафрагмою потік досягає мінімального перерізу, далі потік поступово розширюється до повного перерізу трубопроводу. Суцільною лінією подана крива, що характеризує розподіл тисків уздовж стінки трубопроводу; крива, зображена штрихпунктирною лінією, характеризує розподіл тисків за віссю трубопроводу. Як видно, тиск за діафрагмою повністю не відновлюється.

При протіканні речовини через діафрагму за нею в кутах утвориться мертва зона, у якій внаслідок різниці тисків виникає зворотний рух рідини або так званий вторинний потік (secondary flow). Внаслідок в'язкості рідини струмка основного й вторинного потоків, рухаючись у протилежних напрямках, згортаються у вигляді вихорів. На вихороутворення за діафрагмою витрачається значна частина енергії, а отже, має місце й значна втрата тиску.

Зміна напрямку струмків перед діафрагмою й стиск потоку після діафрагми мають незначний вплив.

Сошлю (рис. 5.1, б) виконано у вигляді насадки із круглим концентричним отвором. На рис. 5.1 в показане сошлю Вентурі.

Необхідно, щоб контрольоване середовище заповнювало весь поперечний переріз трубопроводу, причому фазовий стан речовини не повинен змінюватися при проходженні через звужувальний пристрій. Конденсат, пил та газ, що виділяються з контрольованого середовища, не повинні накопичуватися поблизу звужувального пристрою.

Відбір тисків p_1 і p_2 здійснюється за допомогою двох окремих отворів, розташованих безпосередньо до й після диска діафрагми в кутах, утворених площиною діафрагми й внутрішньою поверхнею трубопроводу (рис. 5.2).

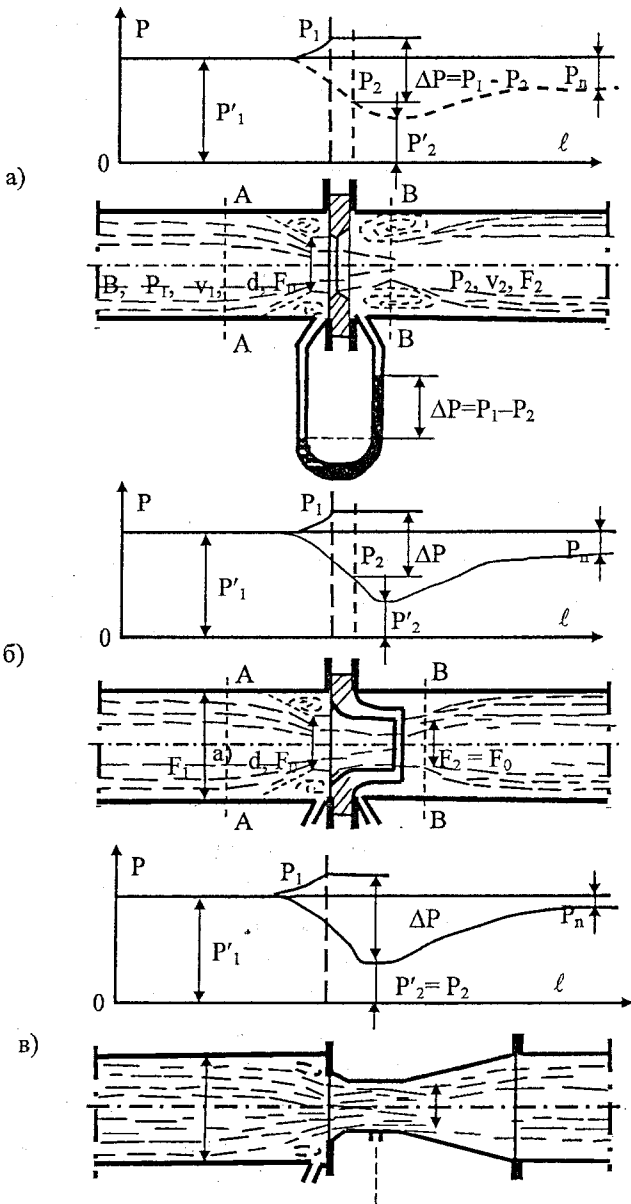


Рисунок 5.1 – Діафрагма (а) та сопла (б,в)

Стандартні діафрагми застосовуються при дотриманні умови $0,05 \leq m \leq 0,64$, стандартні сопла – для $0,05 \leq m \leq 0,64$ і сопла Вентурі – для $0,05 \leq m \leq 0,6$.

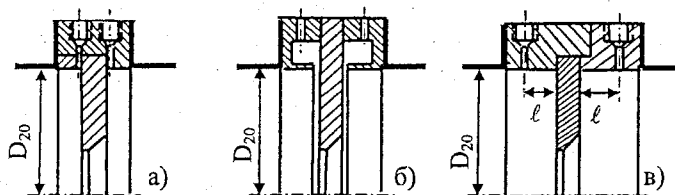


Рисунок 5.2 – Способи відбору тисків

а) через окремі отвори; б) через кільцеві камери; в) фланцевий

5.3 Методика використання звужувальних пристроїв

Конкретний тип звужувального пристрою вибирається з розрахунку в залежності від умов застосування, необхідної точності, залишкової втрати тиску. Однак у будь-якому випадку точність вимірювання витрати газів і пари при використанні сопла вища, ніж при використанні діафрагми. Крім того, зміна або забруднення вхідного профілю звужувального пристрою в процесі експлуатації мало змінює коефіцієнт витрати сопла й значно більшою мірою змінює коефіцієнт витрати діафрагми.

При установленні звужувальних пристроїв необхідно дотримуватись ряду умов, що сильно впливають на похибки вимірювань. Звужувальний пристрій у трубопроводі повинен розташовуватися перпендикулярно до осі трубопроводу. Неперпендикулярність не повинна перевищувати 1° . Зміщення осі отвору звужувального пристрою щодо осі трубопроводу не має перевищувати $0,005D/(0,1 + 2,3m^2)$.

Ділянка трубопроводу довжиною $2D$ до і після звужувального пристрою повинна бути циліндричною, гладкою, на ній не повинно бути ніяких уступів, а також помітних окул наростів і нерівностей від заклепок, зварювальних швів і т. п. Часто ця ділянка трубопроводу виточується на верстаті разом зі встановленим звужувальним пристроєм.

Важливою умовою є необхідність забезпечення сталої течії потоку перед входом у звужувальний пристрій і після нього. Такий потік забезпечується наявністю прямих ділянок трубопроводу певної довжини до і після звужувального пристрою. На цих ділянках не повинні встановлюватися ніякі пристрої, що можуть спотворити гідродинаміку потоку на вході або

виході звужувального пристрою. Довжина цих ділянок повинна бути такою, щоб перекручування потоку, внесені колінами, вентилями, трійниками тощо, змогли згладитися до підходу потоку до звужувального пристрою. При цьому необхідно мати на увазі, що більш істотне значення мають перекручування потоку перед звужувальним пристроєм і значно менше – за ним, тому засувки і вентиля, особливо регулювальні, рекомендується встановлювати після звужувальних пристроїв. Довжина L прямої ділянки перед звужувальним пристроєм залежить від відносної площі m звужувального пристрою, діаметра трубопроводу D і вигляду місцевого опору, розташованого до прямої ділянки. У таблиці вказані відносні довжини L/D в залежності від m для деяких різновидів місцевих опорів.

Довжина прямої ділянки L_2 після звужувального пристрою залежить тільки від числа m . Для $m = 0,05$ $L_2 = 4D_2$ і для $m = 64$ $L_2 = 8,2D_2$.

Дифманометр підключається до звужувального пристрою двома лініями (імпульсними трубками) внутрішнім діаметром не менше як 8 мм. Допускається довжина ліній до 50 м, однак через можливість виникнення великої динамічної похибки не рекомендується використовувати лінії довжиною більше 15 м.

Таблиця 5.1 – Довжина прямої ділянки від відносної площі звужувального пристрою

Місцевий опір	m			
	0,05	0,3	0,5	0,64
Коліно або трійник	10	16	28	46
Група колін в одній площині	14	22	36	50
Група колін у різних площинах	34	44	62	80
Цілком відкриті засувки	12	14	20	30
Конусні звуження	10	10	14	30
Конусні розширення	16	20	30	54
Гільза термометра діаметром $d \leq 0,03D$	5	5	5	5

Для правильного вимірювання витрати перепад тиску на вході дифманометра повинен бути рівним перепадові тиску, що розвивається звужувальним пристроєм, тобто перепад від звужувального пристрою до дифманометра повинен передаватися без перекручування. Це можливо в тому випадку, якщо тиск, створюваний стовпом середовища в обох сполучних трубках, буде однаковим. У реальних умовах ця рівність може порушуватися. Наприклад, при вимірюванні витрати газу причиною цього може бу-

ти скупчення конденсату в неоднаковій кількості в сполучних лініях, а при вимірюванні витрати рідини, навпаки, скупчування газових бульбашок, що виділяються з рідини. Щоб уникнути цього, сполучні лінії повинні бути або вертикальними, або похилими з ухилом не менш 1:10, причому на кінцях похилих ділянок повинні бути конденсато- або газозбірники (gas collections). Крім того, обидві імпульсні трубки повинні розташовуватися поруч, щоб уникнути неоднакового нагрівання або охолодження їх, що може призвести до неоднакової щільності рідини, що заповнює їх і, отже, до додаткової похибки. При вимірюванні витрати пари важливо забезпечити рівність і сталість рівнів конденсату в обох імпульсних трубках, що досягається застосуванням зрівняльних посудин.

До одного звужувального пристрою може бути підключено кілька дифманометрів. При цьому допускається підключення сполучних ліній одного дифманометра до сполучних ліній іншого.

При вимірюванні витрати рідини дифманометр рекомендується встановлювати нижче звужувального пристрою 1, що виключає попадання в сполучні лінії і дифманометр газу, що може виділитися з протікаючої рідини, (рис. 5.3, а). Для горизонтальних і похилих трубопроводів сполучні лінії повинні підключатися через запірні вентиля 2 до нижньої половини труби (але не в самій нижній частині) щоб уникнути попадання в лінії газу або виділень із трубопроводу. Якщо дифманометр все-таки встановлюється вище звужувального пристрою (рис. 5.3, б), то в найвищих точках сполучних ліній необхідно встановлювати газозбірники 4 із продувними вентилями. Якщо сполучна лінія складається з окремих ділянок (наприклад, при обході якої-небудь перешкоди), то газозбірники встановлюються в найвищій точці кожної ділянки. При установленні дифманометра вище звужувального пристрою трубки поблизу останнього прокладаються з U-подібним вигином, що опускається нижче трубопроводу, не менш ніж на 0,7 м для зменшення можливості попадання газу з труби в сполучні лінії. Для вимірювання витрати гарячих рідин ($t > 100$ °C) можлива додаткова похибка вимірювань через зміну середньої температури рідини в «плюсовій» сполучній лінії, що приводить до зміни тиску в «плюсовій» камері дифманометра.

При вимірюванні витрати газу дифманометр рекомендується встановлювати вище звужувального пристрою 1, щоб конденсат, що утворився в сполучних лініях, міг стікати в трубопровід (рис. 5.4, а).

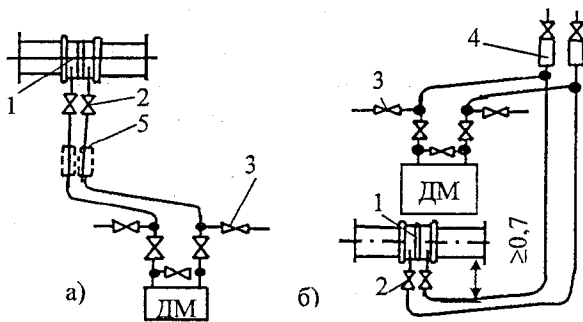


Рисунок 5.3 – Схема сполучних ліній для вимірювання витрат рідини
 а) дифманометр нижче звужувального пристрою;
 б) дифманометр нижче звужувального пристрою;

Для вимірювань витрати перегрітої водяної пари неізолювані сполучні лінії виявляються заповненими конденсатом. Щоб уникнути додаткової похибки рівень конденсату і його температура в обох лініях повинні бути однаковими при будь-якій витраті.

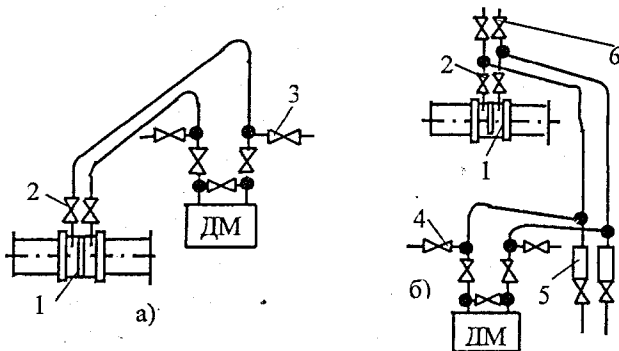


Рисунок 5.4 – Схема сполучних ліній при вимірюваннях витрати газу з установленням дифманометра вище (а) і нижче (б) звужувального пристрою

Сполучні лінії потрібно підключати через запірні вентиля 2 до верхньої половини звужувального пристрою, їхнє прокладання бажано робити вертикально. Якщо вертикальне прокладання сполучних ліній неможливе, то їх варто прокладати з нахилом убік трубопроводу або конденсатозбірників (condensate collection). Для вимірювання витрати агресивного газу в сполу-

чні лінії повинні включатися роздільні посудини. Продування сполучних ліній здійснюється через вентилі 3, 4, 6.

5.3.1 Рівняння витрат для стисливої рідини.

У випадку вимірювання витрат стисливої рідини (газу або пари) необхідно враховувати зміну густини речовини у зв'язку зі зміною тиску при протіканні через звужувальний пристрій. При цьому з достатнім ступенем точності можна вважати, що зміна стану газу або пари описується рівнянням адіабатного процесу, тобто

$$P = C \cdot \rho^k, \quad (5.1)$$

де k – показник адіабати;

C – постійна величина.

Масові та об'ємні витрати газу

$$G_M = \alpha \varepsilon F_0 \sqrt{2\rho \Delta P}, \quad (5.2)$$

$$V_M = \alpha \varepsilon F_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta P}. \quad (5.3)$$

де ε – поправковий множник на розширення вимірюваного середовища.

5.4 Вимірювання швидкостей і витрати напірними трубками

Напірні трубки застосовують для вимірювання швидкості й тиску в потоках, а також для вимірювання швидкостей у примежових шарах при експериментальних дослідженнях як у лабораторних, так і у виробничих умовах. Вони використовуються також для вимірювання витрат рідин і газів при дослідженнях, випробуваннях і в ряді інших випадків. Спеціальні напірні трубки застосовують, крім того, для вимірювання швидкості польоту літаючих апаратів (точніше швидкості відносно повітряного середовища).

Вимірювання швидкості в потоці рідини або газу напірними трубками зводиться до вимірювання динамічного тиску (швидкісного напору), що дорівнює різниці повного й статичного тисків і пов'язане зі швидкістю співвідношенням, що одержане з рівняння Бернуллі

$$p_n - p_c = \frac{\rho v^2}{2}, \quad (5.4)$$

звідки швидкість незбуреного потоку в точці вимірювання дорівнює

$$v = \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_n - p_c)}, \quad (5.5)$$

де v – швидкість руху газу або рідини, м/с;

ρ – густина рідини або газу в робочих умовах, кг/м³;

p_n – повний тиск у лобовій частині (frontal part) напірної трубки, що має назву критичної, Па;

p_c – статичний тиск або так званий гідродинамічний тиск у незбуреному потоці, Па.

