

Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет

А. Ф. КУРИЛОВ, В. М. КОЗИН

ТЕПЛОТЕХНІЧНІ ВИМІРЮВАННЯ І ПРИЛАДИ

Навчальний посібник

Рекомендовано вченою радою Сумського державного університету



Суми
Сумський державний університет

2015

УДК 621.18.08(075.8)

ББК 31.32-5я73

К 93

Рецензенти:

О. Р. Якуба – доктор технічних наук, професор кафедри інженерних технологій харчових виробництв Сумського національного аграрного університету;

В. І. Склабінський – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри процесів і обладнання хімічних та нафтопереробних виробництв Сумського державного університету

*Рекомендовано до видання вченою радою
Сумського державного університету як навчальний посібник
(протокол № 3 від 12 листопада 2015 року)*

Курилов А. Ф.

К 93 Теплотехнічні вимірювання і прилади : навч. посіб. / А. Ф. Курилов, В. М. Козін. – Суми : Сумський державний університет, 2015. – 189 с.
ISBN 978-966-657-589-3

Навчальний посібник умовно складається з двох розділів, присвячених відповідно основам вимірювань, їх похибок та приладам для вимірювання теплотехнічних величин. Такий поділ дозволяє читачеві вивчити саме ту проблему, яка його цікавить: теорію вимірювань або принципи та прилади вимірювань.

У навчальному посібнику розглянуто теоретичні основи вимірювань із характерними класифікаціями вимірювань та їх засобів. Особлива увага у посібнику приділяється основам розрахунку похибок із їх класифікацією, розглянуто шляхи їх виникнення та методи зменшення.

Посібник може бути корисним для студентів енергетичних спеціальностей, а також для усіх, кого цікавлять методи вимірювання фізичних величин, визначення та зменшення похибок вимірювань, а також принципи дії та конструкції основних засобів вимірювання теплотехнічних параметрів.

УДК 621.18.08(075.8)

ББК 31.32-5я73

ISBN 978-966-657-589-3

© Курилов А. Ф., Козін В. М., 2015
© Сумський державний університет, 2015

ЗМІСТ

	С.
ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ І ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИМІРЮВАНЬ ТА ЇХ ПОХИБКИ.....	8
1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ВИМІРЮВАННЯ.....	8
1.1 Основні характеристики вимірювань.....	8
1.2 Класифікація вимірювань.....	10
1.3 Методи вимірювань.....	12
1.4 Похибки вимірювань.....	12
2 ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЗАСОБИ ВИМІРЮВАНЬ.....	17
2.1 Класифікація засобів вимірювань за видом, принципом дії і метрологічним призначенням.....	17
2.2 Структурні схеми вимірювальних пристроїв.....	18
2.3 Статистичні характеристики і параметри вимірювальних пристроїв.....	20
2.4 Динамічні характеристики вимірювальних пристроїв.....	21
2.5 Похибки вимірювальних пристроїв.....	22
2.6 Нормування метрологічних характеристик вимірювальних пристроїв.....	26
3 РЕЗУЛЬТАТИ ТЕПЛОТЕХНІЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ ТА ЇХ ПОХИБКИ.....	29
3.1 Теплотехнічні вимірювання з однократними і багатократними спостереженнями.....	29
3.2 Запис результатів вимірювань.....	29
3.3 Систематичні похибки і методи їх визначення.....	30
3.3.1 Класифікація систематичних похибок.....	30
3.3.2 Методи визначення і зменшення систематичних похибок.....	30
3.4 Випадкові похибки і методи їх визначення.....	31
3.4.1 Визначення грубих похибок.....	32
3.4.2 Визначення довірчих меж випадкових похибок вимірювань.....	32
3.5 Знаходження результатів вимірювань.....	33
3.6 Обчислення сумарних похибок.....	35
3.6.1 Складові сумарних похибок.....	35
3.6.2 Обчислення сумарних похибок при однократних спостереженнях.....	35
3.6.3 Обчислення сумарних похибок при багаторазових спостереженнях.....	38
3.7 Наближені обчислення без точного врахування похибок.....	39
3.7.1 Значущі цифри.....	39
3.7.2 Правила округлення.....	40
3.7.3 Правила підрахунку цифр.....	40
3.8 Оцінювання результату і похибки сукупних і спільних вимірювань із багатократними спостереженнями.....	40

4	СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЇ (електричні, пневматичні, гідравлічні).....	47
4.1	Загальні відомості.....	47
4.2	Пневматична система передачі вимірювальної інформації.....	47
4.3	Електрична система передачі вимірювальної інформації із уніфікованим струмовим сигналом.....	49
4.4	Електрична система передачі вимірювальної інформації з уніфікованим частотним сигналом.....	49
4.5	Сельсинна система передачі вимірювальної інформації.....	50
4.6	Пневмоелектричні та електропневматичні перетворювачі.....	50
	РОЗДІЛ II ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛОТЕХНІЧНИХ ВЕЛИЧИН.....	53
5	ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ.....	53
5.1	Загальні відомості.....	53
5.2	Рідинні термометри розширення.....	55
5.3	Біметалеві та дилатометричні термометри.....	56
5.4	Манометричні термометри.....	58
5.5	Термоелектричні термометри.....	59
5.6	Електричні термометри опору.....	62
5.7	Методи вимірювання температури та їх похибки.....	63
5.7.1	Похибки контактних методів вимірювання температури.....	63
5.7.2	Похибки, що виникають унаслідок променевого теплообміну.....	65
5.7.3	Похибки внаслідок теплопровідності термометра (гільзи).....	66
5.7.4	Похибки при вимірюванні температури газових потоків із високою швидкістю.....	67
6	ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ ТА РІЗНИЦІ ТИСКІВ.....	69
6.1	Загальні відомості.....	69
6.2	Фізичні основи первинних перетворювачів тиску.....	69
6.2.1	Класифікація перетворювачів.....	69
6.2.2	Силкові перетворювачі.....	71
6.2.3	Непрямі перетворювачі тиску.....	71
6.2.4	Електричні перетворювачі тиску.....	72
6.3	Методи вимірювання тиску та методичні похибки.....	73
6.3.1	Відбирання статичного тиску.....	73
6.3.2	Вимірювання тисків, близьких до атмосферного (напір вентилятора, тиск кипіння холодильного агента, газоповітряний тракт котлів тощо).....	74
6.3.3	Вимірювання вакууму.....	74
6.3.4	Вимірювання різниці тисків.....	75
6.3.5	Похибки від різниці висоти точок відбирання та вимірювання тиску.....	75
6.3.6	Методичні похибки вимірювання тиску силковими перетворювачами.....	76

7	ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ ГАЗІВ ТА РІДИНИ.....	79
7.1	Загальні відомості.....	79
7.2	Пневмометричне вимірювання витрати.....	80
7.3	Вимірювання витрати за перепадом тисків на звужуючому пристрої.....	82
7.3.1	Загальні рівняння витрати.....	82
7.3.2	Основні розрахункові формули.....	86
7.3.3	Оцінювання похибки вимірювання витрати.....	87
7.3.4	Особливі випадки вимірювання витрати за допомогою нестандартних звужуючих пристроїв.....	88
8	ВИМІРЮВАННЯ РІВНЯ.....	91
8.1	Загальні відомості.....	91
8.2	Рівнеміри з візуальним відрахунком.....	91
8.3	Гідростатичні рівнеміри.....	92
8.4	Поплавцеві та буйкові рівнеміри.....	96
8.5	Ємнісні рівнеміри.....	98
8.6	Індуктивні рівнеміри.....	100
8.7	Радіохвильові рівнеміри.....	103
8.8	Акустичні рівнеміри.....	104
8.9	Термокондуктометричні рівнеміри.....	105
8.10	Вимірювання рівня сипких матеріалів.....	106
9	ВИМІРЮВАННЯ СКЛАДУ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ РЕЧОВИН.....	109
9.1	ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ.....	109
9.1.1	Загальні відомості.....	109
9.1.2	Методи вимірювання вологості повітря і газу.....	110
9.1.3	Методи вимірювання вологості твердих тіл і сипких речовин.....	114
9.2	АНАЛІЗ СКЛАДУ ГАЗІВ.....	116
9.2.1	Загальні відомості.....	116
9.2.2	Об'ємні хімічні газоаналізатори.....	118
9.2.3	Теплові газоаналізатори.....	120
9.2.4	Магнітні газоаналізатори.....	123
9.2.5	Оптичні газоаналізатори.....	125
9.2.6	Електричні газоаналізатори.....	128
9.2.7	Хроматографічні газоаналізатори.....	130
9.2.8	Експлуатація і перевірка газоаналізаторів.....	132
9.3	АНАЛІЗ СКЛАДУ РІДИН.....	135
9.3.1	Методи аналізу складу рідин.....	135
9.3.2	Електрохімічні методи аналізу розчинів.....	136
9.3.3	Оптичні методи аналізу складу рідин.....	144
9.3.4	Вимірювання концентрації газів, розчинених у воді і парі.....	147

9.3.5	Експлуатація аналізаторів складу рідин та їх допоміжних пристроїв..	148
10	ВИМІРЮВАННЯ ГУСТИНИ.....	153
10.1	Загальні відомості.....	153
10.2	Засоби ручного вимірювання густини.....	156
10.2.1	Ареометри.....	156
10.2.2	Гідростатичне зважування.....	161
10.2.3	Пікнометри.....	163
10.3	Засоби автоматичного вимірювання густини.....	167
11	ВИМІРЮВАННЯ В'ЯЗКОСТІ.....	175
11.1	Загальні положення.....	175
11.2	Принципи вимірювання в'язкості.....	175
12	ВИМІРЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ.....	180
12.1	Загальні положення.....	180
12.2	Методи вимірювання коефіцієнта теплопровідності.....	181
12.2.1	Теплопровідність твердих матеріалів.....	181
12.2.2	Теплопровідність рідин і газів.....	184
	СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	188

ВСТУП

Курс «Теплотехнічні вимірювання і прилади» (ТТВП) охоплює питання теорії та засобів вимірювання величин, що характеризують теплотехнічні процеси: температури t , тиску p , об'ємної витрати \dot{V} , відносної вологості φ тощо.

Історія розвитку ТТВП пов'язана із загальним розвитком промисловості. Перші теплотехнічні вимірювальні прилади – водяний термометр Галілея (1697 р.) і ртутний барометр Торрічеллі (1643 р.) – використовувалися в основному з науковою метою, у промисловості переважала орієнтація на професійну майстерність і досвід: температуру оцінювали на дотик, зазор визначали пальцем тощо. Значне використання вимірювальних приладів (ВП) у промисловості почалося лише у ХХ сторіччі у зв'язку з впровадженням досконалішого технологічного устаткування, а також із розвитком автоматизації виробничих процесів.

Із вимірювальною технікою пов'язані дві групи завдань:

- 1) комплексна автоматизація виробництва;
- 2) посилення ролі науки.

Основними тезами, що характеризували напрямок розвитку технічних наук того часу, були такі:

- 1) не можна автоматизувати процеси, що не піддаються вимірюванню;
- 2) «наука починається там, де починають вимірювати». Д. І. Менделєєв.

До завдань курсу ТТВП відносять:

- 1) вивчення і критичне зіставлення методів вимірювань різних величин, що характеризують теплотехнічні процеси;
- 2) розгляд основних конструктивних схем вимірювальних пристроїв;
- 3) оцінювання можливої достовірності вимірювання (похибки).

РОЗДІЛ І ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИМІРЮВАНЬ ТА ЇХ ПОХИБКИ

1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ВИМІРЮВАННЯ

1.1 Основні характеристики вимірювань

Теоретичною основою вимірювальної техніки є *метрологія* (від грецьк. *metron* – міра і *logos* – учення, поняття) – це наука про вимірювання, методи і засоби забезпечення їх єдності та способи досягнення необхідної точності.

Єдність вимірювань необхідна для можливості зіставлення та порівняння результатів вимірювань.

Порівнювати можна фізичні об'єкти за принципом «більше – менше», наприклад: довше або коротше, важче або легше, тепліше або холодніше тощо. Такі фізичні величини називають однорідними.

Послідовний ряд з однорідних фізичних величин (ФВ), що поступово зростають, називається *натуральним рядом*.

Для формування *шкали* (від лат. *scalae* – сходи) ФВ із послідовного натурального ряду вибирають *реперні точки* (від франц. *repere* – стовп, рейка): S_1 та S_0 .

Відстань між розмірами S_1 та S_0 називають *основним інтервалом*, один із розмірів, наприклад, S_0 вважають початком відліку, а деяку n -ну частину цього інтервалу за *одиницю вимірювання* ФВ: $[S] = (S_1 - S_0) / n$.

Вибір n , у принципі, довільний ($^{\circ}C - 100$, $^{\circ}R - 80$), тому розміри ФВ визначаються методом лінійної інтерполяції. Фізично це реалізується методом вимірювальних перетворень, оскільки ФВ не може бути визначена сама по собі, а сприймається лише через той фізичний процес, в якому вона виявляється. Вимірювальні перетворення (ВП) дозволяють здійснювати інтерполяцію розмірів ФВ між реперними точками і визначати протяжність основних інтервалів. На основі ВП будується функціональна ФВ.

Вимірювання – це визначення ФВ дослідним шляхом за допомогою спеціальних технічних засобів. Вимірювання, як правило, здійснюються на природних і штучних об'єктах вимірювань (ОВ).

ОВ – це явище або процес, який характеризується окремими параметрами ФВ, кожна з цих ФВ може бути виміряна окремо. ФВ, яка вибрана для вимірювання, називається *вимірюваною величиною*.

Процес вимірювання ФВ передбачає три етапи:

- підготовку;
- виконання вимірювання або вимірювального експерименту;
- обробку результатів вимірювання.

Схема процесу вимірювання величини X показана на рис. 1.1.

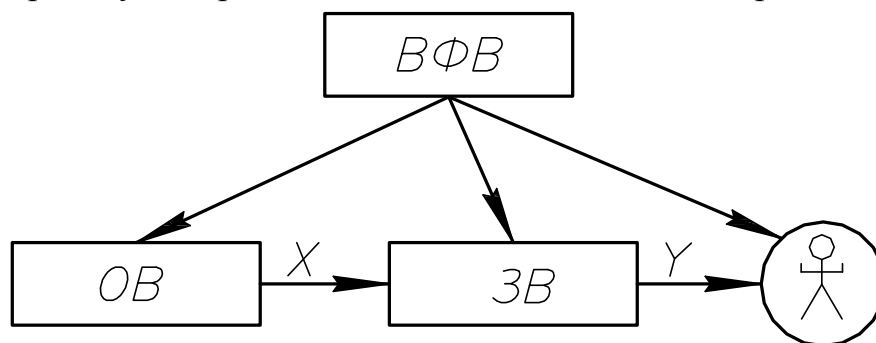


Рисунок 1.1 – Схема процесу вимірювання величини X :

ВФВ – вплив фізичної величини; ОВ – об’єкт вимірювання; ЗВ – засіб вимірювання

Тут $X = A[x]$ – основне рівняння вимірювання;

A – числове значення ФВ;

$[x]$ – одиниця фізичної величини.

Засобом вимірювання (ЗВ) називається технічний засіб, що має нормовані технологічні характеристики.

Розмір ФВ існує реально X , а числове значення A залежить від вибору одиниці ФВ $[x]$.

Розрізняють істинне і дійсне значення ФВ.

Істинне значення ФВ – це те значення X_i , що ідеально відображає об’єкт вимірювання, дійсне значення – це вимірне, знайдене експериментально, близьке до істинного, що використовується замість нього. Істинне значення є недосяжним.

Засіб вимірювання видає вимірювальну інформацію у вигляді деякого сигналу. У процесі вимірювання на засіб вимірювання, об’єкт вимірювання і на оператора впливають різні зовнішні чинники (фізичні величини). Вимірювання виконуються на основі фізичних явищ, що визначають *принцип вимірювання*.

Метод вимірювання – сукупність прийомів і правил використання принципів і засобів вимірювань.

Недосконалість виготовлення засобів вимірювання, неточність їх градування, вплив зовнішніх фізичних чинників (температури, відносної вологості, електромагнітного імпульсу, вібрації тощо), суб’єктивні помилки оператора і ряд інших чинників зумовлюють неминуче виникнення похибок.

Похибка (або помилка) вимірювання – відхилення результату вимірювання X від істинного значення X_i вимірюваної величини. Якщо вона розрахована в абсолютному вигляді: $\Delta X = X - X_i$, то її називають

абсолютною похибкою вимірювання. Абсолютна похибка завжди має розмірність, таку саму, як виміряне значення.

Похибка, яка розрахована щодо дійсного значення X_i та виражена у безрозмірному вигляді, або частіше у відсотках, називається *відносною похибкою вимірювання* та записується у вигляді $\delta X = \Delta X / X_i \cdot 100 \%$.

Абсолютна та відносна похибки можуть мати відхилення як у додатний, так і у від'ємний напрямок, що враховується відповідними знаками (\pm).

Точність вимірювання відображає ступінь наближення до дійсного значення: $\varepsilon = |X_i / \Delta X| = |1 / \delta X|$.

1.2 Класифікація вимірювань

Класифікація вимірювань здійснюється за п'ятьма ознаками, наведеними на рис. 1.2.