Таким чином, для визначення динамічного тиску $\rho v^2/2$, а отже, і швидкості в даній точці потоку, необхідно виміряти різницю повного й статичного тисків. Вимірювання повного тиску може бути здійснене напірною трубкою (рис. 5.5) з отвором на лобовому її кінці (трубкою Піто-Прандтля). Різниця тиску вимірюється мікроманометром або рідинним дифманометром.

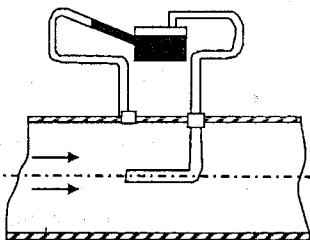


Рисунок 5.5 – Вимірювання витрати за допомогою трубки Піто-Прандтля

Необхідно мати на увазі, що якою би вдалою не була конструкція трубки, динамічний тиск вимірюється не цілком точно. Тому вводять поправковий коефіцієнт. Якщо позначити цей коефіцієнт через ξ , то

$$v = \xi \sqrt{\frac{2}{\rho}} (P_n - P_c). \quad (5.6)$$

5.5 Витратоміри постійного перепаду тиску

Витратоміри постійного перепаду тиску відносяться до засобів вимірювань, що мають назву витратомірів обтікання. Вони основані на вимірюванні вертикального переміщення чутливого елемента (тіла), що залежить від витрат середовища й приводить одночасно до зміни площі прохідного отвору витратоміра таким чином, що різниця тисків на чутливий елемент (перепад тиску) залишається практично постійною. Протидіючою силою у витратомірах цього виду є сила ваги чутливого елемента, виконаного у вигляді поплавця або поршня.

До приладів постійного перепаду тиску відносяться ротаметри (рис. 5.6), поршневі й поплавкові витратоміри.

Ротаметри, широко застосовуються в лабораторних і промислових умовах, призначені для вимірювання об'ємної витрати, що змінюється плавно, однорідних потоків чистих і слабо забруднених рідин і газів з дисперсними включеннями сторонніх частинок. Вони застосовуються також як індикатори витрати середовища в газоаналізаторах і інших приладах.

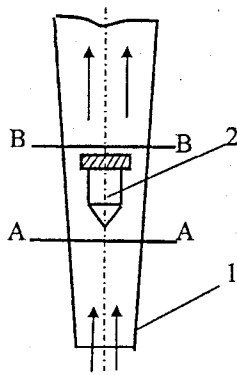


Рисунок 5.6 – Ротаметр

Принцип дії ротаметра будується на зрівноважуванні при будь-якій витраті сили ваги поплавця силами, що діють на нього з боку рідини. Ротаметр у найпростішому вигляді складається з вертикальної конусної скляної

трубки 1, усередині якої перебуває чутливий елемент 2, виконаний у вигляді поплавця. Для забезпечення сталої роботи поплавця верхній його обід має канали із крутим нахилом. Під дією потоку рідини або газу поплавець вертикально переміщується й одночасно приходить в обертовий рух і центрується в середині потоку. За переміщенням поплавця ротаметра уздовж його шкали, нанесеної на конусній скляній трубці, судять про об'ємні витрати в одиницю часу (л/год, м³/год). Є ротаметри, у яких поплавець не робить обертового руху, а корпус їх виконаний з металу.

Положення поплавця залежить не тільки від витрати, але і від густини контрольованого середовища, тобто градування ротаметра повинне проводитися з її врахуванням. Через велику кількість контрольованих середовищ ротаметри підрозділяються на дві групи: для рідин, які градууються на воді, і для газів, які градууються на повітрі.

Якщо такі ротаметри використовуються для вимірювання витрати інших середовищ, то їхні показання потрібно множити на поправковий множник k . Якщо в'язкості вимірюваного і градуовального середовищ близькі, то

$$k = \sqrt{\frac{\rho_{gr}(\rho_n - \rho)}{\rho(\rho_n - \rho_{gr})}}, \quad (5.7)$$

де ρ_{gr} і ρ градуовальна і дійсна густини середовища.

Переградування ротаметра може бути здійснене зміною ρ_n , наприклад шляхом виготовлення поплавця з іншого матеріалу або пустотілим.

В ротаметрах використовуються скляні конічні трубки, на зовнішній поверхні яких нанесена шкала. Показчиком служить верхня горизонтальна площина поплавця. Ротаметри зі скляною конусною трубкою застосовуються для вимірювання витрати газів або прозорих рідин, що знаходяться під тиском не більш 0,6 МПа.

Для вимірювання витрати середовищ під надлишковим тиском до 6,4 МПа використовуються ротаметри з металевою конічною трубкою. Звичайно такі ротаметри забезпечуються диференційно-трансформаторними або пневматичними перетворювачами для дистанційної передачі показів. Клас таких ротаметрів дорівнює 2,5.

Матеріал поплавців: сталь, алюміній, бронза, ебоніт, пластмаси – не повинний піддаватися корозії в середовищі. Ротаметри мають ряд переваг:

простота будови, можливість вимірювання малих витрат на трубопроводах малих діаметрів; практично рівномірна шкала.

Недоліками ротаметрів є: необхідність установлення тільки на вертикальних ділянках трубопроводів, труднощі дистанційної передачі показів і запису; непридатність для вимірювання витрат середовищ з високими тиском і температурою.

5.6. Тахометричні витратоміри, лічильники кількості та електромагнітні витратоміри

Тахометричними називаються витратоміри, у яких швидкість руху робочого тіла пропорційна об'ємній витраті вимірюваного середовища. У більшості випадків робоче тіло – перетворювач витрати (турбіна, кулька тощо) – під впливом потоку обертається. У залежності від будови тахометричні витратоміри підрозділяються на турбінні, кулькові і камерні.

Турбінні (turbine) витратоміри (рис.5.7) є найбільш точними приладами для вимірювання витрат рідин.

Тахометричні перетворювачі витрати можуть використовуватися як у лічильниках кількості, так і у витратомірах. У першому випадку перетворювач витрати (наприклад, турбіна) зв'язаний з лічильним механізмом.

Тахометричні витратоміри мають електричні тахометричні перетворювачі частоти обертання чутливого елемента в електричний сигнал, вимірюваний потім показчиком. Такі електричні перетворювачі швидкості незначно гальмують рухомий елемент (у порівнянні з механічною передачею в лічильниках), внаслідок чого точність тахометричних витратомірів вища точності лічильників з механічним редуктором. Тахометричні прилади вимірюють об'ємні витрати. За необхідності вимірювання масових витрат вони повинні забезпечуватися густинοмірами й обчислювальним пристроєм.

Лічильники кількості рідин застосовують для вимірювання сумарної кількості різних рідин: (води, нафти, мазуту, бензину тощо), що перебувають під тиском до 1–1,6 МПа. За принципом дії тахометричні лічильники розділяються на швидкісні й об'ємні. Ці технічні засоби залежно від того, для вимірювання якої рідини вони призначені, прийнято називати водолічильниками, нафтолічильниками, бензолічильниками тощо.

Похибка вимірювань і втрати статичного тиску на витратомірі залежать від витрати і в'язкості рідини. Тому важливими технічними даними

таких приладів є мінімальна вимірювана витрата (нижня межа вимірювання) і втрата тиску на них.

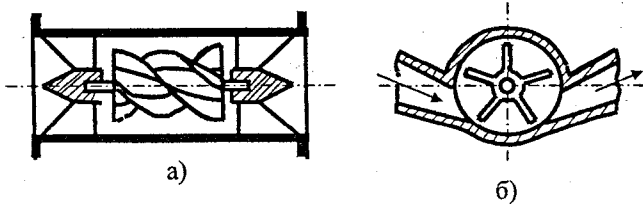


Рисунок 5.7 – Будова турбінних перетворювачів витрати а) з аксіальною турбіною; б) з тангенціальною турбіною

Для здійснення процесу вимірювання турбінний витратомір (рис. 5.8) повинен складатися, принаймні, із трьох елементів:

- а) турбінного первинного перетворювача 3;
- б) вторинного перетворювача 4;
- в) відлікової системи (реєстратора) 1.

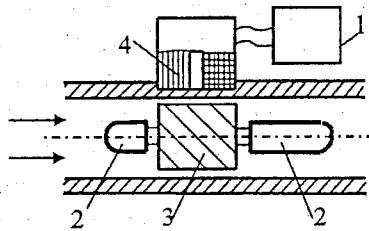


Рисунок 5.8 – Принципова схема турбінного витратоміра

Турбінні витратоміри застосовуються для вимірювання витрати різних рідин за винятком дуже в'язких і забруднених. Для них важливою є мастильна здатність вимірюваного середовища, тому найбільш доцільним є їхнє використання на нафтопродуктах. Для вимірювання витрати газу турбінні витратоміри застосовуються рідко. Це пов'язано з тим, що через малу щільність газу досить великий обертальний момент буває тільки при великих витратах. Це зменшує діапазон вимірювання витратоміра і підвищує поріг чутливості. Крім того, у газовому середовищі прискорюється знос підшипників.

На рис. 5.8 схематично показана будова турбінного перетворювача витрати рідини. Корпус перетворювача є відрізком труби з двома фланцями

для приєднання його до трубопроводу. В середині корпусу встановлені потікопрямлячі 2, з'єднані нерухомою віссю, на якій розташована турбіна 3. У витратомірах частота обертання турбіни пропорційна об'ємній витраті і за допомогою тахометричного перетворювача 4 перетворюється в частоту вихідної напруги і потім за допомогою спеціальної схеми 1 – в аналоговий вихідний сигнал. У лічильниках кількості частота обертання турбіни пропорційна кількості речовини, яка проходить через переріз, вимірюється рахунковим механізмом, з'єднаним з віссю турбіни шестеренним редуктором і магнітною муфтою.

Турбіни тахометричних витратомірів підрозділяються на аксіальні і тангенціальні. У перших вісь збігається з напрямком потоку, у других вона перпендикулярна до потоку.

Аксіальні турбіни мають лопаті гвинтової форми (на рис. 5.7, а показана чотирилопатева турбіна). При малому діаметрі турбін число лопатей мале (4 – 6), але вони мають велику довжину. При великих діаметрах турбін число лопатей велике (до 20), але їхня висота і довжина невеликі (в порівнянні з діаметром).

Конструкції тангенціальних турбін різноманітні. Як приклад на рис. 5.7, б показана турбіна серійних однострумінних водолічильників.

Для незначних навантажень на турбінку її частота обертання ω пропорційна об'ємній витраті Q_0 , однак на характер цієї залежності впливають в'язкість ν і щільність ρ вимірюваного середовища, момент опору M_c від тертя в опорах і реакції тахометричного перетворювача частоти обертання (поз. 1 на рис. 5.8) або механічного лічильника, конструктивні параметри турбіни.

Прикладом турбінного тахометричного витратоміра, використання якого можливе на ТЕС, є витратомір топкового мазуту ТМ-1. Ці витратоміри мають диференційно-трансформаторний тахометричний перетворювач, сигнал від якого надходить до нормувального перетворювача, з вихідним сигналом 0 – 5 мА. Перетворювачі витрати таких витратомірів виготовляються з діаметрами умовних проходів від 32 до 200 мм для тиску до 6,4 МПа і температури від 50 до 150 °С. Витратоміри можуть мати шкали з верхніми межами 6,3 – 240 м³/год. Діапазон вимірювання цих витратомірів (0,2 ÷ 1) $G_{\text{вн}}$. У діапазоні (0,3 – 1) $G_{\text{вн}}$ гранична основна похибка дорівнює $\pm 2\%$ і в діапазоні (0,2 – 0,3) $G_{\text{вн}} \pm 2,5\%$. Слід зазначити, що в наш час турбінні тахометричні витратоміри є одними з найбільш точних. Існують ви-

тратоміри, що серійно випускаються, з основною похибкою 0,5%. Ця похибка може бути зменшена індивідуальним градуванням.

Перевагою турбінних витратомірів є можливість вимірювання витрат у широкому діапазоні ($5 \cdot 10^{-9} \div 2 \text{ м}^3/\text{с}$) на трубопроводах діаметром 4 – 750 мм з тисками до 250 МПа і температурах від мінус 240 до плюс 700 °С, а також великий діапазон вимірювання. При великих швидкостях і діаметрах труб діапазон вимірювання $G_{\text{вп}}/G_{\text{хв}}$ досягає 15 – 20, при малих швидкостях і малих діаметрах труб 5 – 10. Крім того, такі витратоміри мають малу інерційність.

Однак тахометричні турбінні витратоміри мають і недоліки, обмежуючі їхнє застосування: вплив в'язкості контрольованого середовища, зношування опор (не можна, наприклад, вимірювати витрату середовищ, що містять завислі частинки, особливо якщо вони мають абразивні властивості).

Кульковими називаються тахометричні витратоміри, рухомим елементом яких є кулька, що безупинно рухається в одній площині по внутрішній поверхні труби під впливом попередньо закрученого потоку. Швидкість руху кульки по колу труби пропорційна об'ємній витраті рідини. Схема кулькового перетворювача для середніх і великих витрат подана на рис. 5.9, а. Потік рідини, закручений формувачем 1 у гвинтовому напрямку, викликає рух кульки 2 по колу. Від переміщення уздовж труби кулька притримується обмежувальним кільцем 3 за яким розташовується потокоспрямляч (stream rectifier) 4 для спрямлення закрученого потоку. На зовнішній стороні немагнітного корпусу розташовується тахометричний перетворювач 5 для перетворення частоти обертання кульки в частотний електричний сигнал.

Для невеликих витрат застосовується конструкція, подана на рис. 5.9, б. Тут немає спеціального формувача для закручування потоку, а рух кульки по колу викликається тангенціальним підведенням рідини.

У кулькових витратомірах застосовуються тахометричні перетворювачі швидкості, аналогічні перетворювачам турбінних витратомірів. Кулька (рис. 5.9, а) під дією відцентрової сили притискається до внутрішньої поверхні труби, а під дією осьової складової швидкості потоку – до обмежувального кільця, тобто кульці крім сил в'язкого тертя рідини необхідно переборювати сили тертя по поверхні труби й обмежувального кільця. Це викликає відставання колової швидкості кульки v_k від колової швидкості потоку v , що оцінюється коефіцієнтом ковзання $S = (v - v_k)/v$, звідки $v_k = v \cdot (1 - S)$.

Частота f імпульсів тахометричного перетворювача пов'язана зі швидкістю кульки співвідношенням $f = v_k / (2\pi R)$, де R – радіус обертання центра кульки. Для забезпечення однозначної залежності між f і об'ємною витратою V_0 треба мати сталу S . Цей коефіцієнт найменше змінюється в області значень чисел Рейнольдса від 10^3 до 10^5 , тому кулькові витратоміри проєктуються для роботи в цьому діапазоні. Крім того, для зменшення ковзання маса кульки робиться по можливості малою. Відповідно до стандарту кулькові витратоміри можуть застосовуватися для вимірювання витрати рідин зі щільністю $700 - 1400 \text{ кг/м}^3$, в'язкістю $(0,3 - 12) \cdot 10^{-6} \text{ М}^2/\text{с}$. Через відсутність опор у рухомого елемента витратоміри можуть використовуватися на рідинах із твердими включеннями (обмеженої величини) і агресивних. Діапазон вимірювання кулькових витратомірів зазвичай дорівнює $(0,2 - 1) G_{\text{вп}}$. На АЕС використовуються кулькові витратоміри ШТОРМ двох модифікацій; ШТОРМ-32М (верхня межа вимірювання $50 \text{ м}^3/\text{год}$) і ШТОРМ-8А (верхня межа вимірювання $8 \text{ м}^3/\text{год}$). Основна їх похибка $\pm (1,5 \div 2,5) \%$.