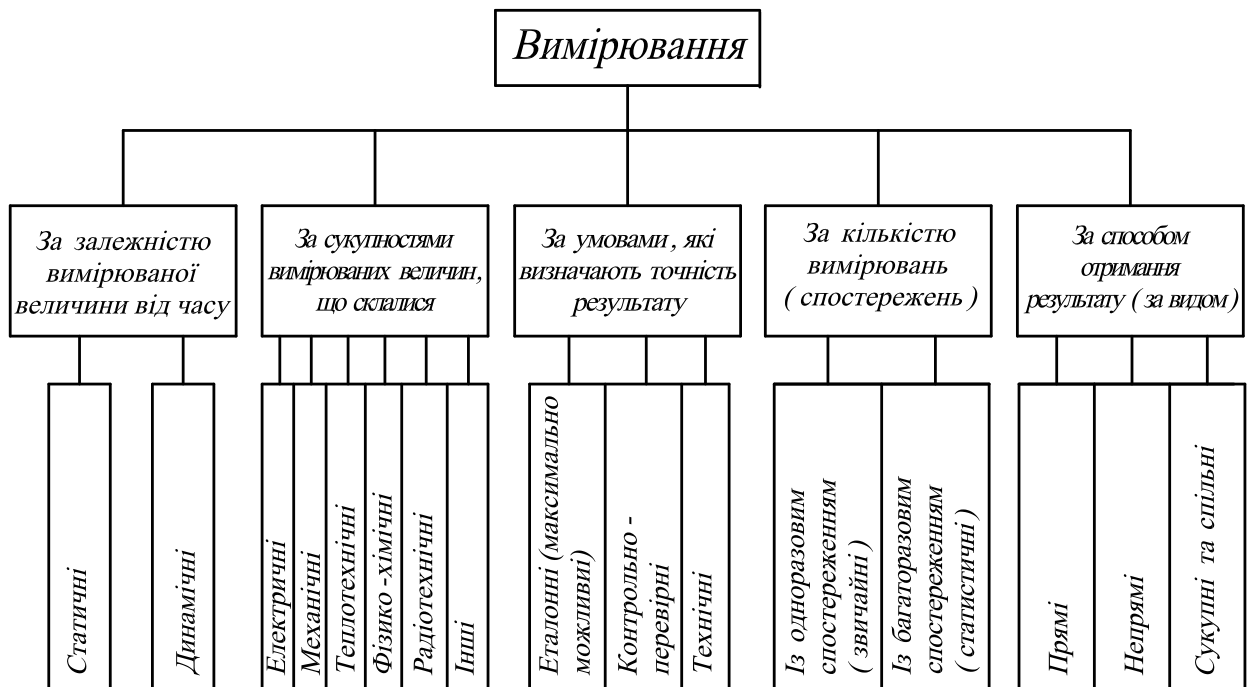


Рисунок 1.2 – Класифікація вимірювань

За залежністю вимірюваної величини від часу розрізняють статичні та динамічні вимірювання.

Статичні вимірювання – вимірювана величина залишається сталою у часі.

Динамічні вимірювання – вимірювана величина змінюється в процесі вимірювання (отримують миттєві значення).

За сукупністю вимірюваних величин, що склалися, розрізняють *електричні, механічні, теплотехнічні* величини тощо. По суті, класифікуються споріднені ФВ, які склалися в окремих галузях науки і техніки.

між ними. Вони описуються аналогічною системою рівнянь, за винятком того, що Y_i – неоднойменні величини. Метою спільного вимірювання є визначення функціональної залежності між величинами Y_i .

Крім того, вимірювання можна розділяти залежно від місця проведення – лабораторні і промислові, модельні і натурні, часу – безперервні і періодичні тощо.

1.3 Методи вимірювань

Методи прямих вимірювань є загальними для всіх видів вимірювань. Їх класифікація показана на рис. 1.3.

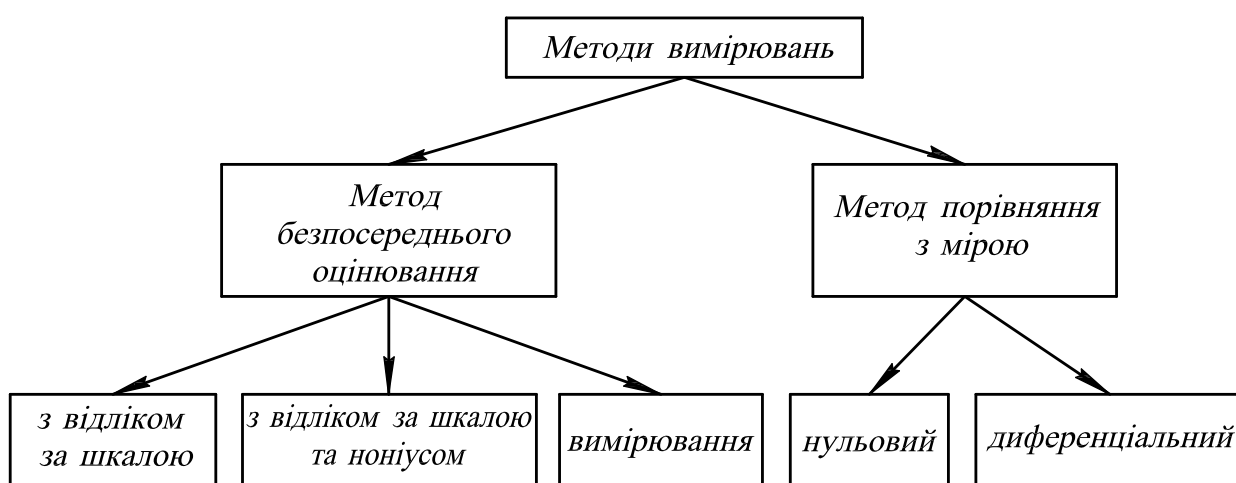


Рисунок 1.3 – Класифікація методів вимірювань

Метод безпосереднього оцінювання – метод вимірювання, в якому значення ФВ визначають безпосередньо за відліковим пристроєм вимірювального приладу прямої дії.

Метод порівняння з мірою – метод вимірювання, в якому вимірювану величину порівнюють із величиною, відтвореною мірою.

Нульовий метод – це метод порівняння з мірою, в якому результуючий ефект дії на порівнюючий елемент приладу вимірювання (компаратор) доводять до нуля.

Диференціальний метод – це метод порівняння з мірою, в якому на вимірювальний прилад впливає різниця між вимірюваною величиною і відомою, відтвореною мірою.

1.4 Похибки вимірювань

Через те, що істинне значення ФВ завжди залишається невідомим, тому і істинне значення похибки також не можна визначити. Для наближеного оцінювання похибки використовують поняття *дійсного значення ФВ* X_0 , яке

знаходять точнішими методами і засобами. Отриману оцінку похибки $\Delta X = X_{вим} - X_0$ залежно від причин виникнення, характеру й умов прояву виражають сумою двох складових: випадкової ψ і систематичної θ похибок вимірювань: $\Delta = \psi + \theta$.

Випадкова похибка вимірювання – складова похибки вимірювання, що змінюється випадковим чином при повторних вимірюваннях однієї й тієї самої величини.

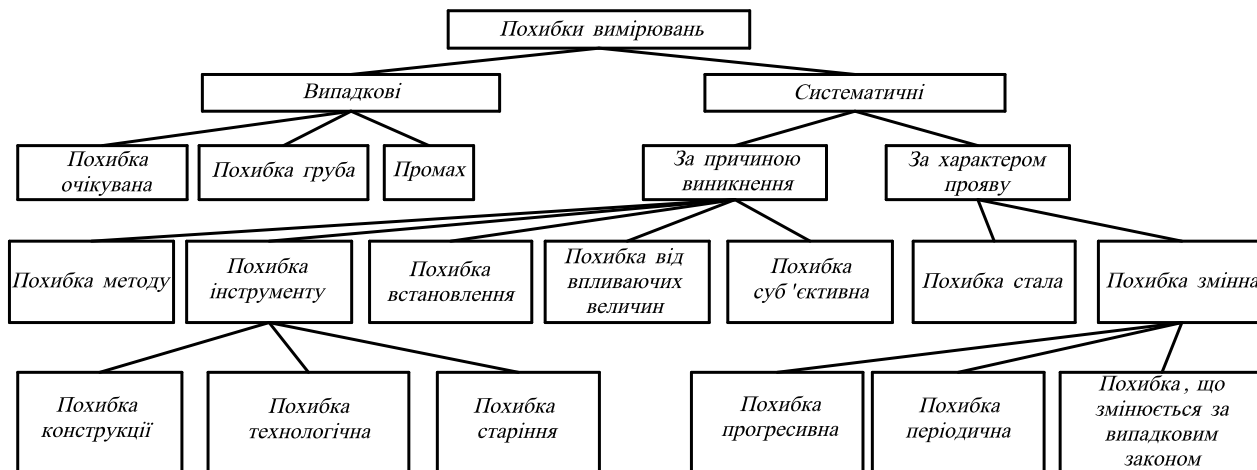


Рисунок 1.4 – Класифікація похибок вимірювань

Випадкова похибка не може бути виключена з результату вимірювань. Проте проведенням ряду повторних вимірювань і використанням для їх обробки методів математичної статистики визначають значення вимірюваної величини із випадковою похибкою, меншою, ніж для виконуваного вимірювання.

При приблизно однаковому рівні інтенсивності впливу чинників, що діють, знаходять *очікувану похибку*.

Грубою похибкою називають похибку вимірювання, що істотно перевищує очікувану за даних умов. Причина цього – несправність засобів вимірювання, різка зміна умов вимірювань і вплив зовнішніх фізичних факторів.

Промак – це похибка вимірювання, яка явно і різко спотворює результати вимірювань. Промак є випадковою суб'єктивною помилкою оператора.

Грубі помилки і промахи виключаються з експериментальних даних, що підлягають обробці.

Окремі значення випадкової похибки передбачити неможливо, проте їх сукупність підкоряється імовірнісним закономірностям. Для кількісного оцінювання можливості появи випадкової похибки (ψ) вводиться поняття

імовірності (результат достовірний, якщо $P = 1,0$, результат неможливий, якщо $P = 0$).

Зв'язок між значеннями випадкової величини і відповідною їм густиною імовірності виражається *диференціальними законами розподілу випадкової величини*. Найбільш поширеним при вимірюваннях є *нормальний закон розподілу* (рис. 1.5).

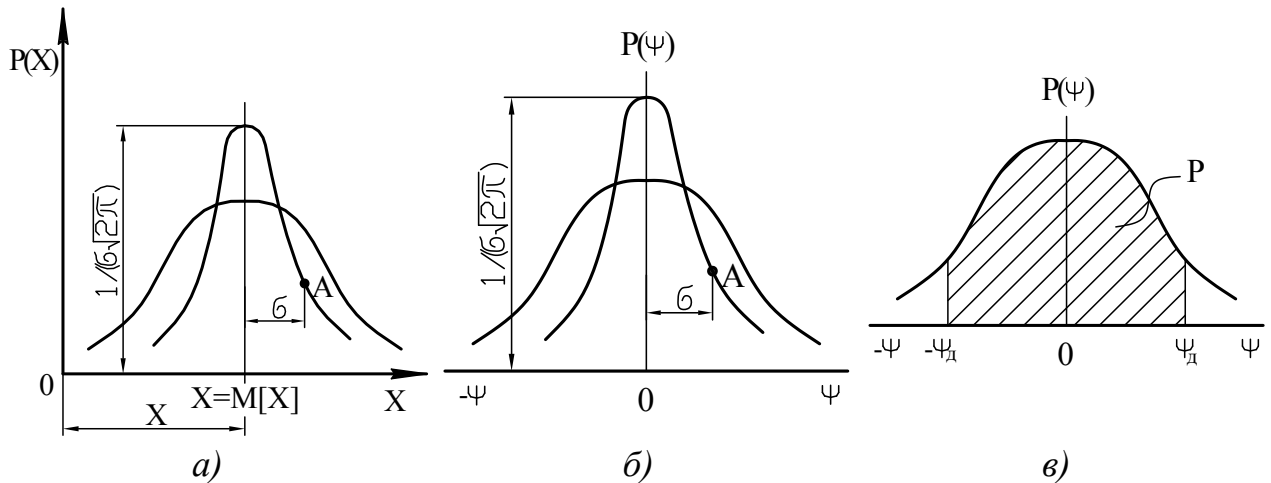


Рисунок 1.5 – Диференціальні закони розподілу:

$$a) P(X) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(X-M[X])^2}{2\sigma^2}}; X = M[X] \neq 0; б) P(\psi) = \frac{e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\psi}{\sigma}\right)^2}}{\sigma\sqrt{2\pi}}; X = M[X] \Rightarrow 0;$$

$$в) P(\psi) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\psi_d}^{\psi_d} e^{-0,5(\psi/\sigma)^2} d\psi; \psi = X - M[X]$$

Тут $M[X]$ – математичне сподівання випадкової величини (найбільш достовірне значення);

σ – середньоквадратичне відхилення;

A – точка перегину кривої розподілу;

P – імовірність потрапляння результату вимірювання або випадковій похибки в деякому наперед заданому інтервалі від $-\psi_d$ до $+\psi_d$.

Інтеграл не має аналітичного розв'язку, тому наводяться табличні значення функції Лапласа. Частіше розв'язується зворотна задача у визначенні довірчого інтервалу. Інтервал із межами $[-\psi_d; \psi_d]$ називають *довірчим*. Імовірність P_d , яка відповідає довірчому інтервалу, також називають довірчою. Дійсне значення вимірюваної величини входить до довірчого інтервалу.

Наприклад, при $P_D = 0,5$ – шанси імовірнісної похибки 1:1, а довірчий інтервал складає $\pm 2 / 3\sigma$;

при $P_D = 0,95$ – шанси імовірнісної похибки 20:1, а довірчий інтервал $\pm 2\sigma$; тобто 5 % похибок більше 2σ , або матимемо 1 промах із 20 вимірювань;

при $P_D = 0,9973$ – довірчий інтервал становить $\pm 3\sigma$, практично всі похибки підлягають цьому інтервалу. На застосуванні цієї довічої імовірності засноване *правило «трьох сигм»* для визначення грубих похибок та промахів.

Інші розподіли при вимірюваннях наведені на рис. 1.6.

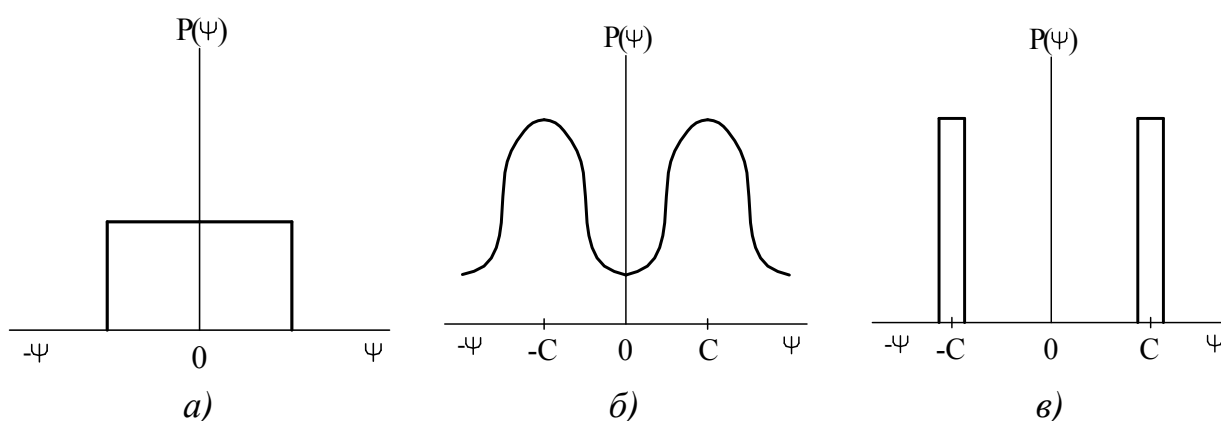


Рисунок 1.6 – Види законів розподілу:
а) рівномірний; б) двомодальний; в) дискретний

Систематична похибка – складова похибки вимірювання, що залишається сталою або закономірно змінюється при повторних вимірюваннях. Виявлену і оцінену похибку виключають із результату шляхом введення поправкового коефіцієнта.

Причини виникнення систематичної похибки за відповідними складовими подані нижче.

Похибка методу – недосконалість принципу вимірювання, недостатнє вивчення фізичного явища, на основі якого виконують вимірювання.

Інструментальна похибка – це похибка засобів вимірювання (вимірювальних приладів і мір), обумовлена причинами, пов'язаними з конструкцією приладу, якістю його виготовлення, властивостями застосовуваних матеріалів, старанністю регулювання тощо.

Похибка встановлення – неправильність встановлення засобів вимірювання.

Похибка від впливу величини – виникає від впливу теплових і повітряних потоків, магнітних, електричних, гравітаційних та інших полів, зміни атмосферного тиску, вологості, опромінення тощо.

Суб'єктивна похибка – неправильні навички оператора, помилки відліку десятих за шкалою тощо.

За характером виявлення:

Стала похибка виникає при неправильному градуванні, неправильному виставленні початку відліку тощо.

Змінна похибка – змінюється при повторних вимірюваннях; причини виникнення: вплив зовнішніх чинників і особливості конструкції засобів вимірювань.

Ці похибки можуть виникати як при статистичних, так і при динамічних вимірюваннях, відповідно вони називатимуться *статичними* або *динамічними*.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що вивчає наука метрологія?
2. Що таке *одиниця вимірювання* фізичної величини?
3. Які етапи включає процес вимірювання фізичної величини?
4. Дайте визначення засобу вимірювання?
5. Що таке істинне та дійсне значення фізичної величини?
6. Що таке похибка вимірювання фізичної величини? Перелічіть основні види похибок.
7. Що таке точність вимірювання? Який її взаємозв'язок із відносною похибкою?
8. Наведіть класифікацію вимірювань.
9. Поясніть складові при класифікації вимірювань за залежністю вимірюваної величини від часу.
10. Поясніть складові при класифікації вимірювань за сукупностями вимірюваних величин, що склалися.
11. Поясніть складові при класифікації вимірювань за умовами, які визначають точність результату.
12. Поясніть складові при класифікації вимірювань за кількістю вимірювань.
13. Поясніть складові при класифікації вимірювань за способом отримання результату.
14. Наведіть класифікацію методів вимірювань.
15. Що таке метод безпосереднього оцінювання?
16. Що таке метод порівняння з мірою?
17. Наведіть класифікацію похибок вимірювань.
18. Поясніть складові при класифікації похибок вимірювань за причиною виникнення.
19. Поясніть складові при класифікації похибок вимірювань за характером прояву.
20. Перелічіть та докладно опишіть основні види законів розподілу випадкової величини, які трапляються при аналізі результатів вимірювань.