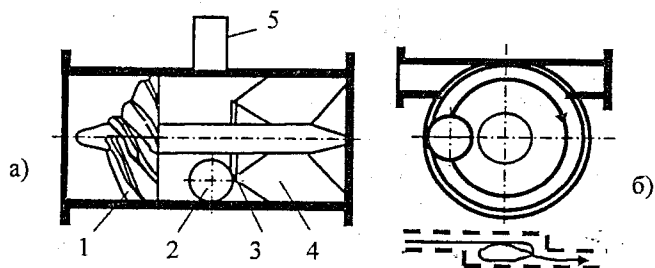


Рисунок 5.9 – Кулькові перетворювачі витрати
а) для великих витрат; б) для малих витрат

5.7 Об'ємні витратоміри

Камерними (об'ємними) називаються тахометричні витратоміри і лічильники, що мають один або кілька рухомих елементів, що при русі відмірюють певні об'єми рідини (рис. 5.10). Звичайно ці рухомі елементи рухаються безупинно зі швидкістю, пропорційною об'ємній витраті. У промисловості в переважній більшості випадків застосовуються камерні лічильники. Перевагами їх є висока точність вимірювання ($0,5 - 1\%$ для рідин і

1 – 1,5% (для газів), досить великий діапазон вимірювань, слабкий вплив в'язкості вимірюваного середовища. Остання обставина дозволяє встановлювати камерні лічильники для рідин з в'язкістю до $3 \cdot 10^{-4}$ м²/с.

Об'ємні тахометричні лічильники, що мають більш високу точність в порівнянні зі швидкісними, застосовують для вимірювання сумарної кількості мазуту, нафти, бензину й інших рідин. В об'ємних лічильниках рідина, що протікає через нього, вимірюється окремими, рівними за об'ємом дозами, які відтинаються одним або декількома робочими елементами. Число пропущених доз рідини підсумовується лічильним механізмом, а сумарна кількість рідини, що пройшла через прилад за певний проміжок часу, показується лічильним покажчиком.

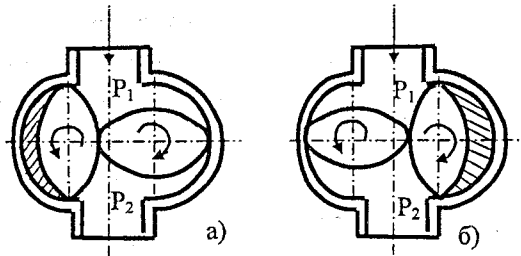


Рисунок 5.10 – Схема лічильника з овальними шестернями

5.8 Електромагнітні витратоміри

Електромагнітні (індукційні) витратоміри застосовують для вимірювання в трубопроводах об'ємних витрат електропровідних рідин, розчинів і пульпи з дрібнодисперсними неферомагнітними частинками. Питома електрична провідність вимірюваного середовища повинна перебувати в межах від 10^{-8} до 10 Ом/м. Деякі різновиди електромагнітних витратомірів знаходять застосування для вимірювання витрат рідкого металевого теплоносія, наприклад натрію.

Принцип дії розглянутих витратомірів (рис. 5.11, 5.12) ґрунтується на законі електромагнітної індукції, відповідно до якого наведена в провіднику е.р.с. пропорційна швидкості його руху в магнітному полі. Роль провідника, що рухається в магнітному полі, відіграє електропровідна рідина, яка протікає через первинний електромагнітний перетворювач витрат, встановлений у трубопроводі. Вимірюючи е.р.с. наведену в електропровідній рідині, що при своєму русі перетинає магнітне поле первинного перетворю-

вача, можна визначити первинну швидкість рідини, а разом з нею й об'ємну витрату.

На рис 5.12 показані схеми електромагнітних витратомірів. Корпус 1 перетворювача, виготовлений з немагнітного матеріалу і покритий зсередини електричною ізоляцією 2 (гумою, емаллю, фторопластом тощо), розташований між полюсами магніту (на рис.5.12, а зображений постійний магніт). Через стінку труби, ізольовано від неї, по діаметру введені електроди 3, що знаходяться в електричному контакті з рідиною. Силові лінії магнітного поля спрямовані перпендикулярно до площини, що проходить через вісь труби і лінію електродів.

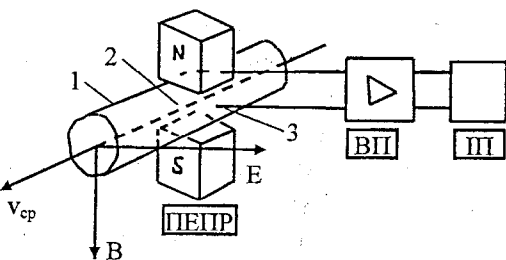


Рисунок 5.11 – Електромагнітний витратомір

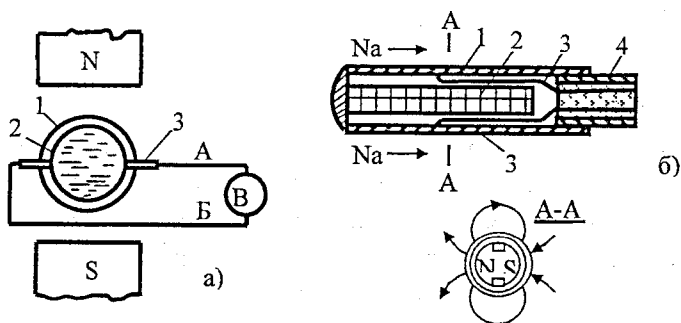


Рисунок 5.12 – Схеми електромагнітних витратомірів
а) із зовнішнім магнітом; б) з внутрішнім магнітом

Застосування постійних магнітів у витратомірах дозволяє полегшити боротьбу з перешкодами від зовнішніх електромагнітних полів, збільшити швидкодію приладу. Основним недоліком їхнього використання є поляризація електродів: концентрація біля позитивного електрода негативних іо-

нів, а біля негативного позитивних. Внаслідок цього на границях електродів створюються е.р.с., що у сумі утворюють е.р.с. поляризації, спрямовану проти основної вимірюваної е.р.с., а це змінює градувальну характеристику приладу й унеможливує його стабільну роботу. Тому електромагнітні витратоміри з постійним магнітним полем не застосовуються для рідин з іонною провідністю. Широке поширення вони одержали для вимірювання витрати розплавлених металів, у яких відсутнє явище поляризації. Типова область застосування таких витратомірів – ядерні енергетичні установки з рідкометалевим теплоносієм. У цих установках звичайно використовуються малогабаритні електромагнітні перетворювачі, що є власне кажучи вимірниками локальної швидкості рідкого металу.

Електромагнітні витратоміри можуть бути використані в ряді випадків, коли застосування витратомірів інших типів утруднене або неможливе зовсім: при вимірюванні витрати агресивних, абразивних, в'язких рідин і пульпи, вимірювання витрати рідких металів.

До числа недоліків електромагнітних витратомірів варто віднести вимоги до мінімального значення електропровідності вимірюваного середовища, що звужує коло використання таких витратомірів. Іншим недоліком витратомірів є складність вимірювальної схеми, на яку впливає багато факторів, що утрудняє виготовлення витратомірів класу більше одиниці і ускладнює експлуатацію.

5.9 Ультразвукові витратоміри

Принципова схема ультразвукового витратоміра наведена на рис. 5.13. Звукові коливання високої частоти (20 кГц і вище), створювані електроакустичним вібратором (випромінювачем) В1, проходять через середовище, що рухається трубопроводом, й реєструються приймачем П1, який розташований від випромінювача на відстані l . Якщо v – швидкість потоку середовища, а c – швидкість звуку в даному середовищі, то тривалість поширення звукової хвилі за напрямком руху потоку направлена від випромінювача В1 до приймача П1.

Тривалість поширення звукової хвилі проти руху потоку направлена від випромінювача В2 до приймача П2

$$\tau_2 = \frac{L}{c - v} \quad (5.8)$$

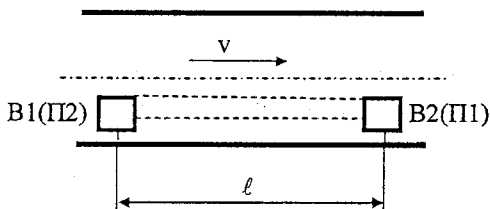


Рисунок 5.13 – Схема ультразвукового витратоміра

Різниця часу, що вимірюється електронно-лічильною схемою

$$\Delta\tau = \frac{2Lv}{c^2} \cdot \frac{1}{1 - v^2/c^2}. \quad (5.9)$$

Взявши до уваги, що відношенням v^2/c^2 можна знехтувати порівняно з одиницею, і виразивши швидкість потоку через витрати, одержимо рівняння для вимірювань ультразвуковими витратомірами

$$\Delta\tau = \frac{2\varphi \cdot L}{F \cdot c^2} G, \quad (5.10)$$

де F – площа перерізу потоку;

φ – коефіцієнт, що враховує розподіл швидкостей за перерізом потоку.

Існують різні способи й різні вимірювальні схеми для визначення $\Delta\tau$:

- 1) вимірювання різниці фазових зсувів ультразвукових хвиль, що направляються за потоком й проти нього;
- 2) вимірювання різниці частот повторення коротких імпульсів або пакетів ультразвукових коливань, що спрямовуються одночасно за потоком й проти нього;
- 3) вимірювання різниці тривалості проходження коротких імпульсів, що направляються одночасно за потоком й проти нього.

Крім того, є самостійний метод визначення витрат, що базується на вимірюванні зміщення потоком ультразвукової хвилі, яка направляється перпендикулярно до напрямку руху середовища.

5.10 Оптичні (лазерні) витратоміри

До числа порівняно нових методів вимірювання локальних швидкостей потоку й витрат відносяться методи, основані на застосуванні оптичних квантових генераторів-лазерів (ОКГ). Перевагами цих методів є: безконтактність, висока чутливість, мала інерційність, великий діапазон вимірювання швидкостей і витрат незалежно від фізичних властивостей вимірюваного середовища (як рідин, так і газів), за винятком вимоги її прозорості в діапазоні довжин хвиль, випромінюваних лазерами.

Крім того, лазерні витратоміри використовують при вимірюванні витрат агресивних, високо- і низькотемпературних (криогенних) рідин і газів.

Поширення одержали два конструктивні різновиди оптичних (лазерних) витратомірів, що відрізняються фізичними явищами, які лежать в їхній основі: витратоміри, основані на ефекті розсіювання світла рухомими частинками (доплерівські витратоміри) і витратоміри, основані на ефекті Фізо-Френеля – захоплення світла рухомим середовищем.

В оптичному витратомірі, що реалізує перший ефект, випромінювання лазера, розсіяне природними або штучно введеними частинками, що рухаються в потоці, набуває частотного зсуву, пропорційного осередненій швидкості частинок.

У витратомірі, що реалізує ефект Фізо-Френеля, лазер генерує дві зустрічні хвилі, що біжать по замкнених оптичних шляхах. Потік рідини або газу, який рухається на деякій ділянці резонатора по трубопроводу із прозорими вікнами, створює різні за знаком збільшення оптичних шляхів зустрічних хвиль лазера за рахунок складової проекції вектора швидкості потоку на напрямок променя. Внаслідок цього різні й частоти зустрічних хвиль.

5.11 Вимірювання витрат методом контрольних "міток"

Якщо створити в потоці вимірюваного середовища будь-яку "мітку" (будь-яка ознака частини потоку, за переміщенням якого можна простежити) і вимірювати час t_M , за який "мітка" пройде певний фіксований шлях L_M , то можна визначити швидкість середовища, а відтак, і витрату (рис. 5.14).

Вважаючи, що швидкість переміщення "мітки" v дорівнює швидкості потоку, одержимо

$$v = \frac{L_M}{t_M} \quad (5.11)$$

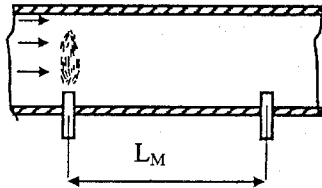


Рисунок 5.14 – Метод контрольних міток

Витратоміри, робота яких основана на цьому методі вимірювань, складаються із пристрою, що періодично створює ту або іншу "мітку" потоку; пристрою, що фіксує момент проходження "мітки", і приладу, що вимірює тривалість переміщення "мітки" на фіксовану відстань L_M .

Рівняння вимірювання буде мати вигляд

$$t_M = \varphi \frac{L_M}{Q} F, \quad (5.12)$$

де φ – коефіцієнт, що залежить від розподілу швидкостей за перерізом потоку і числа Рейнольдса.

5.12 Відцентрові витратоміри

Відцентровий витратомір (рис. 5.15) являє собою 360-градусне коліно (тобто повне коло) трубопроводу, у верхній частині якого на зовнішній і внутрішній (за радіусом кривизни) стінках відбирають тиски p_1 і p_2 , відповідно.

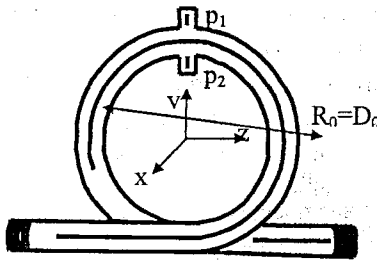


Рисунок 5.15 – Відцентровий витратомір

Принцип дії відцентрових витратомірів базується на тому, що за руху середовища криволінійною ділянкою трубопроводу з'являються відцентрові сили, що створюють перепад тисків між точками з різними радіусами кривизни (де кривизна більша, там і відцентрова сила більша й більший тиск на стінку).

Отримані з умови рівності гідростатичної й відцентрової сил, які діють на елемент об'єму середовища, що тече по криволінійній ділянці трубопроводу (з радіусом кривизни його геометричної осі R_0), робочі рівняння вимірювання відцентрових витратомірів мають вигляд:

для краплинних рідин

$$G = \frac{\pi}{\psi} r \sqrt{R_0 r} \sqrt{\frac{p_2 - p_1}{2\rho}}, \quad (5.13)$$

для газів

$$G = \frac{\pi}{\xi \psi} r \sqrt{R_0 r} \sqrt{\frac{p_0}{2\rho} \ln \frac{p_2}{p_1}}, \quad (5.14)$$

де r – внутрішній радіус трубопроводу: $p_0 = 1/2 (p_1 + p_2)$;

ψ – корегувальний коефіцієнт, що залежить від в'язкості вимірюваного середовища й шорсткості трубопроводу;

ξ – коефіцієнт, що характеризує ступінь ізотермічності процесу стиску газу.

При $p_2/p_1 < 2$ гази з достатньою для практики точністю можна вважати краплинними рідинами.

5.13 Вихрові витратоміри

Принцип дії цих витратомірів полягає в створенні (за допомогою гвинтоподібних шнеків) у потоці середовища, що рухається по трубопроводу, стійкого периферійного вихору. Центральна частина потоку (поблизу осі трубопроводу) при цьому набуває характеру гвинтового шнура. Якщо сформований у такий спосіб потік пустити через розширювальну насадку, то периферійні вихороутворення (formation of vortex) втрачають стійкість, а центральний шнур починає прецесувати (коливатися) відносно геометричної осі насадки із частотою, пропорційною середній швидкості потоку, і амплітудою, рівною діаметру вихідної частини насадки. З аналогічною ча-

стотою й амплітудою, рівною швидкісному напору ρv^2 , буде змінюватися при цьому й тиск на виході потоку з насадка. Перетворивши за допомогою амплітудно-частотного датчика пульсації тиску в електричний сигнал і поділивши його амплітудне значення на частотне, одержимо величину, значення якої пропорційне масовим витратам речовини. Для знаходження об'ємних витрат достатньо виміряти частотну характеристику сигналу.

5.14 Гідродинамічні витратоміри

Гідродинамічні витратоміри базуються на вимірюванні гідродинамічного опору в потоці (рис. 5.16).

5.15 Калориметричні й термоанемометричні витратоміри

Якщо знехтувати теплом, що віддається потоком через стінки трубопроводу в навколишнє середовище, то рівняння теплового балансу між витратами тепла нагрівачем, і теплом, переданим потоку, приймає вигляд

$$q_t = k_0 M c_p \Delta T, \quad (5.15)$$

де k_0 – поправковий множник на нерівномірність розподілу температур по перерізі трубопроводу;

c_p – теплоємність (для газу за постійного тиску) за температури $T_1 + T_2/2$; T_1 і T_2 – температури потоку до й після нагрівача; $\Delta T = T_2 - T_1$.

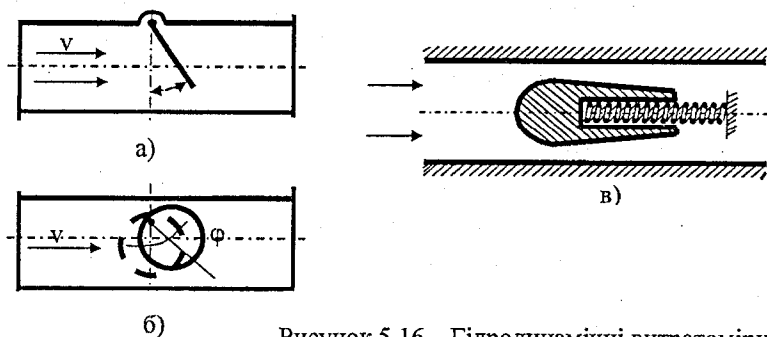


Рисунок 5.16 – Гідродинамічні витратоміри

Теплоту до потоку в калориметричних витратомірах підводять зазвичай електронагрівниками, для яких

$$q_t = 0,24I^2R, \quad (5.16)$$

де I – сила струму;

R – опір нагрівача.

Рівняння вимірювання (статична характеристика перетворення) калориметричних витратомірів

$$M = \frac{0,24IR}{k_0 c_p \Delta T}. \quad (5.17)$$

Існують два способи вимірювання масових витрат відповідно до отриманого виразу:

- витрати визначають за значенням потужності, споживаної нагрівачем, яка забезпечує постійну різницю температур ΔT ;
- витрати визначають за різницею температур ΔT при незмінній потужності, що підводиться до нагрівача.

6 ВИМІРЮВАННЯ РІВНЯ РІДИН ТА СИПКИХ ТІЛ

Під вимірюванням рівня розуміється індикація положення поділу двох середовищ різної густини відносно будь-якої горизонтальної площини, прийнятої за початок відліку.

Вимірювання рівнів рідин і сипких тіл відіграє важливу роль для автоматизації технологічних процесів, особливо якщо підтримання рівня пов'язане з умовами безпечної роботи устаткування. Рівнеміри можуть використовуватися або для контролю за відхиленням рівня від номінального й у цьому випадку вони мають двосторонню шкалу, або для визначення кількості рідини (у сполученні з відомими розмірами ємності) і в цьому випадку вони мають однібічну шкалу. У залежності від умов вимірювання, характеру контрольованого середовища, використовуються різні методи вимірювання рівня. Якщо немає необхідності в дистанційній передачі показань, рівень рідини можна вимірювати приладами з візуальним відліком (вказівних стекол). При необхідності дистанційного вимірювання рівня використовуються більш складні прилади: гідростатичні (дифманомет-

ричні і барботажні), буйкові і поплавкові, ємнісні, індуктивні, радіоізотопні, хвильові, акустичні, термо-кондуктометричні.

Засоби вимірювань рівнів називаються рівнемірами. Як і всі метрологічні засоби, рівнеміри складаються із сукупності вимірювальних перетворювачів і допоміжних пристроїв, необхідних для здійснення процесу вимірювання (пристроїв для лінеаризації функцій перетворення, відлікових пристроїв тощо).

Первинний перетворювач (датчик) сприймає вимірювану величину – рівень і перетворює її у вихідний сигнал (електричний, пневматичний, частотний), що надходить на наступні перетворювачі, або в показання, відлічані по шкалі рівнеміра.

Принцип дії первинних перетворювачів рівнемірів оснований на розходженні фізичних властивостей речовин, що утворюють межу поділу.

Залежно від того, розходження яких фізичних властивостей речовин сприймає первинний перетворювач, рівнеміри підрозділяють на механічні, акустичні, електричні, оптичні й теплові.

6.1 Рівнеміри з візуальним відліком

Такі рівнеміри базуються на візуальному вимірюванні висоти рівня рідини. При невисоких тисках середовища висота рівня вимірюється в скляній трубці (вказівному склі), що сполучена з рідинним і газовим просторами контрольованого резервуара (рис. 6.1). При підвищених тисках застосовується плоске скло, на поверхні якого з боку рідини нанесені вертикальні грановані канавки. З умов міцності не рекомендується застосовувати вказівне скло довжиною більш 0,5 м, тому при великому діапазоні зміни рівня встановлюється кілька стекол у шаховому порядку таким чином, щоб їхні діапазони вимірювання перекривалися.

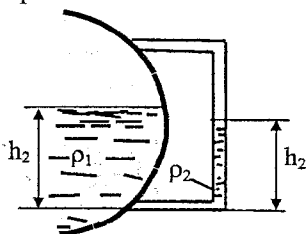


Рисунок 6.1 – Схема рівнеміра з візуальним відліком

Основним джерелом додаткової погрішності таких рівнемірів є різниця густин рідини в контрольованому резервуарі й у склі, викликана розходженням температур (особливо якщо рідина в резервуарі знаходиться при високій температурі, а вказівне скло знаходиться на значному віддаленні). Розходження густин призводить до розходження рівнів у резервуарі і вказівному склі (рівень у склі іноді називають «ваговим» рівнем);

Похибка може досягати істотних значень, тому з метою її зменшення необхідна або теплова ізоляція рівнеміра, або продування його рідиною з резервуара перед відліком.

6.2 Механічні рівнеміри

До цих рівнемірів відносяться поплавкові, буйкові й гідростатичні рівнеміри. Всі вони реалізують абсолютний метод вимірювання рівнів, що базується на використанні розходження густин речовин, які утворюють межу поділу.

Принципова схема поплавкового рівнеміра подана на рис. 6.2.

Як первинний перетворювач рівнеміра використовується тіло (поплавець) кулястої або циліндричної форми, що плаває на поверхні рідини й має постійну осадку (l). Поплавець під дією виштовхувальної сили (архімедової) переміщається разом з рівнем рідини. Положення поплавця, що є мірою поточного значення рівня рідини, фіксується вторинним перетворювачем і перетворюється в електричний, пневматичний, частотний сигнал і (або) відлічується по шкалі покажчика. Зв'язок поплавця із вторинним перетворювачем може здійснюватися за допомогою механічних елементів (троса, стрічки, важеля) або за допомогою безконтактних (оптичних, акустичних, радіоізотопних тощо) слідкуючих систем.

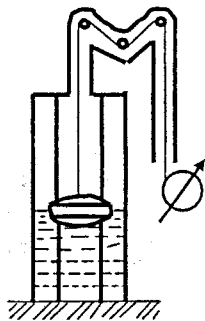


Рисунок 6.2 – Схема поплавкового рівнеміра

Характерна риса поплавкових рівнемірів з механічним зв'язком – необхідність герметизації виводу для вимірювання рівнів токсичних, легко-випаровуваних рідин, у посудинах з надлишковим тиском, а також наявність додаткових похибок, пов'язаних з пружною деформацією й тертям елементів зв'язку.

У той же час використання для фіксації положення поплавця безконтактних слідкуючих систем, ускладнює конструкцію рівнемірів, обумовлює, як правило, нелінійність їхніх характеристик перетворення.

За ретельного градування й правильної експлуатації поплавкових витратомірів їхня основна похибка може бути зведена до значення порядку ± 1 мм з верхньою межею вимірювань до 15 – 20 м. Внаслідок цього поплавокві рівнеміри знаходять застосування як зразкові.

Найбільш істотний вплив на точність вимірювання рівнів поплавковими витратомірами дає зміна температури в робочій порожнині посудини. Зміни температури обумовлюють температурну деформацію поплавця, зміна густин рідини й газу в надрідинній порожнині, що, в остаточному підсумку, приводить до зміни осадки поплавця. Так, якщо температурні зміни густин рідини (ρ_p) і газу (ρ_r) складуть відповідно $\Delta\rho_p$, $\Delta\rho_r$, то абсолютна додаткова похибка рівнеміра, пов'язана зі зміною осадки поплавця

$$\Delta l = \frac{\Delta\rho_p + \Delta\rho_r}{\rho_p - \rho_r} \cdot l, \quad (6.1)$$

за умови сталості площі перерізу поплавця.

Принципова схема буйкового рівнеміра показана на рис. 6.3.

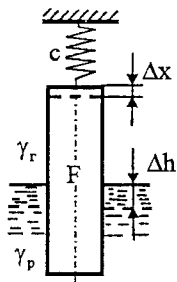


Рисунок 6.3 – Принципова схема буйкового рівнеміра

Чутливий елемент рівнеміра – буй (beacon) є масивним тілом (як правило, осесиметричним), підвішеним вертикально всередині посудини, у якій вимірюється рівень рідини. За зміни Δh рівня рідини змінюється ступінь занурення буя, а отже, і діюча на нього виштовхувальна сила. Зміна виштовхувальної сили компенсується деформацією (Δx) пружного елемента (пружини, мембрани, торсійної трубки), що і є мірою зміни рівня рідини в посудині.

Деформація пружного елемента вторинним перетворювачем перетворюється в пропорційний електричний, пневматичний або частотний сигнал.

Статична характеристика перетворення буйкових рівнемірів має вигляд

$$\Delta x = \frac{\Delta h}{1 + \frac{C}{(\rho_p - \rho_r)gF}}, \quad (6.2)$$

де C – твердість пружного елемента;

g – прискорення вільного падіння, m^2/s ;

F – площа поперечного перерізу буя, m^2 .

Основними факторами, що визначають точність вимірювання рівня буйковими рівнемірами, є:

- несталість твердості C , обумовлене властивостями пружного елемента;
- несталість площі F поперечного перерізу буя, що характеризує якість і технологію його виготовлення;
- зміни густин рідини й газу, обумовлені несталістю їхнього складу й температури.

Слід зазначити, що температурний фактор впливає й на перші дві складові похибки вимірювання рівня. Основна погрішність буйкових рівнемірів коливається в межах $\pm (1 - 1,5)\%$.

Особливість буйкових рівнемірів – наявність початкового (неконтрольованого) рівня, від якого ведеться відлік показань. Розмір початкового рівня становить зазвичай 4–10 мм. Він необхідний для усунення впливу сил поверхневого натягу, що максимальні в момент торкання (або відриву) буя поверхні рідини. Із цією же метою використовують спеціальні покриття, що зменшують налипання рідини на поверхню буя.

Принцип дії гідростатичних рівнемірів (рис. 6.4) базується на вимірюванні тиску стовпа рідини, висота якого дорівнює висоті рівня рідини в посудині.

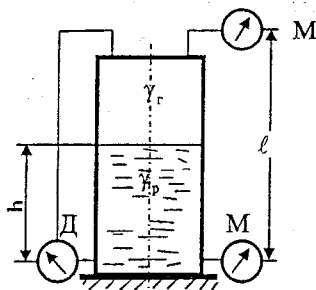


Рисунок 6.4 – Гідростатичний рівнемір

Гідростатичний тиск при цьому вимірюється або за допомогою двох манометрів (M_1, M_2), або одним диференціальним манометром (ДМ).

У першому випадку (при вимірюванні різниці тисків $\Delta p = p_1 - p_2$ двома манометрами) характеристика перетворення рівнемірів описується рівнянням

$$h = \frac{\Delta p}{g(\rho_p - \rho_r)} + \frac{L}{1 - \rho_p / \rho_r}, \quad (6.3)$$

де L – різниця висот установки газового (M_2) і рідинного (M_1) манометрів.

У другому випадку (при використанні ДМ) характеристика перетворення має вигляд

$$h = \frac{\Delta p}{g(\rho_p - \rho_r)}. \quad (6.4)$$

Гідростатичні рівнеміри з механічними сприймальними елементами відрізняються простотою монтажу й обслуговування, високою надійністю. Однак їхній чутливий елемент перебуває в безпосередньому контакті з контрольованим середовищем, що потребує в ряді випадків застосування для датчиків спеціальних матеріалів, істотно звужує область їхнього використання.

Від зазначеного недоліку вільний один з типів гідростатичних рівнемірів – п'езометричний.

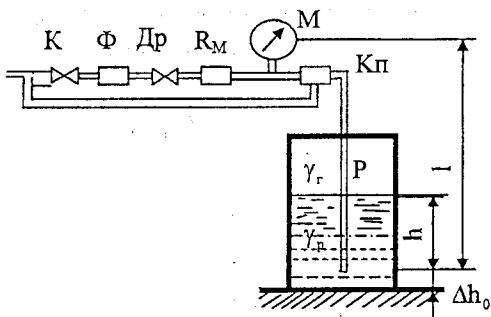


Рисунок 6.5 – П'езометричний гідростатичний рівнемір

Прилад працює в такий спосіб. Нейтральний відносно рідини газ при відкритому відсічному клапані К проходить через фільтр Ф, дроселюється до певного заданого тиску дроселем Др і пропускається через імпульсну трубку, опущену в рідину, рівень якої вимірюється. Регулятор витрат R_M забезпечує постійний рівень витрат газу q , що не залежить від поточного значення рівня h . Мірою h у цьому випадку є тиск, що реєструється манометром М.

П'езометричні рівнеміри придатні для вимірювання рівня будь-яких, у тому числі, і агресивних рідин (при правильному виборі матеріалу імпульсної трубки). Єдиний обмежний фактор – в'язкість рідини. Вплив в'язкості проявляється в збільшенні діаметра бульбашок газу, відривання яких від обрізу трубки супроводжується виникненням коливань тиску й витрат у вимірювальній лінії, що різко знижує точність вимірювань. Тому п'езометричні рівнеміри застосовують для вимірювання рівнів рідин, в'язкість яких не перевищує 2000 сСт (сантистоксів).

6.3 Дифманометричні рівнеміри

Схема підключення дифманометра до відкритого резервуара, що знаходиться під атмосферним тиском, зображена на рисунку 6.6.

Обидві імпульсні трубки дифманометра заповнюються контрольною рідиною (якщо вона не агресивна).

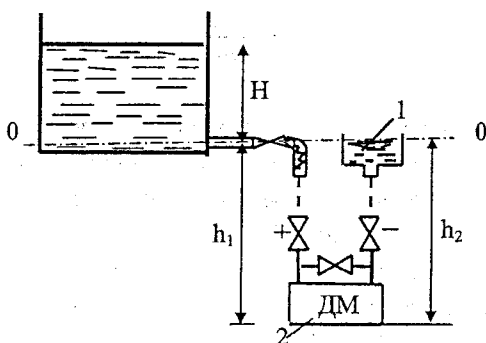


Рисунок 6.6 – Схема підключення дифманометра для вимірювання рівня у відкритому резервуарі

6.4 Акустичні рівнеміри

Існують і знаходять застосування акустичні рівнеміри трьох основних типів – локаційні рівнеміри, рівнеміри поглинання й резонансні. Всі вони реалізують різні фізичні явища, пов'язані з поширенням звуку в пружному (рідинному або газовому) середовищі.