2 ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЗАСОБИ ВИМІРЮВАНЬ

2.1 Класифікація засобів вимірювань за видом, принципом дії і метрологічним призначенням

Види засобів вимірювань – міра, вимірювальні пристрої, вимірювальні установки і вимірювальні системи.

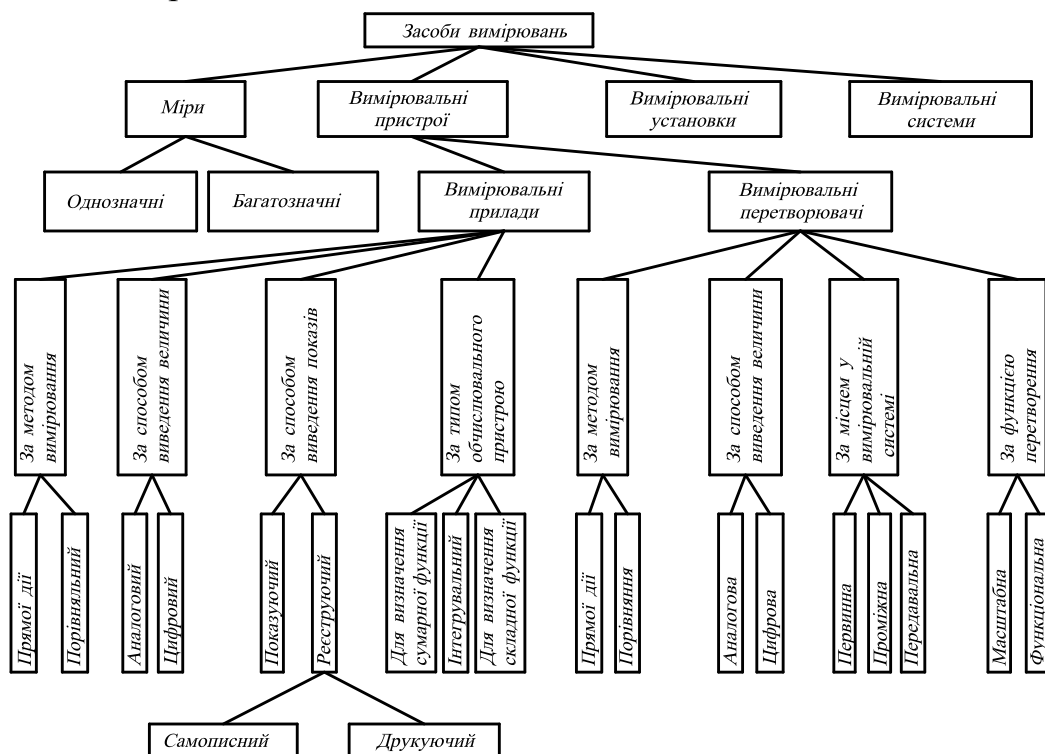


Рисунок 2.1 – Класифікація засобів вимірювань

Міра – засоби вимірювань, призначені для відтворення ФВ заданого розміру.

Вимірювальні пристрої застосовуються самостійно або у складі вимірювальних установок або вимірювальних систем. Вимірювальні пристрої поділяють на вимірювальні прилади і вимірювальні перетворювачі залежно від форми подання сигналу.

Вимірювальний прилад – засіб вимірювання, призначений для вироблення сигналу вимірювання: інформації у формі, доступній для безпосереднього сприйняття спостерігачем (шкала, цифри, індикатор).

Вимірювальний перетворювач – засіб вимірювання, призначений для вироблення сигналу вимірювальної інформації у формі, зручній для передачі, подальшого перетворення, оброблення або зберігання, але яка не піддається безпосередньому сприйняттю.

Вимірювальна установка – сукупність мір, вимірювальних приладів, вимірювальних перетворювачів і допоміжних пристроїв, призначених для

вироблення інформаційного сигналу у формі, зручній для сприйняття в одному місці.

Інформаційно-вимірювальна система (або *вимірювальна система*) – сукупність функціонально сполучених вимірювальних, обчислювальних та інших допоміжних технічних засобів, які служили або для отримання вимірювальної інформації, оброблення з метою подання її споживачеві і системі автоматизованого управління у необхідному вигляді, або для автоматичного здійснення логічних функцій контролю, діагностики та ідентифікації.

За принципом дії (фізичний принцип, покладений в основу побудови засобів вимірювання цього типу, зазначений у назві) інформаційно-вимірювані системи можуть мати назву, наприклад, термоелектричний термометр, електромагнітний витратомір тощо.

За метрологічним призначенням розрізняють *зразкові й робочі* засоби вимірювання, *еталони*.

Зразковий засіб вимірювання – міра, вимірювальний прилад, вимірювальний перетворювач – слугує для перевірки робочих та зразкових засобів вимірювання меншої точності.

Робочі засоби вимірювання – засоби, які використовуються для практичних вимірювань в усіх галузях та поділяються на засоби вимірювань підвищеної точності і технічні.

Еталони – слугують для відтворення і зберігання фізичних величин і передачі їх розміру через зразкові засоби вимірювання робочим.

2.2 Структурні схеми вимірювальних пристроїв

Будь-який вимірювальний пристрій розглядають як перетворювач вхідного сигналу X у вихідний Y .

Вимірювальний пристрій складається з елементів, призначених для виконання певних функцій.

Перетворювальний елемент – елемент засобу вимірювання, в якому відбувається одне з ряду послідовних перетворень величини.

Вимірювальний ланцюг – сукупність перетворювальних елементів, що забезпечує здійснення всіх перетворень сигналу вимірювальної інформації.

Чутливий елемент – перший у вимірювальному ланцюзі перетворювальних елементів, що перебуває під безпосередньою дією вимірюваної величини.

Вимірювальний механізм – частина конструкції засобу вимірювання, що складається з елементів, взаємодія яких викликає їх взаємне переміщення.

Відліковий пристрій – частина конструкції засобу вимірювання, призначена для відліку значень вимірюваної величини.

Реєструвальний пристрій – частина реєструвального вимірювального приладу, призначена для реєстрації показів.

Структурні схеми вимірювальних пристроїв подані на рис. 2.2.

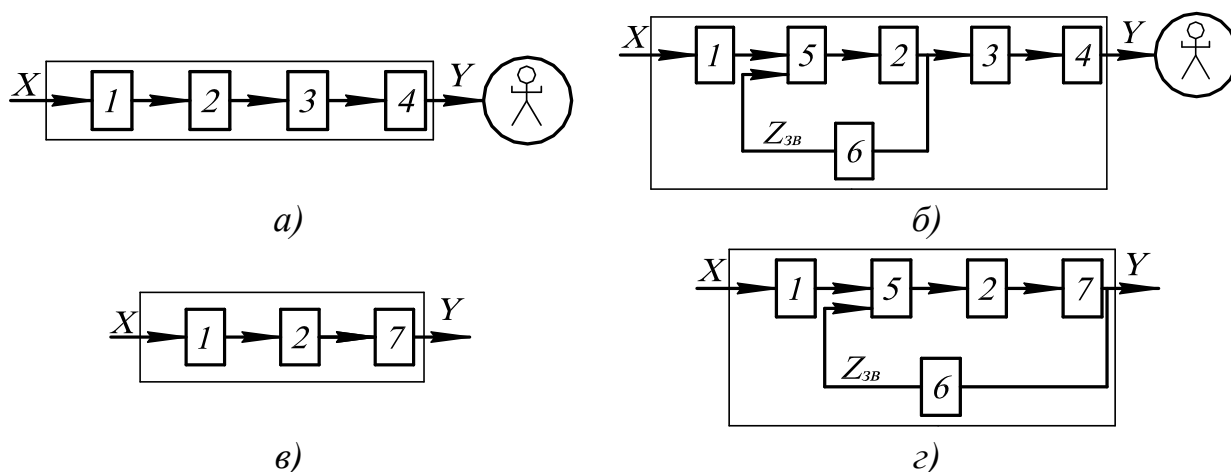


Рисунок 2.2 – Структурні схеми вимірювальних пристроїв:

а), в) – вимірювальний прилад прямої дії; 1 – чутливий елемент; 2 – перетворювальний елемент (наприклад, підсилювач); 3 – вимірювальний механізм; 4 – відліковий пристрій; 7 – перетворювальний елемент, відсутній вимірювальний механізм і відліковий пристрій, відсутнє безпосереднє сприйняття результатів вимірювання людиною (оператором), перетворювальний елемент 7 формує вихідний сигнал для передачі на відстань, для зберігання, оброблення даних; б), з) – порівняльні вимірювальні прилади, принцип дії яких ґрунтується на методі зрівноважувального перетворення перетворювального елемента 5 з обов’язковою наявністю зворотного зв’язку (на виході з чутливого елемента 2 виникає сигнал, який надходить до компілятора 5); 6 – зворотний перетворювальний елемент

Схема відлікового пристрою вимірювального приладу подана на рис. 2.3.

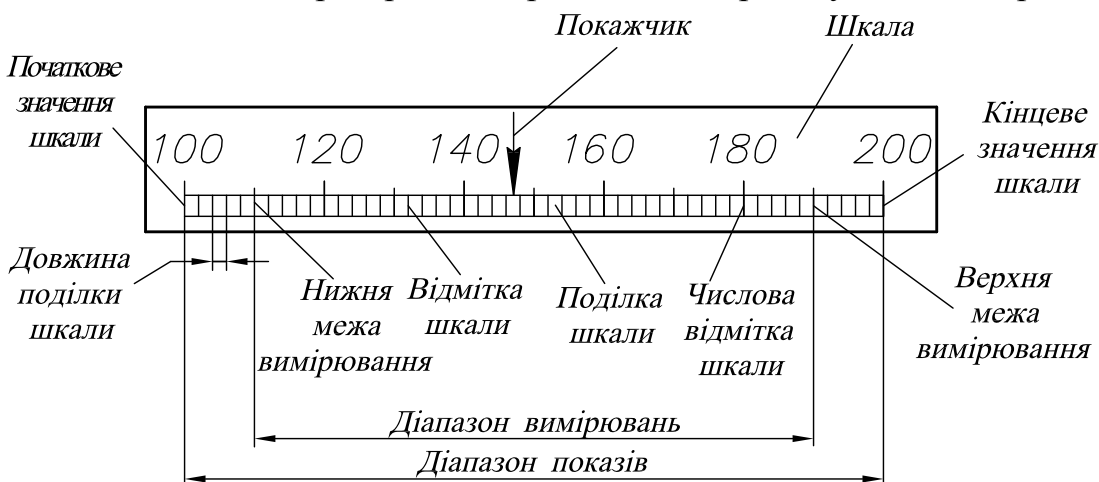


Рисунок 2.3 – Схема відлікового пристрою вимірювального приладу

2.3 Статистичні характеристики і параметри вимірювальних пристроїв

Режим роботи вимірювального пристрою, при якому значення вхідного X і вихідного Y сигналів не змінюються, називають *статичними* (стаціонарними або рівноважними).

Статичною характеристикою вимірювального пристрою є функціональна залежність вихідного сигналу від вхідного у статичному режимі роботи цього пристрою:

$$Y = f(X). \quad (2.1)$$

Основна вимога до статичної характеристики – лінійна залежність $Y = kX$.

Діапазон показів – область значень шкали, обмежена кінцевим і початковим значеннями шкали.

Діапазон вимірювань (робоча частина шкали) – область значень вимірюваної величини, для якої нормовані похибки вимірювання, що припускаються.

Для кількісного оцінювання впливу на вихідний сигнал вимірювального пристрою вхідного сигналу у довільній точці статичної характеристики використовують величину, яку називають *чутливістю* S . Математично чутливість є першою похідною функції вихідного сигналу за величиною вхідного або це межа приросту вихідного сигналу ΔY до приросту вхідного ΔX , коли останній наближається до нуля:

$$S = \lim_{\Delta X \rightarrow 0} (\Delta Y / \Delta X) = dY / dX. \quad (2.2)$$

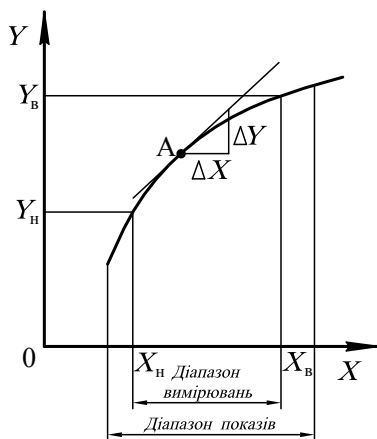


Рисунок 2.4 – Статична характеристика

Щодо вимірювальних приладів цей параметр називають *чутливістю вимірювального приладу* (графічно це тангенс кута нахилу дотичної, побудованої у заданій точці). Якщо функція $Y = f(X)$ є нелінійною, то чутливість S буде різною у різних точках, а шкала приладу – нерівномірною.

Для лінійної залежності $S = const$, шкала рівномірна, $Y = kX$, де k – коефіцієнт перетворення.

Ціна поділки – різниця двох сусідніх відміток шкали. Ціна поділки однозначно пов'язана з числом поділок n шкали вимірювального приладу у вимірювальному пристрої. У першому наближенні $n \geq 100 / (2\gamma)$, де γ – клас точності.

Поріг чутливості вимірювального пристрою – це найменше значення вхідного сигналу, яке викликає помітну зміну вихідного сигналу. Як правило,

це половина поділки шкали, тому поріг чутливості можна вважати таким, що дорівнює половині ціни поділки або класу точності γ .

2.4 Динамічні характеристики вимірювальних пристроїв

Режим роботи вимірювального пристрою, при якому значення Y і X змінюються в часі τ , називають *динамічним*, або *нестационарним*.

Практично всі вимірювальні пристрої мають у своєму складі інерційні елементи: рухливі механічні вузли, ємності (електричні і пневматичні), індуктивності тощо. Тому у динамічному режимі миттєве значення вихідного сигналу вимірювального пристрою залежить не лише від миттєвого значення, але від будь-яких змін цього сигналу, тобто від його першої, другої і більш високого порядку похідних. Динамічна характеристика враховує інерційні властивості вимірювального пристрою.

Динамічна характеристика вимірювального пристрою – це залежність у динамічному режимі.

Динамічна характеристика, як правило, описується диференціальним рівнянням, передавальною або комплексною частотною функцією.

Перехідні характеристики вимірювального пристрою показані на рис. 2.5.

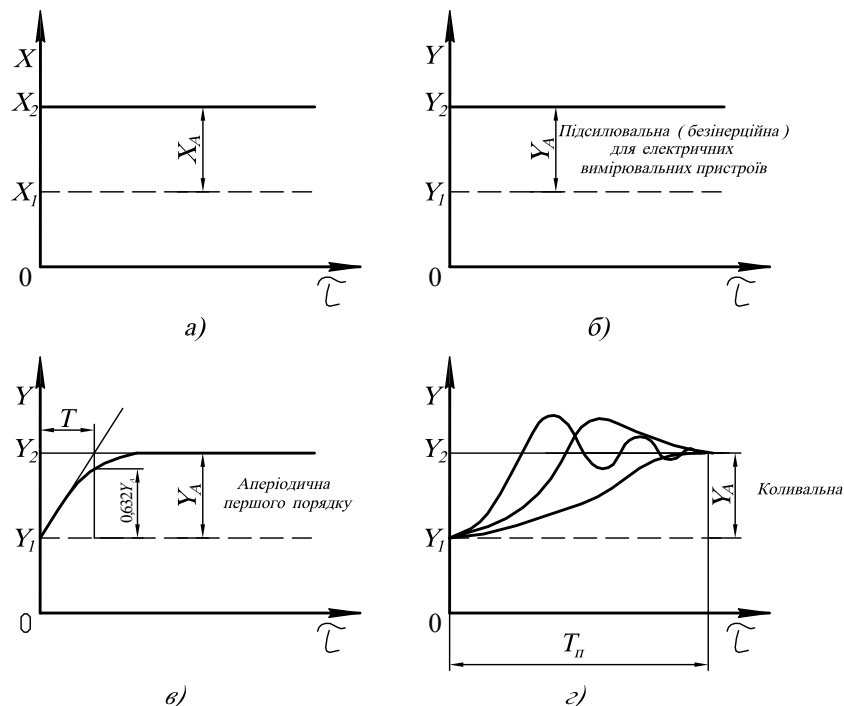


Рисунок 2.5 – перехідні характеристики вимірювального пристрою:

а) динамічна характеристика, що викликає появу одного з видів перехідних процесів, показаних на рис. 2.5 б, в, г; б) безінерційний; в) аперіодичний; г) коливальний

На рис. 2.5 умовно показано: T – стала часу; T_{II} – час встановлення вихідного сигналу (час реакції); $T_{II} = (3-5)T$.

2.5 Похибки вимірювальних пристроїв

Основною похибкою вимірювального пристрою називають похибку при використанні вимірювального пристрою у нормальних умовах. Нормальні умови застосування зазначаються у стандартах або у технічних умовах до вимірювального пристрою.

Додатковою похибкою називають зміну похибки приладу, викликану відхиленням однієї або декількох впливаючих величин щодо свого нормативного значення.

Додаткова похибка додається до основної при вимірюванні у робочих умовах.