Так, локаційні рівнеміри реалізують ефект відбиття звукової хвилі від поверхні поділу середовищ (рис. 6.7).

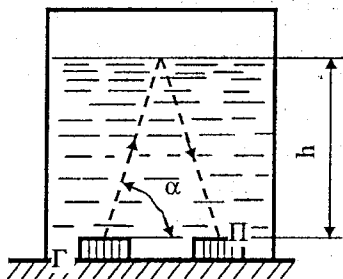


Рисунок 6.7 – Акустичний рівнемір

Генератор Г випромінює в рідину пакет імпульсів високої (ультразвуковий) частоти. Відбитий від границі поділу рідина-газ сигнал уловлюється приймачем П ультразвукових коливань. Час t між моментом посилення зондувального імпульсу й моментом приходу відбитого від рівня імпульсу, пов'язаний з поточним значенням рівня залежністю

$$t = \frac{2h}{c \cdot \sin \alpha}, \quad (6.5)$$

де c – швидкість звуку в контрольованому середовищі, м/с.

Час t фіксується відповідною вимірювальною схемою й перетворюється у вихідний сигнал рівнеміра, пропорційний (при постійному й відомому значенні c) поточному значенню рівня h .

Локація рівня може провадитися знизу й зверху. У другому випадку за часом проходження ультразвукових коливань через газ визначається товщина газової подушки. Локація знизу має переваги, тому що при цьому потрібна менша потужність випромінювача й менше посилення сигналу в приймальній частині рівнеміра.

Звичайно діапазон робочих частот становить 20 – 100 кГц при зондуванні через газ і 0,1 – 2 МГц при зондуванні через рідину.

Недолік локаційних рівнемірів – їхня підвищена чутливість до включень у рідині (мікросуспензій, бульбашок газу). Цей недолік відсутній у двоканальних рівнемірах, що працюють за схемою збігів. У цьому випадку випромінювання ультразвукових коливань здійснюється одночасно двома датчиками. Відбиті сигнали підсилюються й підсумовуються, спрацьовування системи вимірювання часу відбувається тільки від сумарного сигналу. Якщо ж через наявність включень у зоні роботи будь-якого датчика один з відбитих сигналів випереджає інший, система вимірювання часу не спрацьовує й, тим самим, виключається можливість помилкового вимірювання рівня. Інший спосіб усунення впливу неоднорідності рідини й деформації рівня – використання звуководів. У цьому випадку локація рівня провадиться зверху, але не через газ, а через спеціальний рідинний або металевий звуковод. У точці зустрічі звуководу з рідиною відбувається відбиття сигналу, за часом приходу якого до приймача й визначається положення рівня рідини. Такі рівнеміри (зі звуководами) мають порівняно невисоку точність (порядку $\pm 3\%$), але значно розширюються їхні експлуатаційні можливості. Зокрема вони можуть використовуватися для вимірювання рівня низькокиплячих рідин, при високих температурах контрольованих речовин.

Принцип дії дисипативних ультразвукових рівнемірів оснований на явищі розсіювання (поглинання) звукової енергії в речовині. У найпростішому випадку дисипативний рівнемір складається з випромінювача В і приймача П, встановлених на дні й кришці посудини.

Вихідний сигнал U рівнеміра, пропорційний відношенню інтенсивностей звукових хвиль, що випромінюються та реєструються, пов'язаний з поточним значенням рівня залежністю

$$U = e^{-2h(\alpha_2 - \alpha_1)}, \quad (6.6)$$

де α_1 , α_2 – коефіцієнти загасання амплітуди звукової хвилі в рідині й газі, відповідно.

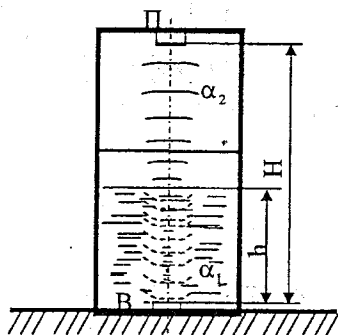


Рисунок 6.8 – Дисипативний ультразвуковий рівнемір

Нелінійність функції перетворення (градувальної характеристики), а також низький ККД, обумовлений відбиттям звукової енергії від границі поділу рідина – газ (наприклад, інтенсивність заломленої ультразвукової хвилі при проходженні через межу вода – повітря становить усього 0,001 від падаючої), перешкоджає промислового освоєнню дисипативних рівнемірів.

Принцип дії резонансних рівнемірів полягає в збудженні коливань стопа газу над рівнем рідини й у фіксації резонансної частоти, при якій спостерігається виникнення стоячої хвилі (рис. 6.9).

Датчик рівнеміра є трубчастим резонатором достатньої для утворення стоячої хвилі довжини L (L повинна бути не менше трьох діаметрів резонатора й забезпечувати необхідний діапазон вимірювання рівня h). Для збудження коливань у резонаторі використовуються магнітоелектричні перетворювачі, M – звичайні стрічкові мікрофони.

Основні недоліки резонансних рівнемірів – складність і громіздкість конструкції (особливо при великих діапазонах вимірювань рівня), а також

істотний вплив на їхні показання змін швидкості з поширення звуку в газовому середовищі.

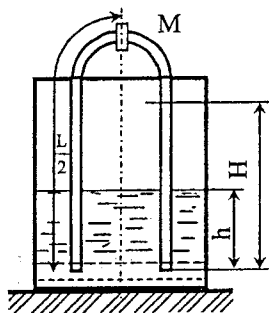


Рисунок 6.9 – Схема резонансного рівнеміра

6.5 Електричні рівнеміри

Принцип дії електричних рівнемірів (рис. 6.10) оснований на розходженні електричних властивостей рідин і газів. При цьому рідини, рівень яких вимірюється, можуть бути як провідниками, так і діелектриками; гази ж, що перебувають у надрідинному просторі, завжди діелектрики. Основним параметром, що визначає електричні властивості провідників, є їхня електропровідність, а діелектриків – відносна діелектрична проникність, що показує, у скільки разів у порівнянні з вакуумом зменшується в даній речовині сила взаємодії між електричними зарядами.

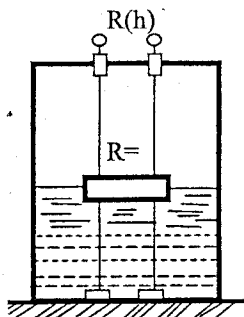


Рисунок 6.10 – Схема електричного рівнеміра

Залежно від того, який вихідний параметр (опір, ємність або індуктивність) первинного перетворювача "реагує" на зміну рівня, електричні рівнеміри підрозділяються на кондуктометричні, ємнісні й індуктивні.

Кондуктометричні рівнеміри (рівнеміри опору) застосовуються для вимірювання рівнів електропровідних рідин (у тому числі і рідких металів).

Первинний перетворювач кондуктометричного рівнеміра являє собою два електроди, глибина занурення яких у рідину й визначає поточне значення її рівня. Вихідним параметром перетворювача є його опір або провідність. При вимірюванні рівня "надпровідних" рідин (наприклад, рідких металів) можливе застосування кондуктометричних рівнемірів з одним електродом, роль другого електрода при цьому виконує заземлена посудина.

Первинний перетворювач ємнісного рівнеміра (рис. 6.11) є коаксіальним циліндричним конденсатором, внутрішньою обкладинкою якого служить металевий зонд 1 покритий ізоляцією 2. Зонд розташований по осі металеві труби 3, що є зовнішньою обкладинкою датчика-конденсатора. Зазор між зовнішньою поверхнею ізоляції зонда й зовнішньою обкладинкою називається робочим зазором, що сполучається через отвори в нижній центрувальній втулці й у зовнішній трубі із посудиною, у якій вимірюється рівень. Рідина, потрапляючи через ці отвори в робочий зазор датчика, змінює його ємність.

Вимірювальна схема (вторинний перетворювач) реєструє різницю ємностей датчика при поточному і нульовому значеннях рівня.

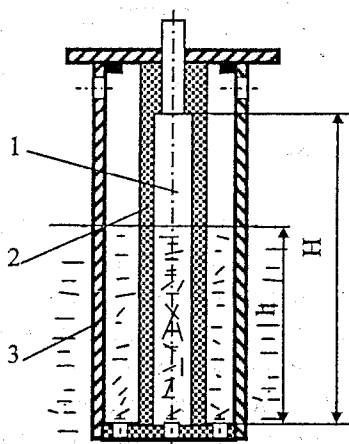


Рисунок 6.11 – Ємнісний рівнемір

Первинний перетворювач індуктивних рівнемірів (рис. 6.12) фактично є котушкою індуктивності. Провідна рідина при цьому відіграє або роль шунта, що змінює число витків котушки, або роль екрана, що впливає на коефіцієнт самоіндукції котушки. У першому випадку використовуються котушки з оголеними витками. При переміщенні рівня рідини, що має високу електропровідність, частина витків шунтується й відповідним чином змінює індуктивність котушки первинного перетворювача – датчика.

Екрануючий ефект провідної рідини полягає у виникненні в ній вихрових струмів (струмів Фуко), електромагнітне поле яких робить розмагнічуючу дію на поле вимірювальної котушки. При цьому датчик виконується у вигляді котушки, поміщеної в захисний чохол. Чохол усуває контакт котушки з контрольною рідиною, забезпечує можливість проведення монтажних–демонтажних робіт без порушення герметичності посудини (що особливо важливо, наприклад, при вимірюванні рівня рідких теплоносіїв у ядерних реакторах).

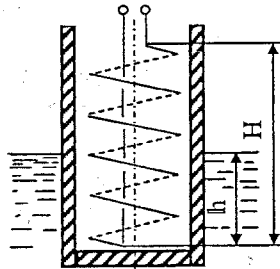


Рисунок 6.12 – Схема індуктивного рівнеміра

6.6 Оптичні рівнеміри

При вимірюванні рівня рідин оптичними методами можуть бути використані різні явища, пов'язані із проходженням світла через середовища, що утворюють поверхню поділу, – відбиття або заломлення світла на поверхні поділу, послаблення його інтенсивності в поглинаючому середовищі й інше. Однак на практиці найбільше поширення одержали оптичні рівнеміри з візуальною фіксацією межі поділу рідина – газ і фотоелектричні рівнеміри, що використовують ефект відбиття світла від поверхні рідини.

Візуальні рівнеміри складаються з прозорих вставок в стінках посудини або із сполучених з посудиною мірних трубок з нанесеною на них шкалою.

Візуальні рівнеміри – найпростіші й у той же час найточніші засоби вимірювання рівня.

Принципова схема фотометричного рівнеміра відбиття показана на рис. 6.13.

Світловий промінь від лампи Л проходить через конденсаторну лінзу К і через вікно вводиться в посудину. Падаючи під кутом i на поверхню рідини, світло відбивається від неї й попадає через оптично прозору стінку на протяжний приймач випромінювання П. Координата приймача y , у якій фіксується максимальна освітленість, характеризує поточне значення рівня.

Аналогічним чином може бути побудований і фотоелектричний рівнемір заломлення.

Найбільш істотний вплив на погрішність оптичних рівнемірів робить стан поверхні рідини. Збурювання поверхні; поява на ній піни, крен посудини спотворюють результати вимірювання рівня. Для усунення (зменшення) цих впливів використовують лазерні джерела світла, волоконні світловоди й різні компенсаційні схеми.

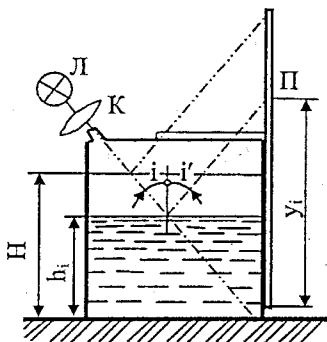


Рисунок 6.13 – Схема фотометричного рівнеміра відбиття

6.7 Теплові рівнеміри

Теплові рівнеміри основані або на використанні розходження температур рідини й парогазової суміші над нею (дилатометричні рівнеміри), або на розходженні їх теплопровідностей (терморезистивні рівнеміри й рівнеміри термо-с.р.с.). Чутливим елементом дилатометричного рівнеміра є стрижень або трубка, омивані рідиною й парогазовою сумішшю.

У результаті теплообміну між чутливим елементом, рідиною й газом (рис. 6.14) чутливий елемент набуває певну температуру, пропорційну те-

мпературам рідини й газу, а також поточному значенню рівня рідини в посудині. Отже, при сталості температур рідини й газу середня температура чутливого елемента буде мірою поточного значення рівня. Про середню температуру чутливого елемента судять або за його відносним подовженням, або за тиском рідини або газу, що заповнює його внутрішню порожнину.

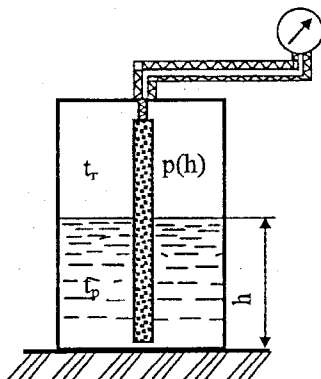


Рисунок 6.14 – Схема теплового рівнеміра

Дилатометричні рівнеміри застосовують при вимірюванні рівня конденсованих рідин, тобто, коли температури рідини й парогазової суміші над нею відносно стабільні й при цьому значно відрізняються між собою.

Незважаючи на простоту й надійність дилатометричні рівнеміри внаслідок малих діапазонів вимірювань (не більше 0,75 м) і невисокої точності не одержали широкого промислового застосування.

Чутливий елемент тензорезистивних рівнемірів (рис. 6.15) є поміщеним у посудину резистором, електричний опір якого визначається його температурою.

Для створення градієнтів температур у рідкій і газовій фазах застосовують прямий і непрямий підігрів резистора. Прямий підігрів здійснюється за рахунок тепла, що виділяється при проходженні через резистор електричного струму, непрямий – за допомогою вмонтованого в датчик підігрівального елемента.

Внаслідок різної інтенсивності теплопередачі від нагрітого тіла до рідини й газу, ділянки резистора, що перебувають у зіткненні з різними фазами, будуть мати різну температуру й, отже, різний електричний опір. За опором резистора в цьому випадку можна судити про поточне значення

рівня, тобто вихідним параметром датчика є опір резистора або, що за умови сталості сили струму $I = \text{const}$, еквівалентно спаданню напруги U_n на резисторі.

Зазвичай чутливий елемент тензорезистивних рівнемірів являє собою вертикально натягнутий тонкий дрід з великим погонним електричним опором, що забезпечує його високу чутливість.

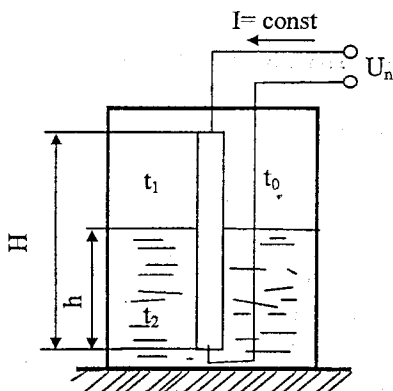


Рисунок 6.15 – Схема тензорезистивного рівнеміра

6.8 Вимірювання рівня сипких тіл

Вимірювання рівня сипких тіл у бункерах і інших пристроях значно відрізняється від вимірювання рівня рідин, тому що характер розташування матеріалу в об'єкті не дозволяє говорити про його рівень як про горизонтальну поверхню. Велика розмаїтість матеріалів, рівень яких необхідно вимірювати в енергетиці й промисловості, потребує застосування різних методів і конструкцій рівнемірів.

Технічні засоби, призначені для вимірювання локалізації рівня сипких тіл, підрозділяють на електромеханічні, електричні, електронні, пневматичні, радіоактивні й вагарні.

Крім того, застосовують також масові рівнеміри, принцип дії яких оснований на зважуванні бункера з пилом. Як вимірювальний перетворювач у них служить гідравлічна месдоза, що є опорою для однієї з лап бункера. Месдоза являє собою сталевий корпус із поршнем, заповнений рідиною. Внутрішня порожнина корпусу сполучається з манометром, що при наван-

таженні бункера на поршень вимірює тиск рідини, пропорційний масі шилу в ньому. Погрішність цього способу вимірювання $\pm 10\%$.

Останнім часом замість месдоз використовують магнітопружні перетворювачі. Вимірювальна схема приладу з таким чутливим елементом побудована у вигляді неврівноваженого моста. Як вторинні прилади служать потенціометри або вольтметри.

7 ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ ТІЛ І СЕРЕДОВИЩ

7.1 Основні поняття та визначення

Вологість газів, твердих тіл і рідких середовищ є одним з важливих показників цілого ряду технологічних процесів у теплоенергетиці, електроенергетиці, металургійній, хімічній, харчовій, будівельній галузях промисловості. Вологість повітря та газів для технічних вимірах може бути охарактеризована такими параметрами:

1) абсолютною вологістю, яка показує кількість водяної пари, що міститься в одиниці об'єму газу, $\text{кг}/\text{м}^3$

$$\rho_n = \frac{m_n}{V}; \quad (7.1)$$

2) вологовмістом – масою водяної пари, віднесеної до маси сухого газу, $\text{г}/\text{кг}$

$$d = \frac{m_n}{m_{nb}}; \quad (7.2)$$

3) температурою точки роси – температурою, при якій газ стає насиченим водяною парою, що міститься в ньому;

4) відносною вологістю, яка є відношенням абсолютної вологості газу до максимально можливої вологості цього газу при даній температурі, %

$$\varphi = \frac{\rho_n}{\rho_{\max}}. \quad (7.3)$$

Вологість твердих і сипучих тіл може бути охарактеризована такими параметрами: 1) вологовмістом – відношенням маси вологи до маси абсолютно сухого тіла; 2) вологістю – відношенням маси вологи до маси вологого тіла. Часто ці величини виражаються у відсотках.

В залежності від цілей і задач конкретного технологічного процесу застосовують ті або інші параметри, що характеризують вологість. Наприклад, при вимірюванні малих вмістів вологи в чистих газах доцільніше користуватися вологовмістом; при транспортуванні газів по трубопроводах необхідно знати температуру точки роси: а дуття в металургійному виробництві краще характеризувати відносною вологістю.

Вологовміст, температура точки роси і відносна вологість для повітря і газів можуть бути визначені за h-d діаграмою вологого повітря (для тиску 100 кПа і невеликих концентрацій пари) або за S-d діаграмою для змінного тиску.

Для вимірювання вологості матеріалів необхідно враховувати форми зв'язку вологи з матеріалом і гігromетричний взаємозв'язок матеріалу і навколишнього повітря. Вологовмісні матеріали можуть бути колоїдними, капілярно-пористими і колоїдними капілярно-пористими тілами. До колоїдного відносяться тіла типу желе, тіста, повидла і т. п., до капілярно-пористих – керамічні матеріали, пісок і т. п. Більшість промислових матеріалів є колоїдними капілярно-пористими тілами. Кількість вологи, що може бути поглинена матеріалом, залежить від форми, розмірів і розташування капілярів, а також від форм зв'язку води з матеріалом. При іонній і молекулярній формах зв'язку води з матеріалом (гідратна вода) її не можна видалити з матеріалу сушінням або віджиманням. Для абсорбційної, осмотичної або фізико-механічної форм зв'язку волога може бути видалена з матеріалу в процесі сушіння. Різні форми зв'язку вологи з матеріалом впливають на його фізичні характеристики по-різному, і встановлення залежності фізичних властивостей матеріалу від вмісту вологи досить важке. Тому і вимірювання вологості твердих і сипучих матеріалів часто викликає утруднення і приводить до неоднозначності градуювальних характеристик.

7.2 Методи вимірювання вологості повітря і газу

В наш час найбільше поширення в технологічних процесах одержали такі методи вимірювання вологості газів і повітря:

– психрометричний;

— гігрометричний;

— температури точки роси.

Психрометричний метод вимірювання вологості оснований на вимірюванні психрометричної різниці температур між «сухим» і «мокрим» термометрами. Мокрий термометр змочується через спеціальний гніт водою. Випаровування, а відповідно й охолодження з поверхні резервуара мокрого термометра тим більше, чим нижча вологість газу. Тому різниця температур сухого і мокрого термометрів залежить від вологості газу.

Метод точки роси базується на визначенні температури, при якій газ стає насиченим вологою, що знаходиться в ньому. Ця температура визначається за початком конденсації водяної пари на дзеркальній поверхні, температура якої повинна встановлюватися будь-якою в інтервалі температур роботи вологоміра.

Гігрометричні методи, основані на залежності фізичних властивостей гігроскопічних матеріалів від вологості навколишнього середовища. До них відносяться:

- гігрометри, що використовують подовження знежиреного людського волосся від вологості повітря;

- електричні гігрометри, які використовують залежність опору або діелектричної проникності гігроскопічного матеріалу від вологості навколишнього повітря.

Інші методи вимірювання вологості газів (повного поглинання, дифузійний, інфрачервоного поглинання, теплопровідності тощо) не знайшли широкого застосування для технологічних процесів.

Розглянемо характерні риси окремих методів.

Психрометричний метод базується на залежності між парціальним тиском пари в парогазовій суміші і показаннями сухого і мокрого термометрів

$$p_{\text{в.м.}} - p = AB(t_c - t_m), \quad (7.4)$$

де p – парціальний тиск пари в парогазовій суміші;

$p_{\text{в.м.}}$ – парціальний тиск насиченої пари для температури суміші t_m ;

B – барометричний тиск;

A – психрометрична стала;

t_c і t_m – температури сухого і мокрого термометрів, відповідно.

Відносна вологість може бути визначена у такий спосіб

$$\varphi = \frac{p}{p_{\text{н.с}}} 100 = \frac{100}{p_{\text{н.с}}} [p_{\text{н.м.}} - AB(t_c - t_m)], \quad (7.5)$$

де $p_{\text{н.с}}$ – парціальний тиск насиченої пари для температури суміші t_c . У зв'язку з тим, що $p_{\text{н.м.}}$ і $p_{\text{н.с}}$ однозначно визначаються за t_c і t_m ; якщо $A = \text{const}$, можна одержати залежність

$$\varphi = f(t_c - t_m, t_c). \quad (7.6)$$

За цією залежністю можна скласти психрометричні таблиці. Ці таблиці можуть бути різними для різних конструкцій мокрого термометра, психрометрична постійна A визначається умовами тепловідведення від термометра через гніт у навколишнє середовище (розмірами і формою резервуара або гільзи термометра, теплопровідністю гільзи і тканини гнота, змочуваністю тканини й інших факторів), тому практично для кожної нової конструкції коефіцієнт A буде відмінним від інших. Для забезпечення сталості A для кожної конструкції забезпечують такий режим обдуву мокрого термометра (як правило, >3 м/с), при якому $A = \text{const}$. Залежність може бути апроксимована рядом прямих $\varphi = \text{const}$ у координатах t_c , t_m (рис. 7.1). Якщо прямі $\varphi = \text{const}$ перетинаються в одній точці з координатами t_a , t_b , можна вважати

$$\varphi = f\left(\frac{t_m - t_a}{t_c - t_b}\right). \quad (7.7)$$

Принципова вимірювальна схема психрометра з термометрами опору подана на рис. 7.2. При відповідному підборі шпич мостів можна вважати, що $U_{ab} = k_1(t_m - t_a)$, $U_{cd} = k_2(t_c - t_b)$, в момент компенсації $U_{ab} = U_{cd} = mU_{cd}$,

де m – відносне положення покажчика реохорда.

Тоді

$$m = \frac{k_1(t_m - t_a)}{k_2(t_c - t_b)}. \quad (7.8)$$

Шкала психрометра градується в процентах відносної вологості. Можливі різні модифікації такої схеми, але, як правило, принцип її дії залишається незмінним.

До переваг психрометричного методу варто віднести достатньо високу точність і чутливість для температур вище 0°C . До недоліків методу відноситься зменшення чутливості і точності для низьких температур, а також похибка, пов'язана із змінністю психрометричної постійної А.

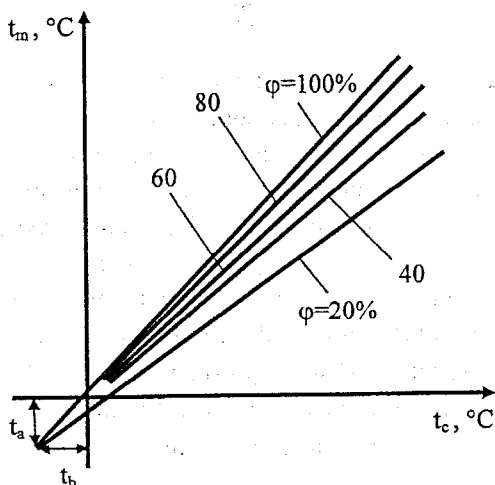


Рисунок 7.1 – Залежність відносної вологості від температур мокрого і сухого термометрів

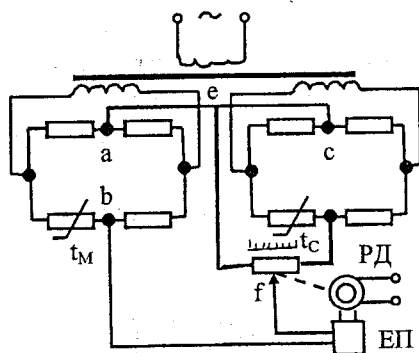


Рисунок 7.2 – Принципова вимірювальна схема психрометра з термометрами опору

7.3 Метод точки роси

За температурою точки роси можна визначити абсолютну вологість або вологовміст, а якщо додатково виміряти температуру газу, то можна визначити і відносну вологість. Цей метод є одним з найбільш точних і дозволяє робити вимірювання вологості за будь-яких тисків газу як для плюсових, так і для мінусових температур. Основним чутливим елементом вологомірів, що базуються на вимірюванні температури точки роси, є дзеркало, яке обдувається аналізованим газом. Це дзеркало повинне охолоджуватися таким чином, щоб на ньому відбувалася конденсація вологи, що знаходиться в аналізованому газі. При цьому повинна фіксуватися температура, при якій починається випадання вологи (роси).

Для технічних вимірювань розроблені автоматичні вологоміри точки роси. Одна зі схем такого вологоміра подана на рис. 7.3. У камеру 1 через патрубок 2 надходить очищений від домішок і пилу аналізований газ постійного тиску, що потім видаляється патрубком 3.

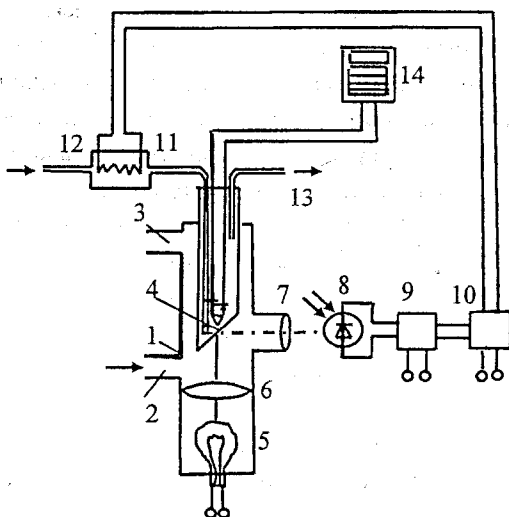


Рисунок 7.3 – Схема автоматичного вологоміра точки роси

Проходячи через камеру 1, газ обмиває дзеркало 4. На дзеркало 4 від лампи 5 через лінзу 6 направляється промінь світла, який відбившись від дзеркала 4, попадає через лінзу 7 на фотоелемент 8. Струм, який виникає у фотоелементі, через підсилювач 9 надходить на регулятор 10, котрий змі-

нос живлення нагрівача 11. Дзеркало 4 охолоджується рідиною, що надходить через патрубок 12 і відходить через патрубок 13. Температура рідини може змінюватися нагрівачем 11. Температура дзеркала вимірюється термоелектричним термометром, підключеним до вимірювального приладу 14. Якщо на дзеркалі немає вологи, то промінь світла від нього практично без втрат надходить на фотоелемент. У цьому випадку регулятор зменшує нагрівання охолодної рідини, температура якої зменшується доти, поки на дзеркалі не випадає роса. У цьому випадку на фотоелемент буде надходити ослаблений світловий потік (падаючи на дзеркало, покрите плівкою роси, світло буде розсіюватися) і регулятор буде збільшувати нагрівання охолодної рідини.

Таким чином, температура дзеркала буде підтримуватися близькою до температури точки роси. Числове значення цієї температури фіксується приладом 14. Крім розглянутої вище можливі інші варіанти схеми, але принцип роботи один – створюються умови для випадання роси (початку конденсації) і визначається температура, при якій це відбувається. При практичній реалізації методу точки роси існують певні труднощі. По-перше, фіксація самого моменту початку конденсації («випадання роси») залежить від методу фіксації (оптичний, кондуктометричний тощо). По-друге, температура точки роси може залежати від стану поверхні, на якій відбувається конденсація. Наприклад, наявність жиру або нафтопродуктів на поверхні конденсації істотно знижує температуру точки роси. По-третє, при вимірі вологості агресивних газів температури точки роси можуть істотно відрізнятись від розрахункових. Крім того, агресивні гази можуть викликати корозію поверхні, на якій відбувається конденсація.

В гігрометричних вологомірах чутливий елемент повинен знаходитися в гігрометричній рівновазі з вимірюваним газом. У практиці технічних вимірювань одержали поширення такі різновиди гігрометричних перетворювачів: електролітичні, електролітичні з підігрівом і сорбційні. В електролітичних гігрометрах вимірювальний перетворювач має вологочутливий елемент, що містить електроліт. Зміна вологості газу викликає зміну кількості вологи, яка міститься у вологочутливому елементі, що приводить до зміни концентрації електроліту у вологочутливому елементі і відповідній зміні його опору або електропровідності. Як електроліт найчастіше застосовують хлористий літій. Вимірювальні схеми електролітичних гігрометрів являють собою різні варіанти мостових вимірювальних схем. До недоліків електролітичних гігрометрів можна віднести нестабільність їх гра-

дувальних характеристик, а також вплив температури і концентрації розчиненої речовини на їхні показання.

Електролітичні перетворювачі з підігрівом за своєю будовою близькі до електролітичних перетворювачів. Однак принцип дії їх відрізняється від електролітичних, Зміна електропровідності перетворювача внаслідок зміни вологості газу викликає зміну температури перетворювача. Якщо вологість газу збільшується, то електропровідність перетворювача збільшується, що призводить до зростання струму, збільшенню температури перетворювача і випаровування вологи з перетворювача. Це у свою чергу призводить до зменшення електропровідності, струму через перетворювач і температури перетворювача. Таким чином, автоматично підтримується режим, що відповідає рівноважному станові між парціальним тиском водяної пари в аналізованому газі і парціальним тиском водяної пари над насиченим розчином електроліту. Температура, що відповідає цій рівновазі, вимірюється будь-яким термометром. Електролітичні гігromетри з підігрівом відносно прості і надійні. Їхні характеристики практично не залежать від запилення або забруднення, швидкості вимірюваного газу, його тиску і напруги живлення.