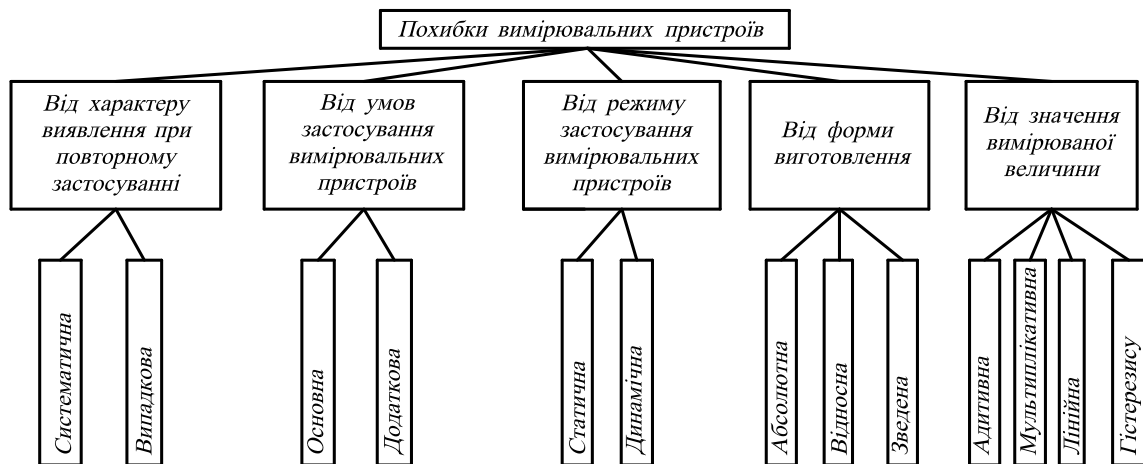


Рисунок 2.6 – Класифікація похибок вимірювальних пристроїв

Абсолютна похибка вимірювального приладу ΔX – це величина відхилення виміряного значення $X_{вим}$ щодо дійсного (істинного) значення X_D вимірюваної величини, яке визначається зразковим приладом або мірою, виражена в одиницях вимірюваної величини

$$\Delta X = X_{вим} - X_D. \quad (2.3)$$

Відносна похибка вимірювального приладу δX є відношенням абсолютної похибки ΔX до дійсного (істинного) значення X_D вимірюваної величини, виражена у відсотках або рідше у частці одиниці:

$$\delta X = \Delta X / X_D \cdot 100 \%. \quad (2.4)$$

Оскільки величина абсолютної похибки ΔX , як правило, набагато менша від дійсної X_D або виміряної $X_{вим}$ величини, тобто $\Delta X \ll X_D$, то для визначення відносної похибки часто використовують вираз

$$\delta X = \Delta X / X_{\text{вим}} \cdot 100 \% , \quad (2.5)$$

який не вимагає знання дійсного (істинного) значення, оскільки воно у реальних умовах є невідомим.

Зведеною похибкою γ_N вимірювального приладу називають відношення абсолютної похибки вимірювального приладу до нормованого значення X_N :

$$\gamma_N = \Delta X / X_N \cdot 100 \% . \quad (2.6)$$

Як нормуюче значення використовується верхня межа вимірювання, діапазон вимірювання тощо. Наприклад, при нормуванні відносно діапазону вимірювання матимемо

$$\gamma_N = \Delta X / (X_B - X_H) \cdot 100 \% . \quad (2.7)$$

Для розгляду залежності похибки вимірювального пристрою від значення вимірюваної величини застосовують поняття номінальної і реальної функцій перетворення вимірювального пристрою.

Номінальною (або ідеальною) функцією перетворення називають функцію, яка властива вимірювальному пристрою даного типу, зазначена в його паспорті і використовується при виконанні вимірювань за його допомогою.

Реальною функцією перетворення називають функцію перетворення, яку має конкретний екземпляр вимірювального пристрою даного типу.

Реальна функція відрізняється від номінальної через недосконалість конструкції і технології виготовлення. Ці відхилення залежать від значення вимірюваної величини. За цією ознакою похибки прийнято розділяти на адитивну, мультиплікативну, лінійності та гістерезису.

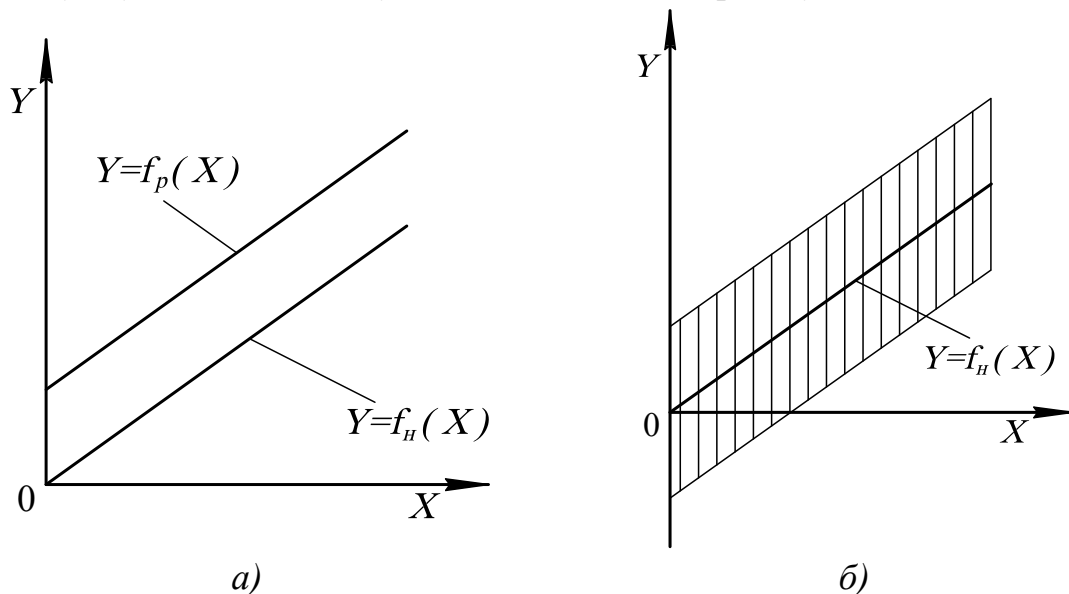


Рисунок 2.7 – Функції перетворення з адитивною похибкою:
 а) реальна та номінальна; б) імовірна область знаходження реальної функції

Адитивною (отримуваною шляхом додавання), або похибкою нуля засобу вимірювання, називають похибку, яка залишається сталою при всіх значеннях вимірюваної величини. Якщо адитивна похибка є систематичною, вона може бути усунена. Для цього у вимірювальному пристрої є коректор нульового значення вихідного сигналу.

Якщо адитивна похибка є випадковою, то її не можна виключити, а реальна функція зміщується щодо номінальної функції довільно. При цьому для реальної функції можна визначити деяке положення (рис. 2.7 б), ширина якої залишається сталою при всіх значеннях вимірюваної величини.

Виникнення випадкової адитивної похибки, як правило, викликане тертям в опорах, контактним опором, дрейфом нуля, шумом і фоном вимірювального пристрою.

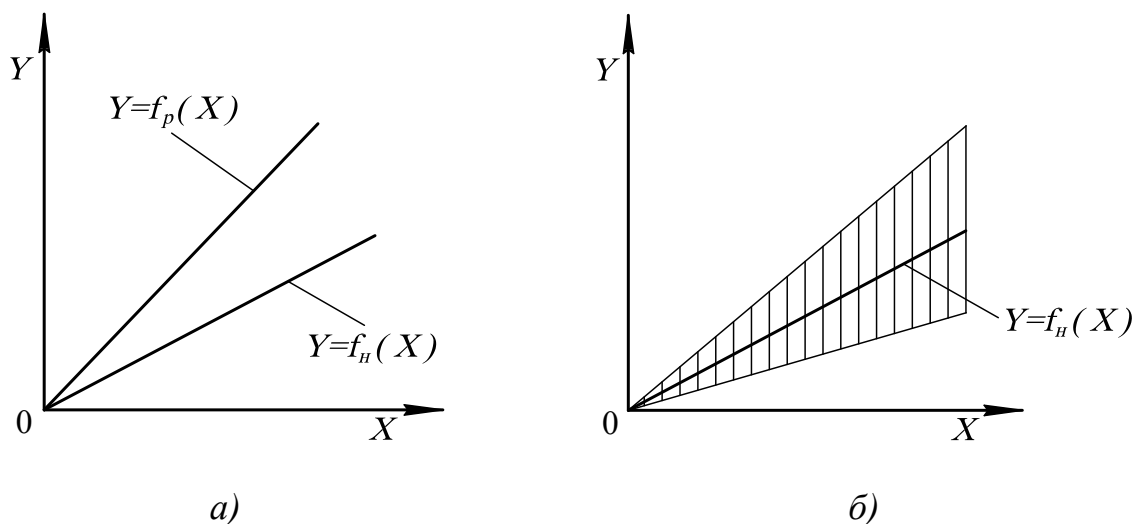


Рисунок 2.8 – Функції перетворення з мультиплікативною похибкою:
 а) реальна та номінальна функції перетворення; б) імовірна область знаходження реальної функції

Мультиплікативною (такою, що отримується шляхом множення), або похибкою чутливості засобу вимірювання, називають похибку, яка лінійно зростає (або зменшується) зі збільшенням вимірюваної величини. Графічно поява мультиплікативної похибки інтерпретується поворотом реальної функції щодо нормованої функції (рис. 2.8 а).

Якщо мультиплікативна похибка є випадковою величиною, то реальна функція перетворення подається смужкою, як показано на рис. 2.8 б. Причиною виникнення мультиплікативної похибки, як правило, є зміна коефіцієнтів перетворення окремих елементів і вузлів вимірювального засобу.

Якщо номінальна функція лінійна, а реальна функція відрізняється від неї так, як показано на рис. 2.9 а, то таку систематичну похибку називають похибкою лінійності.

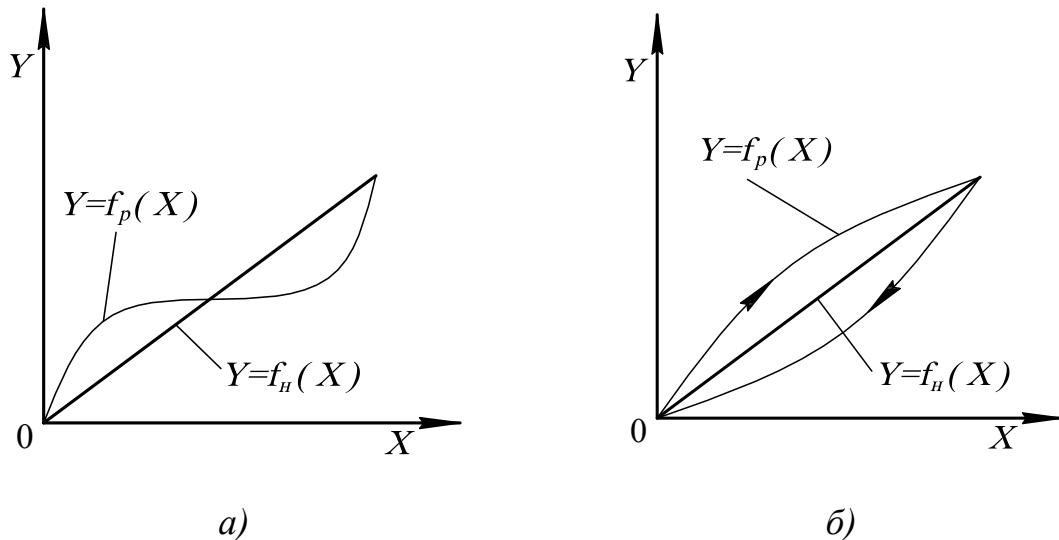


Рисунок 2.9 – Функції перетворення з похибкою лінійності та гістерезису
 а) похибка лінійності; б) похибка гістерезису

Похибка гістерезису (від грецьк. – запізнювання), або похибка зворотного ходу, виявляється у незбігові реальної та номінальної функцій при збільшенні (прямий хід) і зменшенні (зворотний хід) вимірюваної величини (рис. 2.9 б). Причинами гістерезису є: сухе тертя в механічних передавальних елементах, внутрішнє тертя в матеріалах пружин, явище пружної післядії у пружних чутливих елементах, явище поляризації в електричних, п'єзоелектричних та електрохімічних елементах тощо.

При випадковій похибці гістерезису використовують поняття «розмах» і «варіація».

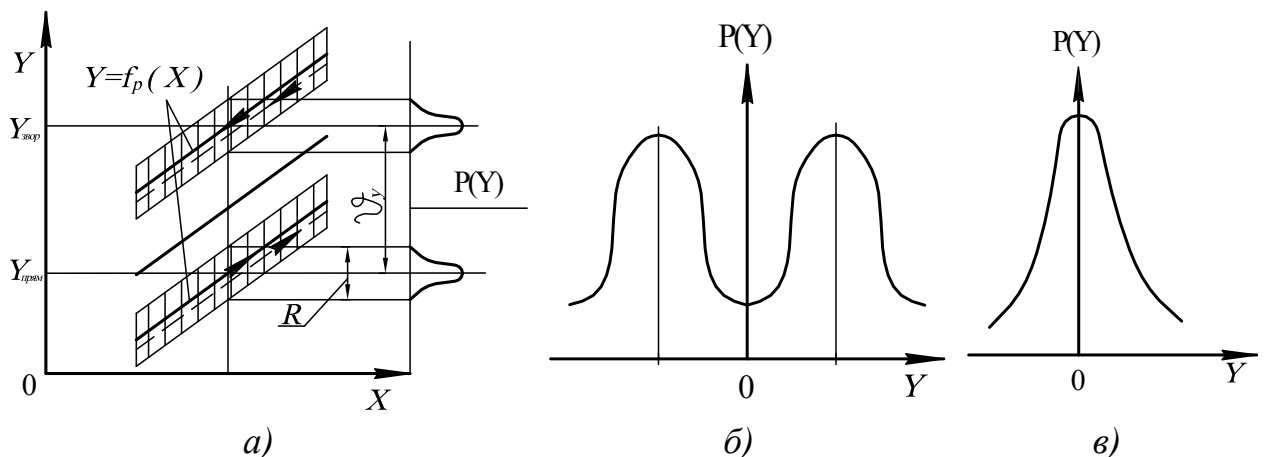


Рисунок 2.10 – До визначення понять «розмах» і «варіація»

Розмахом (несталістю) R вихідного сигналу вимірювального перетворювача (показів вимірювального приладу) називають різницю між найбільшим і найменшим значеннями вихідного сигналу при одному

значенні вимірюваної величини, отриманими багаторазовим одnobічним підходом до цього значення, тобто лише при прямому або лише при зворотному ході.

Варіацією v_y вихідного сигналу вимірювального перетворювача (показів вимірювального приладу) називають середню різницю між значеннями вихідного сигналу, яка відповідає одному й тому самому значенню вимірюваної величини, отриманому при багаторазовому і двосторонньому підході до цього значення, тобто при прямому і зворотному ході:
$$v_y = Y_{звор} - Y_{пр}.$$

За наявності варіації закон розподілу вихідного сигналу вимірювального пристрою є *двумодальним*. Якщо розмахи для нижньої і верхньої гілок перекриваються, то закон розподілу вихідного сигналу має вигляд, показаний на рис 2.10 б.

За відсутності варіації закон розподілу вихідного сигналу є *одномодальним*, або *нормальним* (рис. 2.10 в та рис. 1.5 б).

2.6 Нормування метрологічних характеристик вимірювальних пристроїв

Загальний підхід при нормуванні метрологічних характеристик полягає у тому, що для всіх нормованих функцій і значень встановлюються номінальні функції і номінальні значення, а також межі допустимих відхилень.

Основна похибка вимірювального пристрою нормується шляхом встановлення межі абсолютної, відносної або зведеної похибок: $\Delta X = \pm a$; $\delta X = \pm 100 \cdot \Delta X / X = \pm c$; $\gamma = \pm 100 \cdot \Delta X / X_N = \pm b$, де X – вхідний сигнал вимірювального пристрою. Нормувальне значення X_N – діапазон вимірювань, кінцеве значення шкали або довжина шкали.

Спосіб задавання меж допустимої основної похибки для вимірювальних приладів визначається залежно від похибки вимірюваної величини і вимог простоти. Якщо похибка вимірюваного пристрою є адитивною, тобто не залежить від значення вимірюваної величини, то межа допустимої основної похибки нормується абсолютною $\Delta X = \pm a$ або зведеною похибкою $\gamma_N = \pm b$.

Якщо похибка вимірювального пристрою є мультиплікативною і пропорційна значенню вимірюваної величини ($\Delta X = \pm cX / 100$), то межу допустимої основної похибки зручно нормувати через відносну похибку

$$\delta X = \pm \frac{100c}{100X} \cdot X = \pm c.$$

Значення межі відносної або зведеної похибки визначають із ряду перелічених чисел:

$$[1; 1,5; (1,6); 2; 2,5; (3); 4; 5; 6] \cdot 10^n, \quad (2.8)$$

де $n = 1; 0; -1; -2; \dots$ – цілі числа.

Допустиме значення розмаху береться меншим від половини межі допустимої похибки: $R \leq 0,5 \cdot \Delta X$.

Значення допустимої межі варіації пропорційне значенню межі допустимої основної похибки $v_y = (1,0 - 1,5) \Delta X$.

Додаткова похибка нормується для робочих умов у тих випадках, коли при зміні факторів впливу зовнішніх фізичних величин основна похибка перевищує встановлену для неї межу допустимої величини ΔX_{don} . Межі ΔX_{don} встановлюються у вигляді кратного значення, як правило, $\Delta X_{don} = 0,5 \Delta X$.

Залежно від ступеня захищеності засобу вимірювання від впливу зовнішніх чинників і стійкості до механічного впливу вони поділяються на звичайні, вібростійкі, пило- та вологозахищені, вибухобезпечні тощо. Це дає можливість вибрати засіб вимірювання відповідно до відомих робочих умов.

Вимірювальні пристрої прийнято поділяти на класи точності.

Клас точності вимірювального пристрою – це узагальнена характеристика засобу вимірювання, яка чисельно дорівнює основній допустимій похибці, вираженій у відсотках (зведеної і відносній).

Позначення класів точності γ виконується залежно від способів задання меж допустимої основної похибки. Для зведеної похибки, наприклад, із класом точності 1,5 записують «1,5», а для відносної клас точності записують обведений колом $\textcircled{1,5}$

Для технічних вимірювань нормальні умови експлуатації вимірювального пристрою вибирають такими, що в більшості випадків виключається необхідність нормування додаткової похибки. Тому клас точності однозначно визначає точність цих засобів вимірювань.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Як класифікують засоби вимірювань?
2. Як класифікують вимірювальні прилади?
3. Як класифікують вимірювальні системи?
4. Що називають вимірювальним приладом?
5. Що таке вимірювальний перетворювач?
6. Що називають вимірювальною установкою?
7. Що таке інформаційно-вимірювальна система?