У сорбційних гігromетрах використовується зміна фізичних властивостей сорбційних матеріалів (кераміки, мікропористих матеріалів, окису алюмінію тощо) від вмісту в них вологи, що визначається вологістю газу. Як правило, зі зміною вологовмісту змінюється або електричний опір, або ємність, або тангенс діелектричних втрат, або будь-який інший параметр вимірювального перетворювача. Вимірювальна схема приладу визначається вихідним сигналом вимірювального перетворювача. Прилади цього типу відрізняються індивідуальними градувальними характеристиками, тому широко їх застосовувати в промислових умовах важко.

7.4 Методи вимірювання вологості твердих і сипучих тіл

Методи вимірювання вологості твердих і сипучих тіл умовно можна розділити на дві групи:

- 1) прямі методи, що дозволяють визначати масу вологи або сухої речовини в пробі;
- 2) непрямі методи, що визначають вологість за параметром, функціонально зв'язаним з вологістю.

Прямі методи відрізняються високою точністю, але дуже довготривалі (до 10 – 15 ч).

Непрямі методи характеризуються високою швидкістю і значно меншою точністю вимірювань.

У технічних вимірюваннях застосовуються майже винятково непрямі методи. З непрямих методів найбільше поширення одержали електричні методи вимірювання вологості, такі як кондуктометричний, ємнісний і деякі інші. Як відзначалося вище, більшість промислових матеріалів є капілярно-пористими тілами. У сухому вигляді ці матеріали є діелектриками з питомим опором 10^8 Ом-м і вище. При зволоженні капілярно-пористі тіла можуть стати провідниками з питомим опором 10^4 Ом-м. Залежність електричного опору від вологості для капілярно-пористих тіл (рис. 7.4).

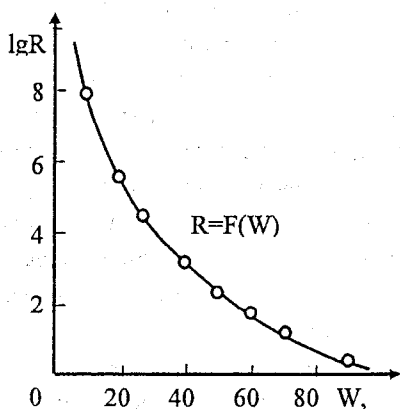


Рисунок 7.4 – Залежність електричного опору капілярно-пористих тіл від вологості

$$R = c/w^n, \quad (7.8, a)$$

де c – постійна;

w – вологість матеріалу;

n – показник степеня.

Постійна c , і показник степеня n визначаються для кожного матеріалу експериментально. Статична залежність опору від вологості матеріалу забезпечує високу чутливість кондуктометричного методу. Однак його застосування обмежене великим числом величин, що впливають на результати вимірювань, таких як температура, структура матеріалу, щільність насипки, хімічний склад, наявність електролітів, тому цей метод використовують практично тільки в лабораторних умовах.

Ємнісний метод базується на тому, що зміна вологості капілярно-пористих тіл призводить до істотної зміни їхньої діелектричної проникності. У сухих тіл діелектрична проникність $\epsilon = 1+6$, а у води $\epsilon = 81$. Зміну діелектричної проникності внаслідок зміни вологості матеріалу визначають, як правило, за зміною ємності конденсатора, між обкладинками якого міститься аналізований матеріал. Перетворювач ємнісного вологоміра виконують у вигляді двох плоских пластин або двох концентричних циліндрів, простір між якими заповнюється аналізованим матеріалом, шляхом засипання при падінні матеріалу з певної висоти. У цьому випадку забезпечується гарна відтворюваність результатів вимірювання. Ємність конденсатора певних геометричних розмірів може бути виражена формулою

$$C = k \cdot \epsilon, \quad (7.9)$$

де ϵ – діелектрична проникність матеріалу, зумовлена його вологістю;
 k – постійна, зумовлена геометричними розмірами і формою конденсатора.

Включення ємнісного перетворювача у високочастотний коливальний контур дозволяє використовувати резонансні схеми лампових або напівпровідникових приладів для вимірювання ємності перетворювача, а за ним і вологості матеріалу. Ємнісні перетворювачі малочутливі до складу матеріалу, його структури і контактного опору між електродами і матеріалом. Оскільки для більшості матеріалів діелектрична проникність залежить від температури, у промислових приладах передбачається автоматичне введення поправки на зміну температури. Похибка ємнісних вологомірів може складати 0,2–0,5%. Однак методика відбору проби (заповнення матеріалом простору між обкладинками конденсатора) може впливати на результати вимірювання. Наприклад, навіть зміна розмірів частинок (шматочків) аналізованого матеріалу істотно впливає на показання вологоміра. У зв'язку з цим застосування вологомірів твердих і сипучих тіл у технічних вимірах використовується рідко.

8.1 Класифікація газоаналізаторів

Засоби вимірювання, які застосовуються для аналізу складу газів, називаються газоаналізаторами. На основі безперервного автоматичного контролю складу газів здійснюється автоматизоване керування хіміко-технологічними процесами, пов'язаними з одержанням і використанням газів у металургії, коксохімічному виробництві, нафтопереробці, газовій промисловості. При спалюванні органічних палив на теплових електричних станціях автоматичні газоаналізатори використовуються для контролю за процесом горіння і визначення необхідного надлишку повітря. Не менш важливі функції покладені на прилади газового аналізу, що працюють у системах, які забезпечують безпечне функціонування технологічних об'єктів. До числа таких приладів відносяться газоаналізатори, що вимірюють концентрацію водню в системі охолодження турбогенераторів, у газодувках апаратів з радіоактивним теплоносієм на АЕС тощо.

В останні роки в зв'язку з посиленням уваги до охорони навколишнього середовища різко розширилося виробництво і використання газоаналізаторів, призначених для контролю вмісту шкідливих домішок у газових викидах промислових підприємств і електричних станцій, у повітрі виробничих приміщень і атмосфері. Так, відповідно до ДСП-201-97 "Державні санітарні правила охорони атмосферного повітря населених місць" для контролю за якістю повітря населених пунктів здійснюється періодичне вимірювання концентрації таких основних забруднюючих речовин, як сірчистий газ, окис вуглецю, двоокис азоту, пил тощо.

Для вимірювання концентрації одного з компонентів газової суміші використовується деяка фізико-хімічна властивість цього газу, що відрізняється від властивостей інших газів. Чим більша ця відмінність і чим вона специфічніша, тим вищою буде чутливість методу і простіше здійснюється підготовка проби газу. Розмаїтість використовуваних у газоаналізаторах методів вимірювання зумовлена кількістю аналізованих компонентів газових сумішей і широким діапазоном зміни їхніх концентрацій.

Переважає більшість промислових автоматичних газоаналізаторів призначена для вимірювання концентрації одного компонента в суміші газів. У цьому випадку суміш газів розглядається як бінарна, у якій зумовлений компонент впливає на вимірювану фізико-хімічну властивість суміші, а

інші компоненти, незалежно від їхнього складу і концентрації, не впливають і вважаються другим компонентом суміші.

Існують газоаналізатори, призначені для аналізу різних складових багатокомпонентних газових сумішей, у більшості випадків ці прилади використовуються в лабораторній практиці. Газоаналізатори градууються у відсотках за об'ємом, г/м^3 , мг/л . Перша одиниця вимірювання є більш зручною, оскільки процентний вміст компонентів газової суміші зберігається при зміні температури і тиску. Відтворення одиниць вимірювання концентрації компонентів газових сумішей проводиться за допомогою атестованих еталонних газових сумішей.

Існуюча класифікація газоаналізаторів ґрунтується на фізико-хімічних властивостях, покладених в основу вимірювання концентрації компонентів суміші, які визначаються в конкретному випадку, і включає такі основні групи приладів: механічні, теплові, магнітні, оптичні, хроматографічні, електричні і мас-спектрометричні. Шість перших груп приладів є найбільш розповсюдженими.

Газоаналізатори, на відміну від засобів вимірювання температури чи тиску, є установкою, що містить, крім вимірювального перетворювача, (приймача) ряд пристроїв, які забезпечують відбір, підготовку і транспортування проби газу через прилад. Для газоаналізаторів характерна наявність двох груп приладів. У першу входять вимірювальні прилади, у другу — індикатори, сигналізатори, детектори витоку газів. Прилади другої групи часто є переносними, більш простими за конструкцією і мають менше число допоміжних пристроїв.

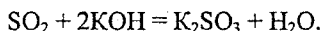
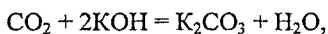
8.2 Об'ємні хімічні газоаналізатори

У механічних газоаналізаторах вимір компонентів, вміст яких необхідно виміряти, проводиться на підставі зміни механічних параметрів стану або відповідних властивостей газової суміші. До числа вимірюваних величин у цих приладах відносяться зміни об'єму або тиску проби газової суміші, її в'язкості, щільності, швидкості поширення звуку.

Найбільш розповсюдженими приладами цього типу є об'ємні (волюметричні) газоаналізатори (рис. 8.1). У них про вміст даного компонента судять за зміною об'єму газової суміші в результаті селективного поглинання, каталітичного окислювання або спалювання зумовленого компонента. Оскільки для селективного видалення зумовлених компонентів використо-

вуються хімічні реакції, прилади часто називають об'ємними хімічними газоаналізаторами, що відносяться до приладів періодичної дії. З їхньою допомогою можна зробити вимірювання концентрації в суміші газів таких компонентів: двоокису вуглецю із сірководнем і двоокисом сірки (сума кислих парів і газів), кисню, окису вуглецю, водню, ненасичених і насичених вуглеводнів, азоту.

При визначенні вмісту CO_2 , і SO_2 використовується розчин лугу, при цьому протікають такі реакції



Для поглинання водню й окису вуглецю використовується лужний розчин напівхлористої міді. Кисень поглинається лужним розчином пірогалолу, а ненасичені вуглеводні – бромною водою. Водень і насичені вуглеводні можуть видалятися із суміші спалованням, а окис вуглецю – каталітичним окислюванням. Похибка такого методу значною мірою визначається похибкою вимірювання зміни об'єму, у зв'язку з чим початковий і залишковий об'єми проби газу повинні мати однакові температуру і тиск. Переважна більшість газоаналізаторів, що працюють на цьому принципі вимірювання, відносяться до лабораторних приладів, у яких відбір проби й інші операції виконуються вручну.

Принцип дії об'ємних хімічних газоаналізаторів розглянемо на прикладі газоаналізатора ГХП-2 (рис. 8.1), призначеного для вимірювання двох компонентів газової суміші: CO_2 й O_2 . Прилад містить вимірювальну бюретку 1, з'єднану з гребінкою 2; до якої підключені дві поглинальних посудини 3, 4. Посудина 3 заповнена розчином їдкого калію і призначена для поглинання CO_2 , посудина 4 містить лужний розчин пірогалолу для поглинання O_2 . Оскільки останній розчин поглинає CO_2 , при проведенні аналізу спочатку визначають вміст CO_2 , а потім кисню. Всередині мірної бюретки знаходиться сполучена з атмосферою трубка 5, що використовується для контролю тиску проби газу після поглинання даного компонента.

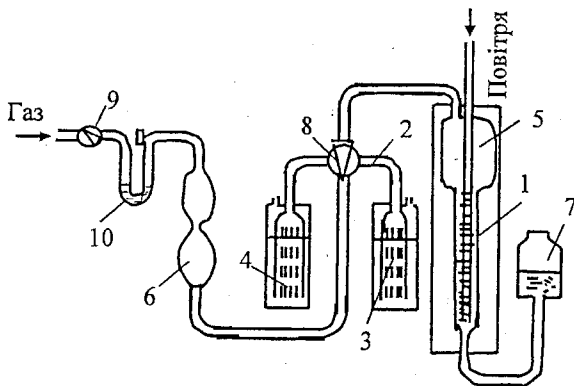


Рисунок – 8.1 Схема газоаналізатора ГХІІ-2

Мірна бюретка термостатована. Відбір проби газу і прокачування його через прилад здійснюються гумовою грушею 6. При прокачуванні газу кран 8 знаходиться в положенні, показаному на рисунку, напірна посудина 7 із замикальною рідиною опущена і газ через трубку 5 виштовхується в атмосферу. При підйомі напірної посудини 7 замикальна рідина при досягненні кінця трубки 5 відрізає від атмосфери пробу газу об'ємом 50 см^3 . У двох інших положеннях крана 8 проба газу в мірній бюретці 1 сполучається із посудинами 3 і 4. Фільтр 10 служить для очищення газу. Як запірна використовується рідина, що не поглинає компоненти аналізованої газової суміші; часто застосовуються насичені розчини кухонної солі або хлористого кальцію.

Для проведення аналізу здійснюється така послідовність операцій. При відкритому крані 9, зазначеному положенні триходового крана 8 і опущеній напірній посудині 7 грушею 6 кілька разів забирається аналізований газ і прокачується через мірну бюретку в атмосферу. Потім при закритому крані 9 піднімається напірна посудина 7 і замикальна рідина відтинає від атмосфери пробу газу. Кран 8 переводиться в праве положення, при якому аналізована проба витісняється при підйомі напірної посудини 7 рідиною з мірної бюретки в посудину 8. Для покращення контакту газу з поглинальними рідинами посудини заповнені скляними трубками. Для повного поглинання CO_2 здійснюється чотири-п'ять прокачувань шляхом підняття й опускання напірної посудини 7.

Для вимірювання залишкового об'єму газу із посудини 3 повертають пробу в мірну бюретку, плавно опускаючи напірну посудину 7. Об'єм газу

фіксується в момент збігу рівня в мірній бюретці і внутрішній трубці 5. При збігу цих рівнів тиск проби газу дорівнює атмосферному. Нижня звужена частина мірної бюретки градується безпосередньо у відсотках вмісту зумовленого компонента. Після фіксації вмісту CO_2 в пробі кран 8 переводиться в ліве положення і замикальною рідиною частина проби газу, що залишилася, витісняється в посудину 4. Для визначення вмісту O_2 далі послідовно проводяться ті ж операції, що при вимірюванні вмісту CO_2 . Про процентний вміст O_2 судять за зміною об'єму проби газу, що залишилася. У процесі вимірювань не можна допускати зниження рівня замикальної рідини нижче кінця трубки 5, тому що при цьому відбувається або підсмоктування повітря, або виштовхування частини проби в атмосферу. Якщо це спостерігалось під час аналізу, то дослід необхідно повторити. Тривалість вимірювання концентрації двох компонентів складає 5 – 8 хв.

Ціна поділки мірної бюретки приладу ГХП-2 складає 0,1 мл. При межовій похибці вимірювань об'єму $\pm 0,1$ мл похибка в оцінці залишкового об'єму проби складає $\pm 0,2\%$. Невисока точність оцінки зміни об'єму не дозволяє використовувати ці газоаналізатори для вимірювання малих концентрацій.

Більш широкі можливості має газоаналізатор ВТІ, призначений для загального аналізу природних і промислових газів. Останнім часом для проведення аналізу складу газів частіше використовуються об'ємні газоаналізатори закордонного виробництва, які мають різноманітні конструкції, хоча принцип їхньої дії такий самий.

До числа переваг об'ємного методу вимірювання концентрацій газів відносяться: можливість вимірювання широкого кола компонентів газових сумішей шляхом підбору відповідних поглиначів або хімічних реакцій зв'язування; можливість аналізу багатокомпонентних газових сумішей; простота пристрою. Недоліками методу є низька точність аналізу (не вище 0,1– 0,2% загального об'єму проби); періодичність дії; необхідність частой заміни реактивів; складність створення на цьому принципі автоматичних приладів; громіздкість приладу через велике число скляних деталей.

8.3 Теплові газоаналізатори

У теплових газоаналізаторах вимірювання концентрації заданого компонента проводиться шляхом вимірювання теплових властивостей газової

суміші, що залежать від концентрації компонента, вміст якого потрібно визначити.

Найбільш розповсюдженими приладами цього типу є газоаналізатори, робота яких базується на вимірюванні теплопровідності суміші (термокондуктометричні) і теплоти, що виділяється при реакції каталітичного окислювання заданого компонента (термохімічні). Представники цих груп приладів, як правило, є автоматичними пристроями, що працюють у складі інформаційно-вимірювальних і керуючих систем. Теплові газоаналізатори призначені, як правило, для безперервного аналізу складу бінарних сумішей.

8.4 Термокондуктометричні газоаналізатори

У таблиці 8.1 показані теплопровідності різних газів для температур 100 і 500 °С, віднесені до теплопровідності повітря. Аналіз даних, показаних у таблиці, показує, що при температурі 100 °С теплопровідність таких газів, як Н₂, СО₂, SO₂, СН₄, Ar, He, відрізняється від теплопровідності повітря.

З ростом температури теплопровідність газів зростає по-різному (табл. 8.1), у зв'язку з чим при температурі 500 °С відносна теплопровідність N₂, H₂, O₂, CO, Ar, He практично не змінюється, тоді як у СО₂ теплопровідність стає близька до одиниці, а в СН₄ зростає від 1,45 до 2,13. Характер впливу температури на відносний коефіцієнт теплопровідності газів враховується при виборі температурних режимів роботи чутливих елементів газоаналізаторів.

Таблиця 8.1 – Відносні теплопровідності газів для температур 100 і 500 °С

Газ	100 °С	500 °С	Газ	100 °С	500 °С
Повітря	1	1	Двоокис сірки	0,38	0,53
Азот	0,98	0,97	Кисень	1,02	1,07
Водень	6,84	6,77	Аргон	0,66	0,66
Двоокис вуглецю	0,71	0,96	Гелій	5,56	5,32
Окис вуглецю	0,94	0,93	Пари води	0,78	1,16
Метан	1,45	2,13			

Використання даного принципу вимірювання базується на тому, що між теплопровідністю газової суміші λ , теплопровідністю λ_1 і концентрацією c_i n компонентів, що входять у її склад, існує близька до лінійної залежність.

Для вимірювання теплопровідності газової суміші використовується провідник, що нагрівається струмом, поміщений у камеру, заповнену аналізованою сумішшю. Якщо тепловіддача від провідника до стінок камери в основному здійснюється в результаті теплопровідності, то має місце така залежність

$$Q = 2\pi l \lambda (t_n - t_c) / (D/d), \quad (8.1)$$

де Q – кількість теплоти, що віддається провідником у секунду;

l, d – довжина і діаметр провідника, відповідно;

D – діаметр камери;

λ – теплопровідність суміші газів;

t_n і t_c – температури провідника і стінок камери, відповідно.

Якщо теплота Q , що віддається провідником, і температура стінок камери t_c є сталими, а це залежить від температури навколишнього середовища, теплопровідність газової суміші буде однозначно визначати температуру провідника, а отже, і його опір. Як провідник використовується дріт з металу, що має високий температурний коефіцієнт електричного опору і хімічно стійкий, найчастіше застосовують платину, рідше вольфрам, нікель, тантал.

Схема двох типів робочих чутливих елементів із платинового дроту подана на рис. 8.2. У скляному корпусі 1 до платинових струмопідводів 2 діаметром 0,15 мм підпаяна відкрита платинова спіраль 3 діаметром 0,02 мм (рис. 8.2, а) або зашклена 4 з діаметром 0,02 мм (рис. 8.2, б).

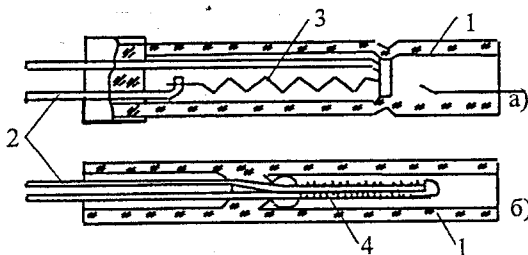


Рисунок 8.2 – Будова робочих чутливих елементів з відкритою (а) і зашкленою (б) платиновою спіраллю

У першому випадку опір чутливого елемента складає 10 Ом, у другому 40 Ом. Чутливий елемент другого типу захищений від агресивних впливів середовища, але йому властива велика інерційність.

Вимірювальна мостова схема газоаналізатора подана на рис. 8.3.

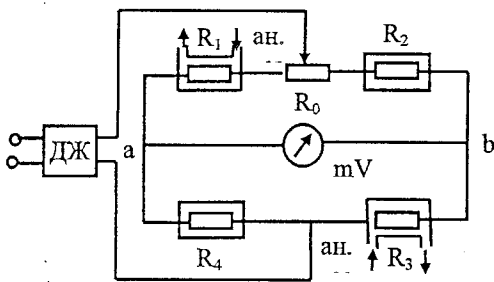


Рисунок 8.3 – Вимірювальна мостова схема газоаналізатора

Для забезпечення максимальної чутливості стосовно теплопровідності газів CO_2 , H_2 , а також зниження впливу тепловіддачі за рахунок випромінювання температура платинової спіралі встановлюється 80 – 100 °С. З метою зменшення впливу конвективного теплообміну газ до чутливого елемента подається внаслідок дифузійного обміну, що збільшує інерційність теплових газоаналізаторів.

8.5 Магнітні газоаналізатори

У магнітних газоаналізаторах, що використовуються для аналізу бінарних сумішей, концентрація зумовленого компонента вимірюється за зміною магнітних властивостей газової суміші. Гази за їхньою магнітною сприйнятливістю поділяються на парамагнітні, що втягуються в магнітне поле, і діамагнітні, що виштовхуються з нього. Найбільшу магнітну сприйнятливість має кисень, який відноситься до парамагнітних газів. У таблиці 8.2 показані значення відносної об'ємної магнітної сприйнятливості для газів, причому знак мінус відноситься до діамагнітних газів.

Зіставлення даних таблиці 8.2, показує, що гази, крім кисню, окису і двоокису азоту, є практично немагнітними, оскільки їхня об'ємна магнітна сприйнятливість на два порядки нижча, ніж у кисню. Таким чином, магнітні властивості газової суміші визначаються концентрацією кисню, оскільки

ки NO і NO₂, що є продуктами високотемпературних окисних реакцій, зустрічаються рідко й у малих концентраціях.

Таблиця 8.2 – Відносна об'ємна магнітна сприйнятливість газів

Газ	Відносна об'ємна магнітна сприйнятливість	Газ	Відносна об'ємна магнітна сприйнятливість
Кисень O ₂	1	Водень H ₂	-0,0011
Повітря (21 % O ₂)	0,211	Азот N ₂	-0,004
Окис азоту NO	0,363	Двоокис вуглецю CO ₂	-0,0057
Двоокис азоту NO ₂	0,0616	Аміак NH ₃	-0,0057
Метан CH ₄	-0,0123	Водяні пари H ₂ O	-0,004

Існує кілька методів вимірювання магнітної сприйнятливості суміші газів, найбільш розповсюджений з них пов'язаний з використанням явища термомагнітної конвекції. Остання є рухом кисневмісного газу в неоднорідному магнітному і тепловому полях. Основані на цьому ефекті газоаналізатори, що випускалися в СРСР і зараз випускаються за кордоном, виконуються за одномостовою або двомостовою вимірювальними схемами.

8.6 Оптичні газоаналізатори

В оптичних газоаналізаторах концентрація заданого компонента вимірюється за зміною оптичних властивостей газової суміші, до числа яких відносяться показники переломлення, спектрального поглинання і випромінювання, спектральна щільність і т. д. Найбільш розповсюдженими є три групи оптичних газоаналізаторів:

- 1) інфрачервоного та ультрафіолетового поглинання;
- 2) спектрофотометричні;
- 3) фотокалориметричні.

Оптичні газоаналізатори застосовуються для аналізу мікроконцентрацій вибухонебезпечних і токсичних домішок у промислових газах, для контролю повітря в атмосфері і виробничих приміщеннях.

8.7 Хроматографічні газоаналізатори

Хроматографічні газоаналізатори призначені для аналізу багатокомпонентних газових сумішей. В останні роки ці прилади стали застосовуватися для аналізу складу рідин і твердих тіл. Хроматографи є приладами періодичної дії, більш складними будовою, ніж розглянуті вище газоаналізатори.

Процес вимірювання в цих приладах поділяється на дві стадії: хроматографічний поділ газової суміші на окремі компоненти й ідентифікація (детектування) компонентів, що включає якісний і кількісний їхній аналіз. Хроматографічний поділ суміші на окремі компоненти, відкритий в 1903 р. М. С. Цветом, здійснюється за рахунок різної швидкості руху газів вздовж шару сорбенту, що зумовлена характером зовнішніх і внутрішніх міжмолекулярних взаємодій. В наш час за можливостями розділення й аналізу багатокомпонентних сумішей хроматографія не має конкуруючих методів. Хроматографію можна використовувати для аналізу низькокиплячих газів, сумішей легких і термічно стійких твердих і рідких речовин, температура кипіння яких досягає 500 °С і вище. До числа переваг цього методу відноситься також висока чутливість (що досягає при використанні іонізаційних детекторів 10^{-8} – 10^{-9} мг/мл) у сполученні з малим об'ємом проби, що відбирається, порівняно високою точністю і малим часом аналізу.

Принципова схема хроматографа і способу поділу суміші газів у колонці подана на рис. 8.4, а, б. З балона 1 газ-носії надходить у хроматограф. Для підтримки постійної швидкості в процесі його роботи використовується регулятор 2, що містить редуктор, манометр і вимірник витрати газу.

У газ-носії дозатором 3 періодично вводиться проба аналізованого газу. У роздільній колонці 4, заповненій твердим або рідким сорбентом, аналізована суміш розділяється на компоненти. Уздовж шару сорбенту з більшою швидкістю рухаються гази, які найменше поглинаються сорбентом. Тому в пробі суміші газів (рис. 8.4, (5), що містить три компоненти А, В і С, першим виноситься газ А, який найменш сорбується, а останнім – газ С, який сорбується найкраще.

Після поділу кожен компонент із газом-носієм утворить бінарну суміш, аналіз якої може бути зроблений різними методами, у тому числі розглянутими вище і реалізованими в детекторі 6. Оскільки в процесі вимірювання властивості газу-носія можуть змінюватися, при пропусненні останнього через детектор фіксуються зміни його властивостей, викликані присутністю компонента аналізованої суміші.

1) параметри, що характеризують роботу розподільної колонки; геометрія колонки (довжина, діаметр, форма), матеріал колонки, природа сорбенту, його пористість, зернистість, характер набивання, товщина рідкої плівки, температурний режим колонки;

2) параметри, пов'язані з газом-носієм: природа і наявність домішок, швидкість і тиск;

3) параметри, пов'язані з роботою дозатора: об'єм проби, його стабільність, спосіб введення проби;

4) параметри, пов'язані з роботою детектора: чутливість, інерційність, лінійність градуовальної характеристики, стабільність;

5) параметри, зумовлені способом реєстрації вихідного сигналу детектора і методом обробки хроматограми: похибка, інерційність, чутливість вторинного приладу, швидкість руху діаграмного паперу, похибка розрахунку якісних і кількісних показників хроматографічного поділу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Блинов О. М. Теплотехнические измерения и приборы / Блинов О. М., Беленький А. М., Бердышев В. Ф. – М. : Metallurgy, 1993. – 145 с.
2. Иванова Г. М. Теплотехнические измерения и приборы / Г. М. Иванова, Н. Д. Кузнецов. – М. : Высшая школа, 1984. – 245 с.
3. Головченко О. М. Теплотехнічні вимірювання та метрологія. Лабораторний практикум / Головченко О. М., Співак О. Ю., Грумінська Л. В. – Вінниця : ВНТУ, 2006. – 91 с.
4. Мури́н Г. А. Теплотехнические измерения / Мури́н Г. А. – М. : Энергия, 1979. – 424 с.
5. Преображенский В. П. Теплотехнические измерения и приборы / Преображенский В. П. – М. : Энергия, 1978. – 704 с.
6. Григорьев В. А. Тепло – и массообмен. Теплотехнический эксперимент. Справочник. / В. А. Григорьев, В. М. Зорин. – М. : Энергоиздат, 1982. – 512 с.
7. Нубарян С. М. Контрольно–измерительные приборы в теплотехнических измерениях. / Нубарян С. М. – Харьков : ХНАГХ, 2006. – 283 с.
8. Рыжков С. В. Теплотехнические измерения в судовых энергетических установках / Рыжков С. В. – Л. : Судостроение, 1980. – 264 с.

ГЛОСАРІЙ

абсолютна похибка	absolute error
актинометр	actinometer
безнульова	no zero
буй	beacon
вигинається	bending
вимірювання	measurement
витрата	consumption
вихороутворення	formation of vortex
відновлювальний	renewable
відносна похибка	relative error
відхилення	deviation
впливаючих	influencing
вторинний потік	secondary flow
газозбірники	gas collections
гофровані	corrugated
дилатометричні	dilatometric
довірча імовірність	confidence probability
довірчий інтервал	confidence interval
евтектичні сплави	eutectic alloys
електровимірювальний	electrical measuring
ентропія	entropy
зазор	clearance
залишковий	residual
засіб вимірювання	measuring device
звуження	narrowing
зчитування	reading
клас точності	accuracy class
колба	bulb
комірки	nucleus
конденсатозбірник	condensate collection
лічильники	counters
лобова частина	frontal part
мембранні коробки	membrane boxes
метод вимірювання	method of measuring

нагрітість	heated
надійність	reliability
номенклатура	range
однорідний	homogeneous
паличковий	stick
пірометри	pyrometers
повірка	verification
показчик	designator
потоківипрямляч	stream rectifier
принцип вимірювання	principle of measurement
психрометри	psychrometers
резервуар	container
реперні точки	fixed point
рівень	pitch
роботоспроможність	ability to work
робоча рідина	working fluid
розмірність	dimension
ротаметри	VA meters
сильфони	bellows
система одиниць	system of units
слабоокислювальний	poor oxidizing
сопла	nozzle
спільні вимірювання	common measurement
спостерігача	beholder
сукупні вимірювання	total measurement
сукупність	totality
тахометричні	tachometric
температурна шкала	temperature scale
теплоємність	heat capacity
термо-е.р.с.	thermoelectric power
точність	precision
турбіна	turbine
турмалін	tourmaline
чутливість	sensitivity
шукане значення	value required it

Навчальне видання

Співак Олександр Юрійович

**ТЕПЛОТЕХНІЧНІ ВИМІРЮВАННЯ
ТА ПРИЛАДИ**

Навчальний посібник

Редактор В. Дружиніна

Оригінал-макет підготовлено О. Співаком

Підписано до друку 11.04.2016 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 9,2.
Наклад 75 пр. Зам. № 2016-043.

Вінницький національний технічний університет,
навчально-методичний відділ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, к. 2201.
Тел. (0432) 59-87-36.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-87-38.
publish.vntu.edu.ua; email: kivc.vntu@gmail.com.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.