8. Опишіть структурну схему вимірювального приладу прямої дії.
9. Опишіть структурну схему вимірювального приладу порівняльної дії?
10. Зобразіть та опишіть схему відлікового пристрою вимірювального приладу.
11. Що таке статична характеристика вимірювального пристрою?
12. У чому полягають схожість та відмінність діапазонів показів та вимірювань?
13. У чому полягає фізичний та математичний зміст чутливості вимірювального пристрою?
14. Що таке поріг чутливості вимірювального пристрою?
15. Що таке динамічна характеристика вимірювального пристрою?
16. Що називають основною похибкою вимірювального пристрою?
17. Що називають додатковою похибкою вимірювального пристрою?
18. Наведіть приклад класифікації похибок вимірювальних пристроїв.
19. Що таке абсолютна похибка вимірювального пристрою?
20. Що таке відносна похибка вимірювального пристрою?
21. Що таке зведена похибка вимірювального пристрою?
22. Що називають номінальною функцією перетворення?
23. Що називають реальною функцією перетворення?
24. Які ви знаєте функції перетворення? Основні відмінності між ними.
25. Що таке розмах функції?
26. Що таке варіація функції?
27. Що таке клас точності вимірювального пристрою?

3 РЕЗУЛЬТАТИ ТЕПЛОТЕХНІЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ ТА ЇХ ПОХИБКИ

3.1 Теплотехнічні вимірювання з однократними і багатократними спостереженнями

Основним завданням теплотехнічних вимірювань є формування потоку вимірювальної інформації, необхідної для безпосереднього і безперервного контролю і управління технологічними процесами. При цьому виконуються вимірювання з одноразовими і багаторазовими спостереженнями. Загальний підхід до застосування цих вимірювань полягає у такому:

якщо систематичні похибки є визначальними, тобто їх значення істотно більші від значень випадкових похибок, то доцільно для визначення значення вимірюваної величини використовувати спостереження з одноразовими спостереженнями;

якщо випадкова похибка є визначальною, то необхідно використовувати вимірювання із багаторазовими спостереженнями.

Теплотехнічні вимірювання з одноразовими спостереженнями застосовуються для контролю всіх важливих параметрів теплотехнічних процесів – температури t , тиску p , витрати \dot{V} , відносної вологості φ та ін. На основі цих вимірювань будуються автоматичні системи регулювання теплотехнічних процесів.

Одноразові вимірювання застосовують при високій швидкості перебігу теплотехнічних процесів, а багаторазові вимірювання застосовують в основному при розробках математичних моделей теплотехнічних процесів.

Вимірювальний експеримент проводиться за відомою (типовою) або спеціально розробленою методикою.

Методика вимірювань – це сукупність методів, засобів, процедур і умов підготовки і проведення вимірювань, а також правил оброблення результатів вимірювань.

3.2 Запис результатів вимірювань

Остаточний результат вимірювання величини A подають у формі $A = \bar{A} \pm \Delta A$. Під час виконання будь-яких вимірювань застосовуються правила округлення результатів:

1) числове значення результату вимірювання повинне закінчуватися десятковим знаком того самого розряду, що і значення його похибки. Більше число не має сенсу, а менше збільшує невизначеність результату;

2) величину похибки ΔA необхідно округлити до двох значущих цифр, якщо перша з них – одиниця, і до однієї значущої цифри в усіх інших випадках.

Вийнятки: 1) якщо результат знаходиться у діапазоні від 2 до 3, то його округлюють до 2; 2,5, 3;

2) при одній значущій цифрі дев'ятку (9) не застосовують, тобто $0,9 \approx 1 \%$, або $9 \approx 10 \%$.

Правильний запис результату вимірювання температури t при $\Delta t = \pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$ матиме вигляд $t = (86 \pm 1) \text{ } ^\circ\text{C}$.

3.3 Систематичні похибки і методи їх визначення

3.3.1 Класифікація систематичних похибок

Залежно від джерела виникнення систематичні похибки поділяють на *інструментальні, методичні і суб'єктивні*.

Залежно від характеру систематичні похибки поділяють на *ті, що можуть бути виявлені, і ті, що не можуть бути виявлені*.

Систематичні похибки, що можуть бути виявлені, поділяють на *сталі і змінні*.

Сталі похибки виникають в основному завдяки неточностям у градуюванні засобів вимірювання, тобто відхиленні фактичної функції перетворення від номінальної.

До *змінної* відносять похибку, що виникає завдяки зміні зовнішніх умов (нестабільність джерел електроживлення, зміна параметрів навколишнього середовища $t_{н.с}$, $P_{атм}$, φ , дія зовнішніх полів тощо).

Систематичні похибки, що не можуть бути виявлені, можуть бути передбачені або виявлені при обробці результатів вимірювань. Причина – невраховані методичні похибки, суб'єктивні похибки, недостатня інформація про характеристики засобів вимірювань.

3.3.2 Методи визначення і зменшення систематичних похибок

A. Визначення сталих похибок

Сталі похибки характеризуються функцією перетворення, або градуювальною характеристикою. Якщо засіб вимірювання у робочому стані, то за нормальних умов експлуатації стала похибка не повинна виходити за встановлені межі. З метою контролю виникнення сталих похибок засіб вимірювання піддається періодичному контролю (перевірці) і визнається придатним (або непридатним) із подальшою відміткою про придатність у паспорті до засобу вимірювання. У деяких випадках їх піддають

індивідуальним градуванням (таруванню). Індивідуальне градування оформлюється у вигляді таблиць, графіків або може бути описане аналітичною функцією.

Межі допустимих похибок засобу вимірювання (паспортні або індивідуальні) повинні розглядатися як межі невиключеної систематичної похибки.

Б. Визначення і зменшення змінних похибок

Змінні похибки виникають через зміну зовнішніх умов. Для визначення всіх складових змінних похибок виконують спеціальні експерименти, в яких по черзі змінюють кожну із впливаючих величин у заданих межах. Це додаткові похибки, їх відносять до певного діапазону вимірювань фізичних величин (наприклад, додаткова зведена похибка не перевищує 0,2 % на кожні 10 вимірювань температури навколишнього середовища при $t_{н.с} = (20 \pm 5) ^\circ\text{C}$).

Зменшити змінну похибку можна, усуваючи і зменшуючи зміну зовнішніх умов. Для цього використовують стабілізацію живлення, термостабілізацію, екранування від зовнішніх полів, амортизацію та інші методи.

Межі неусунених змінних похибок повинні розглядатися як межі додаткової невиключеної похибки.

В. Вплив і зменшення похибок, що не можуть бути виявлені

Єдиним шляхом виявлення систематичних похибок, що не можуть бути виявлені зазделегідь, є виконання вимірювань двома або декількома незалежними методами, які мають приблизно однакові сталі і змінні систематичні похибки. При декількох методах вимірювань порівнюють їх результати і відкидають ті з них, які грубо відрізняються від інших. За тими, що залишилися, знаходять \bar{A} та імовірнісну похибку аналогічно, як і при розрахунку випадкової похибки. Інший шлях – застосування більш точного методу вимірювання.

3.4 Випадкові похибки і методи їх визначення

Випадкові похибки можуть бути виявлені, якщо результати отримують на підставі багаторазових вимірювань величини, значення якої не змінюється упродовж усього процесу вимірювання.

При числі спостережень 30 і більше розподіл випадкових величин відбувається згідно з нормальним законом, а при числі спостережень менше 30 спостерігається розподіл Стюдента.

3.4.1 Визначення грубих похибок

Грубі похибки визначають на підставі обробки результатів спостережень. Нехай виконано n спостережень, тоді середнє арифметичне значення результатів спостереження знаходять за формулою

$$\bar{X}_n = \sum_{i=1}^n x_i / n, \quad (3.1)$$

де x_i – результати спостережень.

Середнє квадратичне відхилення ряду вимірювань визначається за формулою

$$\sigma_n = \sqrt{(\bar{X}_n - x_i)^2 / (n - 1)}. \quad (3.2)$$

Для виявлення грубих похибок використовується ряд методів (правил, критеріїв) («трьох сигм», Шовіне, Романовського, Грейса та ін.). Наприклад, при застосуванні правила «трьох сигм» грубим вважають результат вимірювання x_i , який при підтановці задовольняє рівняння

$$|\bar{X}_n - x_i| > 3\sigma. \quad (3.3)$$

Результати спостережень із грубими похибками виключаються з подальших розрахунків, і знову знаходять середнє арифметичне:

$$\bar{X}_m = \sum_{i=1}^m x_i / m, \quad (3.4)$$

де m – кількість спостережень після виключення грубих похибок, а також повторно знаходять середнє квадратичне відхилення:

$$\sigma_m = \sqrt{\sum_{i=1}^m (\bar{X}_m - x_i)^2 / (m - 1)}. \quad (3.5)$$

3.4.2 Визначення довірчих меж випадкових похибок вимірювань

Для визначення довірчих меж похибок вимірювань довірчу імовірність беруть такою, що дорівнює $P_\delta = 0,95$.

Спочатку знаходять середньоквадратичне відхилення середнього арифметичного:

$$\sigma(\bar{X}) = \sigma_m / \sqrt{m} = \sqrt{\left[\sum_{i=1}^m (\bar{X} - x_i)^2 \right] / [m \cdot (m - 1)]}. \quad (3.6)$$

Для інтервального оцінювання використовують розподіл Стюдента ($m < 30$) або t -розподіл. Межі довірчого інтервалу $\psi_\delta = t \cdot \sigma(\bar{X})$, де t –

коефіцієнт розподілу Стюдента (табл. 3.1), який залежить від заданої довірчої імовірності P_0 і числа ступенів вільності $k = m - 1$ для $P_0 = 0,95$.

Таблиця 3.1 – Розподіл Стюдента

m	2	3	4	5	6	7	8	9
t	12,71	4,3	3,18	2,78	2,57	2,45	2,36	2,31
m	10	11	13	15	17	19	21	
t	2,26	2,23	2,18	2,14	2,12	2,10	2,09	

Наприклад, при $k = 20$ (або $m = 21$) $t = 2,09$.

3.5 Знаходження результатів вимірювань

Розглянемо методи знаходження результатів прямих і непрямих вимірювань при одно- і багаторазових спостереженнях.

1) *Пряме вимірювання з одноразовим спостереженням* (найпростіший випадок)

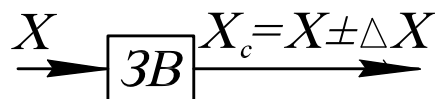


Рисунок 3.1 – Схема прямого вимірювання з одноразовим спостереженням

Результат вимірювання величини X є спостережуване значення X_c ($X = X_c$).

2) *Пряме вимірювання із багаторазовими спостереженнями*

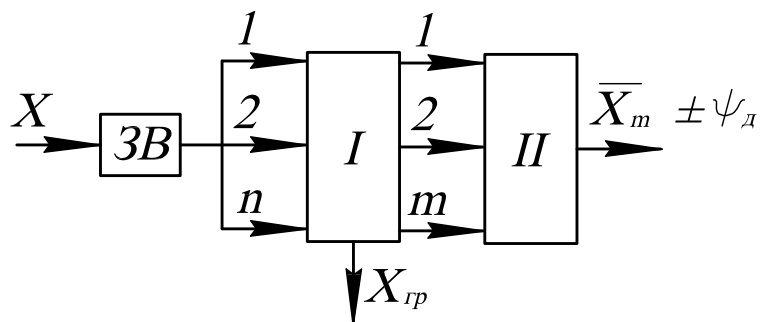


Рисунок 3.2 – Схема прямого вимірювання із багаторазовим спостереженням:

$$I \Rightarrow \bar{X}_n = \sum_{i=1}^n x_i / n, \sigma_n, |\bar{X}_n - x_i| > 3\sigma, \rightarrow X_{гр}; II \Rightarrow \bar{X}_m, \sigma_m, \sigma(\bar{X}_m), \psi_d = t \cdot \sigma(\bar{X}_m);$$

$$X = \bar{X}_m \pm \psi_d - \text{результат вимірювання}$$

3) *Непряме вимірювання* полягає у тому, що вимірювану величину знаходять шляхом розрахунку за певними формулами, до яких входять результати прямих вимірювань двох або декількох величин (наприклад, для

вимірювання холодопродуктивності компресора необхідно виміряти температуру, витрату, тиск, які потім підставляються у відповідну формулу).

Для виконання вимірювань необхідно знати статичний зв'язок між кінцевою побічно вимірюваною величиною Y та величинами, що входять до неї x_1, x_2, \dots, x_N , та вимірюються за допомогою засобів вимірювань $3B_1, 3B_2, 3B_N$.

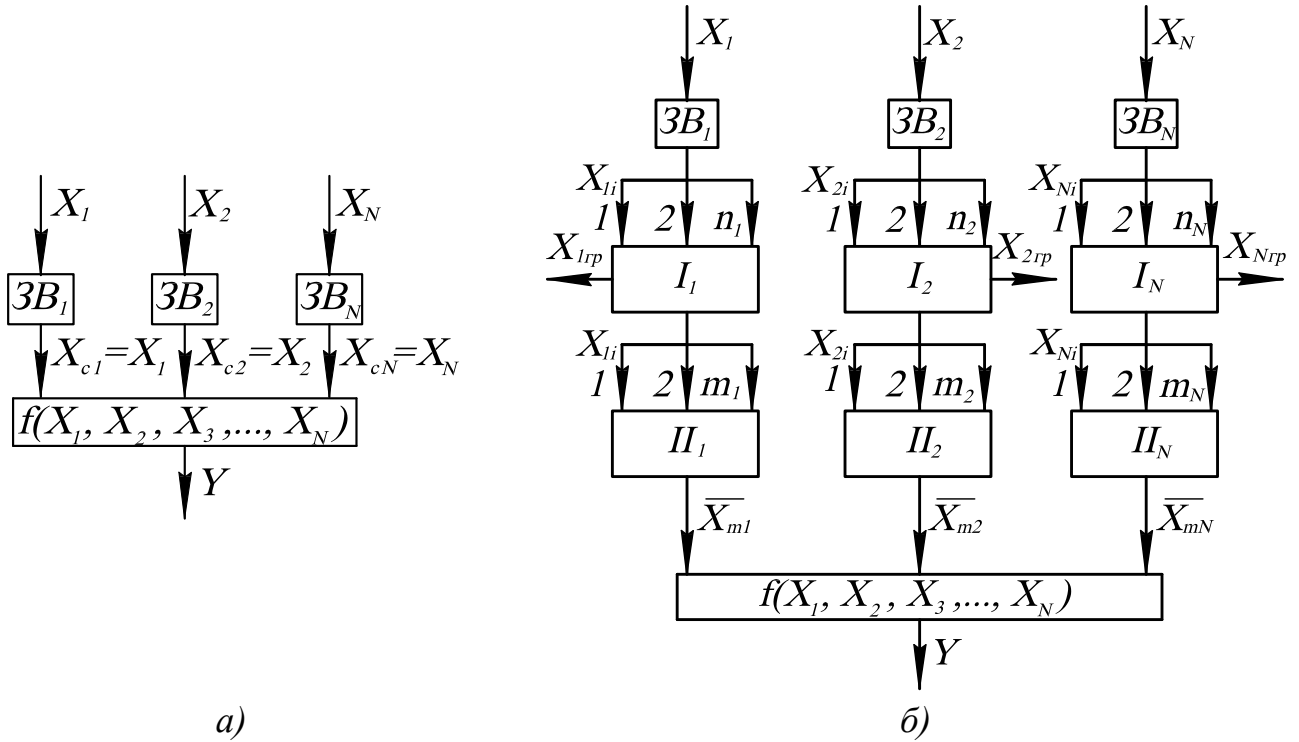


Рисунок 3.3 – Схеми непрямих вимірювань:

- а) непрямі вимірювання з одноразовими спостереженнями;
- б) непрямі вимірювання із багаторазовими спостереженнями

Нехай цей зв'язок може бути описаний функцією $Y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$.

При одноразових спостереженнях кожної величини результати вимірювань збігаються із результатами спостережень $x_1 = x_{c1}, x_2 = x_{c2}, \dots, x_N = x_{cN}$.

Ці величини підставляються у функцію $Y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$. Результат обчислень є результатом непрямого вимірювання.

Схема непрямого вимірювання із багаторазовими спостереженнями: n_1 – число спостережень величини $x_1, n_2 - x_2, \dots, n_N - x_N$ тощо.

Операціями I_1, I_2, \dots, I_N фільтрують результати спостережень із грубими похибками $x_{1 гр}, x_{2 гр}, \dots, x_{N гр}$, після чого залишаються m_1 спостережень величини x_1, m_2 величини x_2, m_N величини x_N тощо. Ці результати спостережень утворюються при операціях II_{1-N} зі знаходження середнього арифметичного значення $x_{m1}, x_{m2}, \dots, x_{mN}$, які є результатами вимірювання вихідних величин.

Отримані результати підставляють у функцію $Y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$, після обчислення якої отримують результат непрямого вимірювання.

3.6 Обчислення сумарних похибок

3.6.1 Складові сумарних похибок

Залежно від числа спостережень і методики їх обробки до розрахунку сумарної похибки можуть вводиться такі складові:

а) *при одноразових спостереженнях, а також при невеликому числі спостережень, що не піддаються статистичній обробці*, до розрахунку вводять невиключену систематичну похибку, яка включає інструментальну, методичну й суб'єктивну складові.

Інструментальна похибка визначається через межі основних і додаткових похибок засобів вимірювань, які зазначаються у технічних характеристиках або у даних індивідуального градування. Методична похибка виявляється аналізом методики вимірювань або експериментально. Суб'єктивна похибка може бути врахована лише умовно. Наприклад, при відліку показів стрілкових приладів суб'єктивну похибку можна взяти такою, що дорівнює половині мінімальної поділки шкали приладу;

б) *при багаторазових спостереженнях* до розрахунку вводять невиключену систематичну похибку і довірчу межу випадкової похибки, що були знайдені на підставі статистичної обробки результатів спостережень.

3.6.2 Обчислення сумарних похибок при однократних спостереженнях

При знаходженні сумарної похибки всі складові розглядаються як випадкові величини із рівномірним розподілом. Межі сумарної похибки, які в даному випадку збігаються з межами невиключеної систематичної похибки, тобто $\Delta x_\Sigma = \Delta x_0$ і $\delta x_\Sigma = \delta x_0$, рекомендується обчислювати за наведеними формулами:

$$\text{– у відносній формі } \delta x_0 = b \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n \delta x_i^2}; \quad (3.7)$$

$$\text{– у абсолютній формі } \Delta x_0 = b \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta x_i^2}, \quad (3.8)$$

де b – коефіцієнт, який при $P_0 = 0,95$ беруть таким, що дорівнює 1,1;
 δx_i – межа i -ї невиключеної систематичної похибки (у відносній формі);

Δx_i – межа i -ї невиключеної систематичної похибки (в абсолютній формі);
 n – кількість складових, що враховуються.

Пряме вимірювання. Якщо пряме вимірювання виконується одним засобом вимірювання, то межа сумарної відносної похибки вимірювання обчислюється за формулою (3.7), яка має вигляд

$$\delta x_0 = b \cdot \sqrt{\delta x_{in}^2 + \delta x_{мет}^2 + \delta x_{суб}^2}, \quad (3.9)$$

де δx_{in} , $\delta x_{мет}$, $\delta x_{суб}$ – межі відносних похибок відповідно інструментальної методичної і суб'єктивної.

Якщо паспортна інструментальна похибка засобу вимірювання задана у вигляді абсолютної похибки, то величина δx_{in} розраховується за формулою

$$\delta x_{in} = \Delta x / x, \quad (3.10)$$

де x – результат вимірювання при декількох вимірюваннях
 $x = \bar{X} = \sum_{i=1}^n x_i / n$.

Якщо паспортна інструментальна похибка засобу вимірювання задана у вигляді зведеної відносної похибки (або класу точності), то величину δx_{in} визначають за формулою

$$\delta x_{in} = \gamma_N \cdot (D / x), \quad (3.11)$$

де γ_N – зведена відносна похибка (або клас точності γ);

D – нормована величина (як правило, діапазон вимірювань).

Методична і суб'єктивна похибки (відносна і абсолютна) обчислюються аналогічно.

Межа сумарної похибки в абсолютній формі розраховується за формулою

$$\Delta x_0 = b \cdot \sqrt{\Delta x_{in}^2 + \Delta x_{мет}^2 + \Delta x_{суб}^2}. \quad (3.12)$$

Часто вимірювання виконується не одним, а декількома засобами, з'єднаними послідовно у вимірювальний ланцюг (наприклад, вимірювання температури за допомогою послідовного з'єднання термоперетворювача опору, передавального нормувального перетворювача і міліамперметра). При цьому кожен із засобів вимірювання характеризується власною паспортною інструментальною похибкою. Кожна з меж інструментальної похибки повинна бути зведена до загального вигляду за формулами для $\delta x_{in} = \Delta x / x$ або $\gamma_N \cdot (D / x)$, причому як результат вимірювання треба брати значення вихідної величини кожного попереднього засобу вимірювання. Наприклад, для термоперетворювача опору вихідною величиною є величина

електричного опору, для нормувального перетворювача – вихідний струм і так далі. Після зазначеної операції знаходять величину

$$\delta x_{in} = b \cdot \sqrt{\delta x_{in1}^2 + \delta x_{in2}^2 + \dots + \delta x_{inN}^2}, \quad (3.13)$$

де $\delta x_{in1}, \delta x_{in2}, \dots, \delta x_{inN}$ – межі відносної інструментальної похибки засобів вимірювань від 1-го до N -го, що входять до вимірювального ланцюга.

Розрахунок меж сумарної похибки виконують за формулою (3.9) із підстановкою у неї значення δx_{in} . Методична і суб'єктивна складові при цьому залишаються тими самими, як і при вимірюванні одним засобом вимірювання.

Визначення сумарної похибки вимірювального ланцюга через абсолютні похибки щодо засобу вимірювання в даному випадку неможливе, оскільки кожна з цих величин може виражатися у різних одиницях.

Непряме вимірювання може бути описане функцією вигляду $Y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$.

Непряме вимірювання передбачає наявність розрахункової формули, що пов'язує результати прямих вимірювань окремих складових величин із побічно вимірюваною величиною:

$$Y = f(A, B, C, D, E, F, \dots, Q), \text{ або } f(x_1, x_2, \dots, x_N). \quad (3.14)$$

Серед змінних A, B, C, \dots, Q можуть бути величини трьох типів:

1) величини, що визначаються шляхом прямих вимірювань (наприклад, величини E, F, \dots, Q , які після виконання цих вимірювань можуть бути подані у стандартній формі: $E = \bar{E} \pm \Delta E$; $F = \bar{F} \pm \Delta F$; ...; $Q = \bar{Q} \pm \Delta Q$;

2) дані установки (наприклад, величини A, B і C), тобто характеристики експериментальної установки, відомі із попередніх (тарувальних) вимірювань; ці величини також мають бути задані в аналогічній формі: $A = \bar{A} \pm \Delta A$; $B = \bar{B} \pm \Delta B$; $C = \bar{C} \pm \Delta C$;

3) табличні величини (наприклад, величина D) – величини, які у даному досліді є сталими та беруться з таблиць.

Таблична величина може бути константою (наприклад, $D = \pi$). У цьому випадку її треба брати з таблиць з такою точністю, щоб відносна похибка D була значно меншою від відносної похибки всіх інших величин, що входять до функціонального виразу для шуканої величини Y .

У загальному випадку

$$\Delta Y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \cdot \Delta x_i \right]^2}, \quad (3.15)$$

де $\partial f / \partial x_i$ – коефіцієнти впливу;

$\delta Y = \Delta Y / Y$ – відносна похибка.

Формули для розрахунку похибок при непрямих вимірюваннях у простих випадках подані у табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Основні залежності з розрахунку похибок непрямих вимірювань

Вигляд функціональної залежності	Абсолютна похибка ΔY	Відносна похибка δY
$Y = A \pm B$	$\sqrt{\Delta A^2 + \Delta B^2}$	$\sqrt{\Delta A^2 + \Delta B^2} / (A \pm B)$; $\delta Y = \Delta Y / Y$
$\begin{cases} Y = A \cdot B \\ Y = A / B \end{cases}$	$\delta Y \cdot Y$	$\sqrt{(\Delta A / A)^2 + (\Delta B / B)^2} = \sqrt{\delta A^2 + \delta B^2}$
$Y = A^\alpha \cdot B^\beta \cdot \dots \cdot Q^\tau$, де $\alpha, \beta, \dots, \tau = \text{const}$	$\delta Y \cdot Y$	$\sqrt{(\Delta A / A)^2 + (\Delta B / B)^2} = \sqrt{\delta A^2 + \delta B^2}$

Критерій незначущості похибки можна записати у вигляді $(\partial f / \partial x_i) \cdot \Delta x_i < 0,3 \cdot \Delta Y$ або $(\partial f / \partial x_k) \sigma(\tilde{x}_k) < 0,3 \cdot \sigma(\tilde{Y})$.

Похибки, що відповідають цьому критерію, називають *незначущими*, або *нікчемно малими*, тому їх не беруть до уваги при обчисленні загальної похибки непрямого вимірювання.

Якщо табличні або експериментальні дані наводяться без запису похибки, то, як правило, вважається, що ця похибка становить $\pm 0,5$ одиниці останнього розряду величини.

3.6.3 Обчислення сумарних похибок при багаторазових спостереженнях

Прямі вимірювання. При багатократних спостереженнях і статистичній обробці їх результатів обчислення меж сумарної похибки вимірювання виконують за формулою

$$\Delta x_\Sigma = k \cdot \sigma_\Sigma, \quad (3.16)$$

де k – коефіцієнт, що залежить від співвідношення випадкової і невиключеної систематичних похибок; σ_Σ – оцінювання сумарного середнього квадратичного відхилення результату вимірювання:

$$\sigma_\Sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^l \Delta x_i^2 / 3 + \sigma^2(\bar{x})}; \quad k = \frac{\Delta x_{\text{eun}} + \Delta x_i}{\sigma(\bar{x}) + \sqrt{\sum_{i=1}^l \Delta x_i^2 / 3}}, \quad (3.17)$$

де Δx_i – межі i -ї невиключеної систематичної похибки; $\sigma(\bar{x})$ – середньоквадратичне відхилення \bar{x}_m ; $\Delta x_{\text{вип}} = t \cdot \sigma(\bar{x}) = \psi_\alpha$ – довірча межа випадкової похибки; $\Delta x_0 = b \cdot \left(\sum_{i=1}^l \Delta x_i^2 \right)^{0,5}$ – межа сумарної невиключеної систематичної похибки.

Розрахунок сумарної похибки спрощується, якщо припустити неточність її обчислення до 15 % від значення Δx_Σ . У цьому випадку рекомендується при $\Delta x_0 / \sigma(\bar{x}) < 0,8$ нехтувати систематичними похибками і вважати, що $\Delta x_\Sigma = \Delta x_{\text{вип}}$, а при $\Delta x_0 / \sigma(\bar{x}) > 8$ нехтувати випадковими похибками і вважати $\Delta x_\Sigma = \Delta x_0$.

Непрямі вимірювання описуються функцією $Y = f(A, B, C, D, E, F, \dots, Q)$ або $f(x_1, x_2, \dots, x_N)$

Спочатку знаходять сумарні похибки вимірювань кожної величини, що входить до шуканої x_1, x_2, \dots, x_N , згідно із попередніми формулами:

$$\Delta x_{1\Sigma} = k \cdot \sigma_{1\Sigma}; \Delta x_{2\Sigma} = k \cdot \sigma_{2\Sigma}; \dots; \Delta x_{N\Sigma} = k \cdot \sigma_{N\Sigma}. \quad (3.18)$$

Загальну сумарну межу похибки для функції вигляду $Y = A \cdot B$ або $Y = A / B$ можна визначити, перетворюючи сумарні абсолютні похибки у відносну форму:

$$\delta x_{1\Sigma} = \Delta x_{1\Sigma} / \bar{x}_1; \delta x_{2\Sigma} = \Delta x_{2\Sigma} / \bar{x}_2; \dots; \delta x_{N\Sigma} = \Delta x_{N\Sigma} / \bar{x}_N \quad (3.19)$$

із подальшою підстановкою їх у формулу

$$\delta Y_\Sigma = b \cdot \sqrt{\delta x_{1\Sigma}^2 + \delta x_{2\Sigma}^2 + \dots + \delta x_{N\Sigma}^2}, \Delta Y = \delta Y_\Sigma \cdot Y. \quad (3.20)$$

Для функцій вигляду $A \pm B$ загальну сумарну похибку отримують шляхом підстановки сумарних похибок складових величин в абсолютній формі

$$\Delta Y_\Sigma = b \cdot \sqrt{\Delta x_{1\Sigma}^2 + \Delta x_{2\Sigma}^2 + \dots + \Delta x_{N\Sigma}^2}. \quad (3.21)$$

За величиною функції ΔY_Σ можна також знайти межу загальної похибки у відносній формі

$$\delta Y_\Sigma = \Delta Y_\Sigma / Y. \quad (3.22)$$

3.7 Наближені обчислення без точного врахування похибок

3.7.1 Значущі цифри

При обробці багаторазових вимірювань про похибку наближеного значення величини (числа) судять за кількістю правильних значущих цифр у цьому числі.

Нулі, що стоять у числі зліва, значущими цифрами не вважаються. Нулі у середині або у кінці числа (справа), що позначають відсутність у числі одиниць відповідних розрядів, вважаються *значущими цифрами*. Наприклад, у числі 0,006020 перші три нулі – не значущі, 4-й і 5-й – значущі.

Нулі, поставлені у кінці цілого числа замість невідомих цифр, які необхідні лише для визначення розрядів останніх цифр, значущими не вважаються. У подібних випадках нулі у кінці числа краще не писати і замінити їх на відповідний степінь числа 10. Наприклад, якщо число 7300 виміряне з абсолютною похибкою ± 100 , то це число повинне бути записане у вигляді $7,3 \cdot 10^3$ (або $73 \cdot 10^2$). Такий запис підкреслює, що в даному числі містяться лише дві значущі цифри.

3.7.2 Правила округлення

Якщо наближене значення величини містить зайві або недостовірні цифри, то його *округлюють*, зберігаючи лише верхні значущі цифри і відкидаючи зайві. При цьому керуються такими *правилами округлення*:

1) якщо перша відкинута цифра більша від 4, то остання цифра, що зберігається, збільшується на одиницю, наприклад, округлюючи число 43,267 до сотих, необхідно записати 43,27;

2) якщо перша відкинута цифра менша від 4 або дорівнює 4, то остання цифра залишається незмінною. Наприклад, округлюючи число 32748 до сотень, записують $327 \cdot 10^2$ (або $3,27 \cdot 10^4$);

3) якщо відкинута частина числа складається з однієї цифри 5, то число округлюють так, щоб остання цифра, що зберігається, була парною. Наприклад, при округленні до десятих $24,75 \approx 24,8$, але $34,25 \approx 34,2$.

3.7.3 Правила підрахунку цифр

Виконуючи різні математичні дії з наближеними числами, керуються такими *правилами підрахунку цифр*:

а) при додаванні та відніманні у результаті зберігають стільки десяткових знаків, скільки їх міститься у числі з найменшою кількістю десяткових знаків;

б) при множенні і діленні у результаті зберігають стільки значущих цифр, скільки їх має наближене число з найменшою кількістю значущих цифр.

Вийняток із цього правила допускається у тих випадках, коли один із співмножників починається з одиниці, а співмножник, що містить найменшу кількість значущих цифр, – з якої-небудь іншої цифри. У цих випадках у

результаті зберігають на одну цифру більше, ніж у числі з найменшою кількістю значущих цифр;

в) результат розрахунку значень функцій, x^n , $\sqrt[n]{x}$ і $\lg x$ деякого наближеного числа x повинен містити стільки значущих цифр, скільки їх є у числі x ;

г) при обчисленні проміжних результатів зберігають на одну цифру більше, ніж рекомендують правила а – в (так звана запасна цифра). У кінцевому підсумку запасна цифра відкидається;

д) якщо деякі наближені числа містять більше десяткових знаків (при додаванні та відніманні) або більше значущих цифр (при множенні, діленні, піднесенні до ступеня, $\sqrt[n]{x}$, $\operatorname{tg} x$ тощо), ніж інші, то їх заздалегідь округлюють, зберігаючи лише одну зайву цифру.

Приклад 1. Перед додаванням наближених чисел 0,374; 13,1 і 2,065 перше і третє з них необхідно округлити до сотих, а в кінцевому підсумку соті відкинути:

$$13,1 + 2,06 + 0,37 \approx 15,5.$$

Приклад 2. Результат розрахунку виразу повинен містити лише дві значущі цифри (за кількістю значущих цифр у числі 7,2):

$$68,04 \cdot 7,2 / 20,1 \approx 68,0 \cdot 7,2 / 20,1 \approx 24,4 \approx 24.$$

Приклад 3. Результат перемноження чисел 13,27 і 0,84 можна записати із трьома значущими цифрами (див. виняток із правила б) – співмножник починається з одиниці:

$$13,27 \cdot 0,84 \approx 13,3 \cdot 0,84 \approx 11,2 \text{ (а не 11)}.$$

Приклад 4. При піднесенні до куба наближеного числа 216 результат повинен бути записаний лише із трьома значущими цифрами:

$$216^3 \approx 101 \cdot 10^5.$$

3.8 Оцінювання результату і похибки сукупних і спільних вимірювань з багатократними спостереженнями

При сукупних і спільних вимірюваннях шукані величини знаходять із розв'язання системи рівнянь $\{F_i(x_1, x_2, \dots, x_n; Y_1, Y_2, \dots, Y_m; k_{i1}, k_{im}) = 0$,

де x_i – вимірювані величини; Y_i – шукані; k_{im} – відомі.

Як правило, кількість вимірювань (багаторазові) значно перевищує кількість шуканих змінних. Результати багаторазових спостережень у кожному експерименті можна обробити так само, як і для непрямих вимірювань. Через похибки та наявність зайвого числа рівнянь виникають відхилення.

Сьогодні для обробки експериментальних даних при виконанні спільних і сукупних вимірювань у більшості випадків застосовують *метод Лежандра*, який також називають *методом найменших квадратів*.

Суть цього методу полягає у такому. Якщо у систему рівнянь (1.1), які мають загальний вигляд

$$F_i(x_1, x_2, \dots, x_n; Y_1, Y_2, \dots, Y_m; k_{i1}, k_{im}) = 0, \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3.23)$$

підставити значення величин x_1, x_2, \dots, x_n , отриманих як результати спостережень (вимірювань), то її можна записати рівняннями вигляду

$$F_i(Y_1, Y_2, \dots, Y_j, \dots, Y_m) = 0, \quad (i = 1, 2, \dots, n). \quad (3.24)$$

Ця система містить лише шукані фізичні величини і сталі коефіцієнти. Число n дорівнює загальному числу спостережень вимірюваних величин x_i (у тому числі результати повторних спостережень однієї й тієї самої величини). Через обмежену точність вимірювань величин x_i при числі спостережень n , яке значно перевищує число невідомих m , неможливо знайти також значення невідомих Y_j та їх оцінок \tilde{Y}_j , що є найкращими наближеннями до дійсних значень.

Рівняння (3.24), на відміну від звичайних математичних рівнянь, прийнято називати *умовними*, оскільки підстановка у них знайдених яким-небудь шляхом значень оцінок \tilde{Y}_j не обертає рівняння на нуль:

$$F_i(\tilde{Y}_1, \tilde{Y}_2, \dots, \tilde{Y}_j, \dots, \tilde{Y}_m) = 0, \quad (i = 1, 2, \dots, n). \quad (3.25)$$

Для того щоб ці рівняння перетворилися на тотожність, їх необхідно записати у вигляді

$$F_i(\tilde{Y}_1, \tilde{Y}_2, \dots, \tilde{Y}_j, \dots, \tilde{Y}_m) + v_i = 0, \quad (i = 1, 2, \dots, n). \quad (3.26)$$

Величини v_i прийнято називати *відхиленнями*, або *залишковими похибками*, рівнянь.

Згідно з *методом найменших квадратів* найкращі оцінки величин \tilde{Y}_j можуть бути знайдені в тому випадку, якщо функція Ω , що є сумою квадратів залишкових похибок умовних рівнянь, буде мінімальною

$$\Omega = \sum_{i=1}^n v_i^2 = \min.$$

Суть методу найменших квадратів може бути з'ясована при розгляді визначення параметрів a і b лінійної залежності $\xi = a \cdot \varphi + b$. Нехай у результаті експериментальних досліджень знайдені пари значень ξ_i і φ_i . Відповідно до методу найменших квадратів для прямої, яка найкраще проходить щодо всіх n точок, отриманих у результаті експериментальних

досліджень, значення a і b повинні бути вибрані такими, щоб функція $\Omega = \sum_{i=1}^n v_i^2$ була мінімальною.

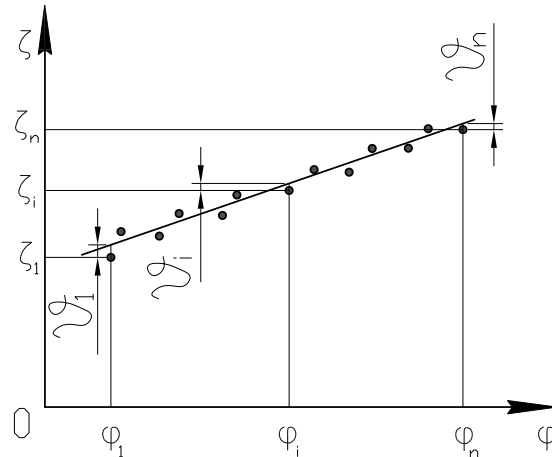


Рисунок 3.4 – До визначення суті методу найменших квадратів

Розглянемо послідовність обробки експериментальних даних сукупних або спільних вимірювань для найбільш важливого випадку, коли до системи (3.24) входять лише лінійні незалежні рівняння вигляду

$$X_i = \sum_{j=1}^m (k_{ij} Y_j), \quad (i = 1, 2, \dots, n). \quad (3.27)$$

Для простоти розберемо спочатку однофакторну лінійну регресію залежної змінної ξ на єдину незалежну (або контрольовану) змінну φ . Це рівняння з одним невідомим $\xi_c = a \cdot \varphi + b$. Потрібно отримати такі вирази a і b , щоб сума квадратів відхилень ξ від цієї прямої була мінімальною. Нехай ξ_c – точне значення ξ при будь-якому значенні φ і, отже, $(\xi - \xi_c)$ – відхилення при будь-якому значенні φ . Необхідно мінімізувати величину $\sum (\xi - \xi_c)^2$, або, що те саме $\sum (\xi - a\varphi - b)^2$. У цьому випадку повинні виконуватися такі співвідношення:

$$\partial \sum_{i=1}^n (\xi - a\varphi - b)^2 / \partial b = 0 \quad \text{и} \quad \partial \sum_{i=1}^n (\xi - a\varphi - b)^2 / \partial a = 0. \quad (3.28)$$

Якщо є n відліків, то перше рівняння набирає вигляду $n \cdot b + a \cdot \sum \varphi = \sum \xi$ (тут $\sum b = n \cdot b$), а інше рівняння запишеться так: $b \cdot \sum \varphi + a \cdot \sum \varphi^2 = \sum \xi \cdot \varphi$.

Останні два рівняння утворюють систему нормальних рівнянь.

Розв'язуючи ці два рівняння як систему, знаходимо a і b :

$$\begin{cases} b = (\sum \varphi^2 \cdot \sum \xi - \sum \varphi \cdot \sum (\xi \cdot \varphi)) / [n \cdot \sum \varphi^2 - (\sum \varphi)^2] = \bar{\xi} - a \cdot \bar{\varphi}; \\ a = (n \cdot \sum (\varphi \cdot \xi) - \sum \varphi \cdot \sum \xi) / [n \cdot \sum \varphi^2 - (\sum \varphi)^2], \end{cases} \quad (3.29)$$

де $\bar{\xi} = \sum_{i=1}^n \xi_i$, $\bar{\varphi} = \sum \varphi_i / n$.

Якщо відомо, що функція $\xi = f(\varphi)$ проходить через початок координат, то у цьому випадку $b = 0$, і ми отримуємо простіший вираз для a :

$$a = \sum (\varphi \cdot \xi) / \sum \varphi^2. \quad (3.30)$$

Припущення про спосіб отримання даних для застосування методу найменших квадратів:

1) умовне математичне сподівання ξ при відповідних φ має лінійну залежність;

2) умовна дисперсія $\text{var}(\xi / \varphi)$ не залежить від величини x , тому $\text{var}(\xi / \varphi) = \sigma^2$, де $\sigma = \text{const}$; ця властивість має назву *гомоскедастичність*, а самі дисперсії називають гомоскедастичними;

3) умовний розподіл ξ при відповідних φ є нормальним;

4) результати спостережень над різними об'єктами можна вважати незалежними випадковими величинами.

Якість апроксимації – середнє квадратичне відхилення від побудованої прямої:

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\xi_i - a \cdot \varphi_i - b)^2 / (n-2)}. \quad (3.31)$$

Статистика S^2 оцінює дисперсію відхилень від лінії регресії. Цією формулою доцільно користуватися при застосуванні ЕОМ при розрахунках. При розрахунках уручну зручніше застосовувати вираз

$$S = \sqrt{\left[\sum_{i=1}^n \xi_i^2 - a \cdot \sum_{i=1}^n (\varphi_i \cdot \xi_i) - b \cdot \sum_{i=1}^n \xi_i \right] / (n-2)}. \quad (3.32)$$

Величина S^2 називається *залишковою дисперсією*, а S – *середньою квадратичною залишковою похибкою*.

Довірчі інтервали отриманої функції будуть міститися в діапазоні

$$a - \frac{t_{n-2;1-\kappa} \cdot S}{\sqrt{\sum (\varphi_i - \bar{\varphi})^2}} < \alpha < a + \frac{t_{n-2;1-\kappa} \cdot S}{\sqrt{\sum (\varphi_i - \bar{\varphi})^2}}. \quad (3.33)$$

де $t_{n-2;1-\kappa}$ – точка t – розподілу Стюдента з $(n-2)$ степенями вільності, κ – імовірність похибки.

$$b - t_{n-2;1-\gamma} \cdot \left[\frac{1}{n} + \frac{\bar{\varphi}^2}{\sum(\varphi_i - \bar{\varphi})^2} \right]^{0,5} \cdot S < \beta < b + t_{n-2;1-\gamma} \cdot \left[\frac{1}{n} + \frac{\bar{\varphi}^2}{\sum(\varphi_i - \bar{\varphi})^2} \right]^{0,5} \cdot S. \quad (3.34)$$

Якщо при сукупних або спільних вимірюваннях умовні рівняння є нелінійними, то спочатку застосовують їх лінеаризацію (будують графік у логарифмічних (напівлогарифмічних, гіперболічних тощо) координатах).

Для цього функцію $Y = f(x)$ перетворюють у лінійну функцію (див. табл. 3.3) $\tilde{Y} = a \cdot \tilde{x} + b$ шляхом заміни змінних: $\tilde{x} = \varphi(x)$; $\tilde{Y} = \psi(Y)$.

Після побудови лінійної залежності $\tilde{Y} = a \cdot \tilde{x} + b$ для вихідних змінних утворюється залежність вигляду $\psi(Y) = a \cdot \varphi(x) + b$.

Таблиця 3.3 – Лінеаризація функцій

Назва функції	Формула	Заміна змінних	Отримана лінійна функція	Обернена функція
Показникова	$y = a \cdot x^b$ $y = a \cdot e^{bx}$	$\tilde{x} = \lg x$, $\tilde{Y} = \lg y$ $\tilde{Y} = \ln y$	$\tilde{Y} = \lg a + b \cdot \tilde{x}$ $\tilde{Y} = \ln a + b \cdot x$	$y = 10^{\tilde{Y}}$ $y = e^{\tilde{Y}}$
Дрібнолінійна Логарифмічна Степенева Гіперболічна	$y = (a + b \cdot x)^{-1}$ $y = a + b \cdot \ln x$ $y = a \cdot x^b$ $y = a + b/x$	$\tilde{Y} = 1/y$ $\tilde{x} = \ln x$ $\tilde{Y} = \ln y$; $\tilde{x} = \ln x$ $\tilde{x} = 1/x$	$\tilde{Y} = a + b \cdot x$ $\tilde{Y} = a + b \cdot x$ $\tilde{Y} = \ln a + b \cdot \tilde{x}$ $\tilde{Y} = a + b \cdot \tilde{x}$	$y = 1/\tilde{Y}$ $y = \tilde{Y}$ $y = e^{\tilde{Y}}$ $y = \tilde{Y}$

КОНТРОЛНІ ЗАПИТАННЯ

1. У чому полягають відмінності підходів при застосуванні одноразових та багаторазових вимірювань?
2. Наведіть правила округлення результатів вимірювань.
3. Що таке систематична похибка? Її види та способи виявлення.
4. Що таке випадкова похибка? Її види та способи виявлення.
5. Опишіть правило «трьох сигм». З якою метою його застосовують?
6. Що таке критерій Стюдента? З якою метою його застосовують?
7. У чому полягає відмінність методик виконання прямого та непрямого вимірювання?
8. Як виконують розрахунок сумарної похибки при одноразових прямих вимірюваннях?

9. Як виконують розрахунок сумарної похибки при багаторазових прямих вимірюваннях?
10. Як виконують розрахунок сумарної похибки при одноразових непрямих вимірюваннях?
11. Як виконують розрахунок сумарної похибки при багаторазових непрямих вимірюваннях?
12. Що таке критерій незначущості похибки?
13. Що таке значущі цифри та де їх застосовують?
14. Дайте визначення правил округлення результатів.
15. Дайте визначення правил підрахунку цифр.
16. Суть методу найменших квадратів? Де та як його застосовують для обробки експериментальних даних при виконанні спільних та сукупних вимірювань?
17. Основні припущення методу Лежандра?
18. Як оцінюють якість апроксимації лінеаризованої функції, отриманої із застосуванням методу Лежандра?

4 СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЇ (електричні, пневматичні, гідравлічні)

4.1 Загальні відомості

Системи передачі вимірювальної інформації призначені для збирання інформації з віддалених від спостерігача об'єктів (телевимірювальні, від грецьк. *tele* – далеко). Телевимірювальні системи близької дії називаються системами дистанційної передачі (від декількох метрів до (10 – 20) км.). Інформація каналами зв'язку передається у формі сигналів. Носіями сигналів є електромагнітні коливання, електричний струм, звукові хвилі, тиск газу або рідини. Нанесення інформації на носій називається *модуляцією*, розшифрування інформації – *демодуляцією* та реалізується на пристрої, який називають *модемом*. Відомо більше 10 видів модуляції, найбільш поширена пряма і частотна. Сигнали можуть бути «природними» і уніфікованими.

Основні види уніфікованих сигналів – електричні (сталий струм I , стала напруга U , змінна напруга або частота), пневматичні і гідравлічні фізичні величини, наприклад, тиск. Відповідно існують такі основні системи передачі сигналів (інформації): пневматична, електрична струмова і електрична частотна. На практиці також використовуються реостатна, індуктивна, диференціально-трансформаторна, феродинамічна, сельсинна й інші системи.

Системи передачі інформації побудовані за блоково-модульним принципом за такими схемами:

А) технологічний сигнал → зусилля → уніфікований сигнал;

Б) технологічний сигнал → переміщення → уніфікований сигнал.

Первинні вимірювальні перетворювачі можуть працювати за принципами:

А) сила → тиск (пневмосилові);

Б) сила → струм (електросилові).

Первинні вимірювальні перетворювачі базуються на переміщенні і працюють за таким алгоритмом «переміщення → струм» та реалізуються магнітно-модуляційними перетворювачами.

4.2 Пневматична система передачі вимірювальної інформації

Застосовується у тих випадках, коли за умовами за технікою безпеки неможливе використання електричних систем передачі. Пневматична система передачі забезпечує надійну передачу інформації до 300 м, із спеціальними підсилювачами – до 600 м.

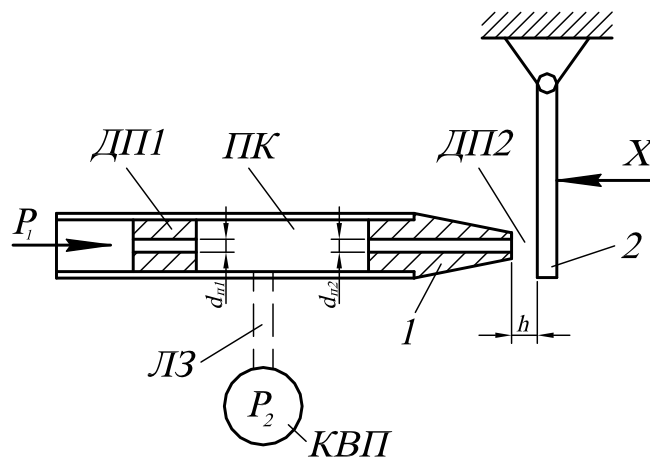


Рисунок 4.1 – Принципова схема пневматичної системи передачі вимірювальної інформації.

Умовні позначення: ДП1 – дросельний пристрій сталого опору; ДП2 – дросельний пристрій змінного опору; ЛЗ – лінія зв'язку; КВП – камера вторинного приладу; ПК – припливна камера; 1 – сопло; 2 – заслінка, що виконує роль суматора; p_1 – сталий тиск (налаштовувач); p_2 – керуючий тиск вторинного приладу; x – керуючий вплив на суматор 2; h – зазор між соплом та заслінкою, який регулює втрати тиску у ДП2 та тиск p_2 ; $d_{дп1}$ та $d_{дп2}$ – діаметри прохідних перерізів дроселів ДП1 та ДП2

Канал зв'язку (ЛЗ) являє собою пластмасову або металеву трубку, яка має діаметр (4–10) мм (рис. 4.1). Стиснуте повітря, очищене від пилу, вологи і мастила, зі сталим тиском p_1 подається від джерела живлення до дроселя сталого опору ДП1 та надходить у припливну камеру ПК. Повітря з ПК через сопло 1, що прикривається заслінкою 2, виходить в атмосферу. Сопло 1 разом із заслінкою 2 утворюють керований дросель змінного опору ДП2. Дроселі ДП1 і ДП2 утворюють припливну камеру ПК, яку також називають сопловою. Вона з'єднана лінією зв'язку ЛЗ із камерою вторинного приладу КВП, яку називають вимірювальною.

Заслінка 2 пересувається під впливом вимірюваного параметра x щодо сопла 1. При цьому змінюється прохідний переріз дроселя ДП2, що призводить до виникнення керуючого впливу та визначає значення тиску p_2 .

Характеристика перетворювача типу «сопло – заслінка» подана на рис. 4.2.

Величина переміщення заслінки, як правило, дуже незначна і становить (0,02–0,05) мм. Тому перетворити з високою точністю значення вимірюваної величини дуже важко. У реальних умовах схема перетворення ускладнюється. Вимірювана величина за допомогою чутливого елемента перетвориться у пропорційне механічне переміщення, що змінюється в межах декількох міліметрів, або у зусилля, що змінюється у межах декількох кілоньютонів. Подальше перетворення такого значного переміщення (або

зусилля) у пропорційний пневматичний сигнал найчастіше здійснюється компенсаційним методом. Компенсаційний метод перетворення полягає в тому, що величина вихідного сигналу компенсує величину вхідного.

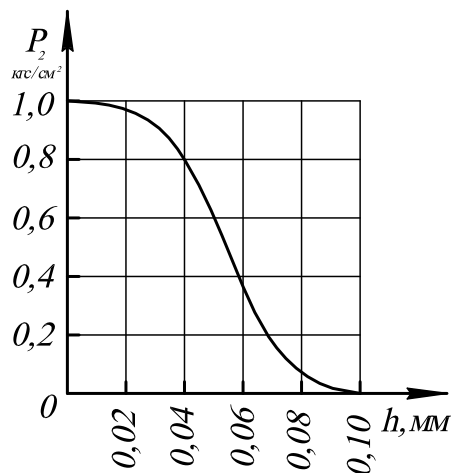


Рисунок 4.2– Характеристика перетворювача типу «сопло – заслінка»

4.3 Електрична система передачі вимірювальної інформації із уніфікованим струмовим сигналом

У цій системі використовується сталий електричний струм, що підвищує її перешкодостійкість, оскільки виключає вплив індуктивності і ємності ліній зв'язку на сигнал вимірювальної інформації і збільшує протяжність каналу зв'язку до (5 – 20) км.

Приймачами інформації в електричних системах передачі можуть бути проміжні перетворювачі, регулятори, вимірювальні прилади або ЕОМ.

Як джерела інформації в електричних системах передачі з уніфікованим струмовим сигналом застосовуються первинні вимірювальні перетворювачі, оснащені перетворювачами типу «сила → струм» або «переміщення → струм» (механізм магнітоелектричний).

4.4 Електрична система передачі вимірювальної інформації з уніфікованим частотним сигналом

Перетворення сигналу відбувається за схемою «параметр → сила → частота».

Перетворювач типу «сила → частота» реалізується на базі струнного генератора з мостовою схемою, яка подана на рис. 4.3.

Струна розміщена між полюсами сталого магніту. Нижній кінець струни жорстко закріплений на нерухомій основі, а верхній – на рухомому важелі.

При проходженні по струні змінного струму вона починає коливатися і у ній індукується ЕРС, сигнал якої наближений до синусоїдального.

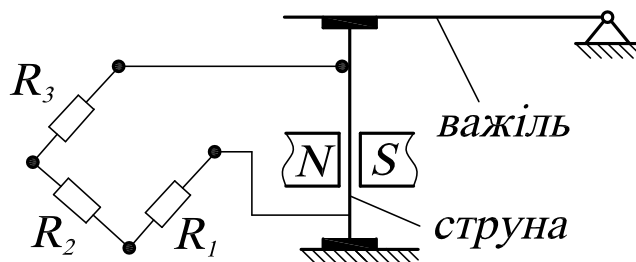


Рисунок 4.3 – Струнний генератор із мостовою схемою

Приймачами вимірювальної інформації, що надходить від первинного вимірювального перетворювача з уніфікованим частотним сигналом, можуть бути рухомі пристрої, керуючі та обчислювальні машини. Клас точності 0,5 і 1,0; дальність передачі інформації – до 10 км.

4.5 Сельсинна система передачі вимірювальної інформації

Сельсинні системи застосовують для передачі на відстань великих кутових переміщень.

Сельсини – це електричні мікромашини змінного струму. Робота сельсинів базується на перетворенні кутового переміщення у зміну індуктивного зв'язку між обмотками збудження та синхронізації.

Схема сельсинної передачі: чутливий елемент → сельсин-датчик → лінія зв'язку → сельсин-приймач → відліковий пристрій. Чутливий елемент кінематично зв'язаний із ротором сельсина-датчика, а сельсин-приймач – із відліковим пристроєм. Відстані між сельсином-датчиком і сельсином-приймачем можуть становити до (2–3) км. Абсолютні похибки сельсина-давача $\pm (0,25 - 1)^\circ$, сельсина-приймача $\pm (0,75 - 2,5)^\circ$.

4.6 Пневмоелектричні та електропневматичні перетворювачі

У системах автоматичного керування виробничими процесами використовуються засоби вимірювання з різними вхідними і вихідними сигналами: пневматичними, електричними, гідравлічними тощо. Для обміну інформацією у таких системах широко застосовуються перетворювачі пневматичних сигналів в електричний і електричних сигналів у пневматичний, принципові схеми яких подані на рис. 4.4 та 4.5.

Принцип дії пневмоелектричного перетворювача (рис. 4.4) полягає у перетворенні переміщення трубки Бурдона I під дією тиску $p_{\text{вх}}$ у електричний

сигнал (сталий струм $I_{вих}$), що утворюється у контурі сталого магніту 8 та котушки зворотного зв'язку 7, яка жорстко закріплена на важелі 3 та рухається під дією результуючого сигналу R_1 . Перетворювач має обмежувач, який складається з металевого прапорця 4, жорстко закріпленого на важелі 3, плоскої котушки 5, з'єднаної з перетворювачем індуктивного опору у сигнал сталого струму. Роль обмежувача – відімкнення перетворювача від живлення за відсутності керуючого пневматичного сигналу.

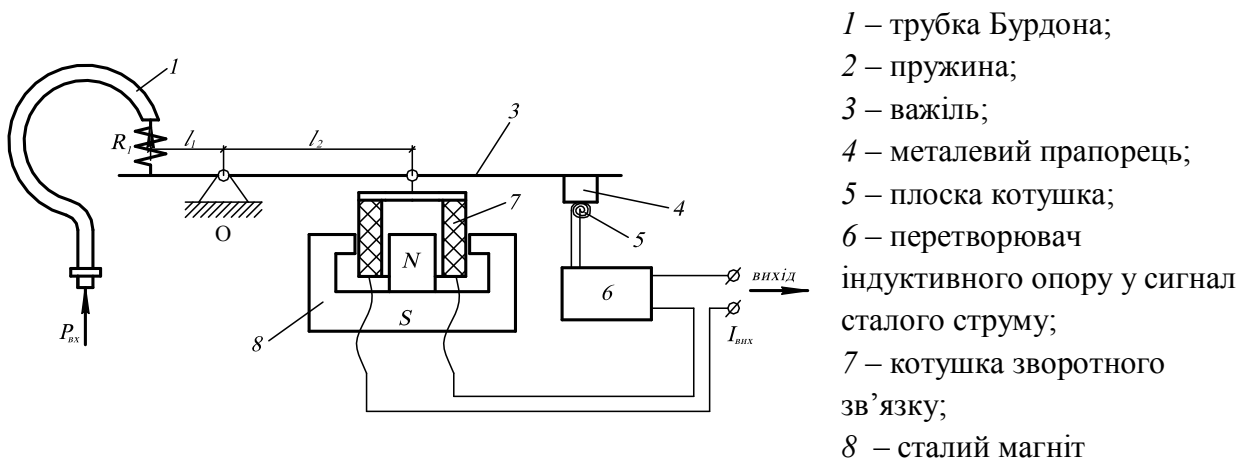


Рисунок 4.4 – Принципова схема пневмоелектричного перетворювача

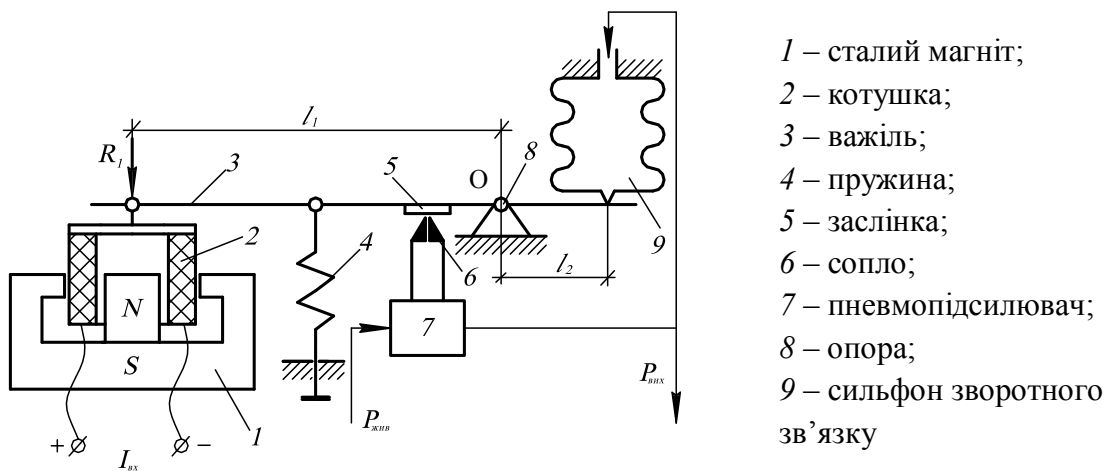


Рисунок 4.5 – Принципова схема електропневматичного перетворювача

Принцип дії електропневматичного перетворювача (рис. 4.5) полягає у перетворенні лінійного переміщення котушки 2, що знаходиться у магнітному полі сталого магніту 1, під впливом зміни керуючої сили струму $I_{вх}$ на зміну вихідного тиску $p_{вих}$. Налаштовувачем перетворювача є пружина 4. Переміщення котушки 2 є незначним, тому у перетворювачі застосовується пневмопідсилювач 7, який отримує пневматичне живлення $p_{жив}$. Вихідний сигнал $p_{вих}$ створюється у сильфонному чутливому елементі 9.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Для чого призначені та як працюють телевимірювальні системи?
2. Які основні принципи передачі інформації телевимірювальних систем, побудованих за блоково-модульним принципом?
3. Які основні принципи роботи первинних вимірювальних перетворювачів телевимірювальних систем?
4. Опишіть принципову схему та принцип дії пневматичної системи передачі вимірювальної інформації.
5. Опишіть принцип дії електричної системи з уніфікованим струмовим сигналом передачі вимірювальної інформації.
6. Опишіть принципову схему та принцип дії електричної системи з уніфікованим частотним сигналом передачі вимірювальної інформації.
7. Опишіть принцип дії сельсинної системи з передачі вимірювальної інформації.
8. Опишіть принципову схему та принцип дії пневмоелектричного перетворювача.
9. Опишіть принципову схему та принцип дії електропневматичного перетворювача.

РОЗДІЛ II ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛОТЕХНІЧНИХ ВЕЛИЧИН

5 ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

5.1 Загальні відомості

Температурою називають величину, що характеризує тепловий стан тіла. Згідно з молекулярно-кінетичною теорією температура є умовною статистичною величиною, яка прямо пропорційна середній кінетичній енергії молекул тіла ($\frac{m \cdot v^2}{2} = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T$ поступальної ходи, де $k = 1,380662 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – стала Больцмана).

Виміряти безпосередньо температуру, як, наприклад, лінійні розміри, неможливо. Тому температуру визначають непрямими методами за зміною фізичних властивостей різних тіл, що отримали назву *термометричних*. Наприклад, об'ємне розширення, зміна електричного опору, термоЕРС тощо.

Для визначення рівня теплового стану, що змінюється, необхідно мати температурну шкалу, для побудови якої використовують дві реперні точки t_1 і t_2 . Як правило, це температури фазової рівноваги, яким надають довільні значення і вважають, що термометрична властивість E використовуваної у термометрі речовини лінійно змінюється з температурою t :

$$t = k \cdot E + D,$$

де k – коефіцієнт пропорційності; $D = const$.

На цьому принципі ґрунтуються шкали *Фаренгейта* ($^{\circ}F$), *Реомюра* ($^{\circ}R$) і *Цельсія* ($^{\circ}C$).

У шкалі Фаренгейта за початкову точку береться температура суміші снігу із нашатирем або кухонною сіллю. Температура замерзання чистої води становить $32^{\circ}F$. У шкалах Реомюра і Цельсія за нуль береться температура замерзання чистої води, а температура кипіння – $80^{\circ}R$ і $100^{\circ}C$.

Перерахунок температур: $n^{\circ}C = 0,8^{\circ}R = (1,8 \cdot n + 32)^{\circ}F$.

Проте з розвитком вимірювальної техніки було виявлено, що покази термометрів не збігаються, особливо при високих і дуже низьких температурах.

Точнішими є газові температурні шкали, наприклад, воднева.

У середині XIX століття лорд Кельвін (Вільям Томсон, 1824–1907) запропонував термодинамічну температурну шкалу, що базується на другому законі термодинаміки, яка не залежала від властивостей термометричної речовини

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{Q_2}{Q_1}. \quad (5.1)$$

Один градус за термодинамічною шкалою (K) відповідає такому підвищенню температури, яке дорівнює 1/100 частини роботи за циклом Карно між точками плавлення льоду і кипіння чистої води при нормальному атмосферному тиску. Співвідношення між Кельвіном і градусом Цельсія таке:

$$T, K = t, ^\circ C + 273,15. \quad (5.2)$$

У виробничій практиці зараз застосовується міжнародна практична температурна шкала МПТШ-68, встановлена для інтервалу температур від 13,81 до 6300 K . МПТШ-68 базується на еталонних приладах і 11 реперних точках, які мають точні значення температур. Вони відтворюються з високою точністю за допомогою фазових рівноважних ряду чистих речовин.

Термометр – це прилад, який застосовується для вимірювання температури шляхом перетворення її у показання або сигнал, що є відомою функцією температури.

Частина термометра, що перетворює теплову енергію на інший вид енергії, має назву *чутливий елемент*.

Усі відомі прилади для контролю температури можна розділити на дві великі групи: контактні і безконтактні. Межі застосування термометрів наведені у табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Види термометрів та межі їх вимірювань

Термометрична властивість	Прилад	Межі тривалого застосування	
		нижня	верхня
Теплове розширення	Рідинні скляні термометри	-200	750
	Дилатометричні і біметалічні термометри	-60	1000
Зміна тиску	Манометричні термометри	-150	600
Зміна електричного опору	Електричні термометри опору	-200	650
	Напівпровідникові тензорезистори	-270	300
Термоелектричний ефект (термоЕРС)	Стандартні термоелектричні термометри	-200	2500
	Спеціальні	-270	3000
Теплове випромінювання	Пірометри оптичні	700	6000
	Радіаційні	20	3000
	Фотоелектричні	600	4000
	Колірні	1400	2800

Термокомплект називають вимірювальну установку, що складається з термометра, що не має власної шкали, і вторинного приладу, що перетворює вихідний сигнал термометра у числову величину.

5.2 Рідинні термометри розширення

Скляні рідинні термометри мають свої *переваги*: висока точність, низька вартість і простота експлуатації, та *недоліки*: погана видимість шкали, неможливість автоматичного запису, передачі показів на відстань і ремонту.

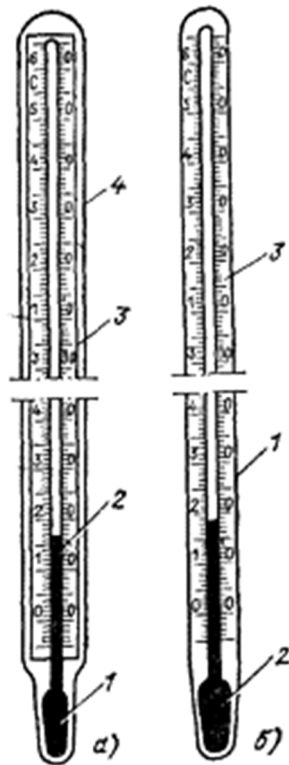


Рисунок 5.1 – Лабораторні ртутні термометри: *а* – паличковий; *б* – із вкладеною шкалою

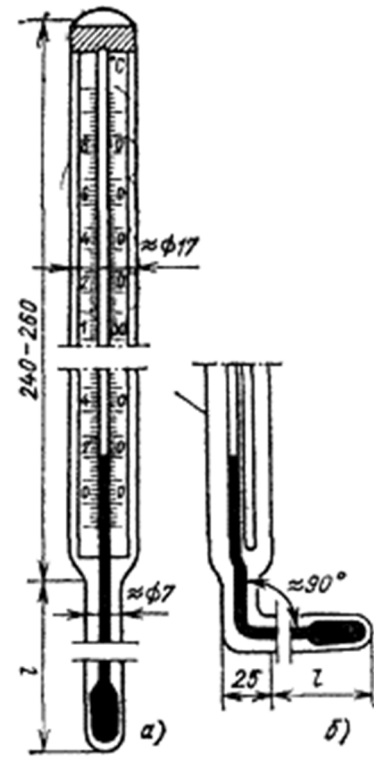


Рисунок 5.2 – Технічні скляні термометри: *а* – прямий; *б* – кутовий

Термометричні рідини, які найчастіше застосовуються у рідинних термометрах розширення: ртуть, а також органічні наповнювачі (толуол, етиловий спирт, гас, пентан та ін.)

Конструктивно цей тип термометрів поділяється на паличкові і з вкладеною шкалою, за формою – на прямі і кутові (рис. 5.1, 5.2).

Залежно від призначення поділяються на зразкові, лабораторні, технічні, побутові, метеорологічні, медичні, для сільського господарства.

Для завдань регулювання і сигналізації розроблені електроконтактні термометри.

За методом градування термометри розширення можуть встановлюватися:

- 1) при повному зануренні (до поділки, яка відлічується);
- 2) при заданій глибині занурення.

Похибки рідинних термометрів

Допустимі похибки вимірювань технічних термометрів не повинні перевищувати однієї поділки шкали. Так, при ціні поділки 1°C $\Delta = \pm 1^{\circ}\text{C}$; $2^{\circ}\text{C} \Rightarrow \Delta = \pm 2^{\circ}\text{C}$.

Для інших термометрів абсолютна допустима похибка Δ може перевищувати ціну поділки. Так, лабораторні $0,01^{\circ}\text{C}$, $\Delta = \pm 0,03^{\circ}\text{C}$.

Принцип дії термометрів розширення базується на розширенні термометричної рідини, яка знаходиться у термометрі, залежно від температури.

Основними елементами конструкції термометра є резервуар із припаяним до нього капіляром і шкала.

Конструктивно розрізняються паличкові термометри і з вкладеною шкалою. У паличкових термометрів шкала розміщується безпосередньо на поверхні товстостінного капіляра. У термометрів із вкладеною шкалою капіляр і шкальна пластина поміщені у захисну оболонку, припаяну до резервуара.

Скляні термометри є одними з найбільш точних засобів вимірювання температури.

5.3 Біметалічні та дилатометричні термометри

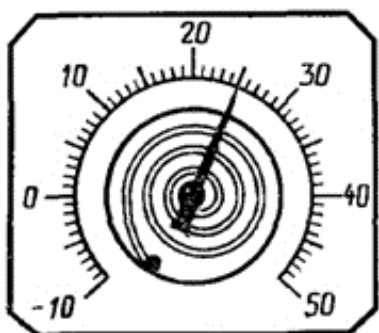


Рисунок 5.3 – Біметалічний термометр із плоскою спіраллю

Принцип дії базується на термометричній властивості теплового розширення твердих тіл.

Чутливий елемент біметалічного термометра складається з двох пластинок (стрічок) різнорідних матеріалів із різними коефіцієнтами теплового розширення – великим та малим.

Прикладом біметалічного чутливого елемента є пара «латунь – інвар»¹. Ефект застосування цієї пари досягається за рахунок того, що коефіцієнт теплового розширення латуні у 19 разів більший, ніж у інвару.

¹ Латунь – сплав 70 % міді з 30 % цинку за масою. Інвар – сплав 64 % заліза із 36 % нікелю за масою.

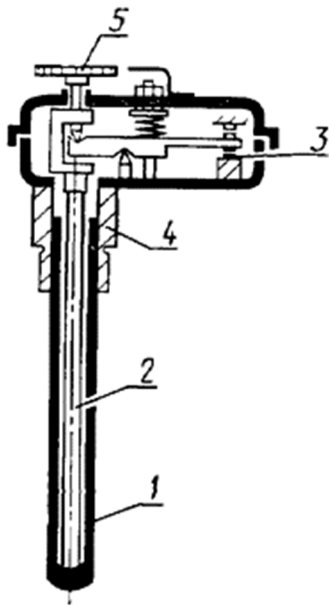


Рисунок 5.4 – Дилатометричний термометр

Дилатометричні термометри розширення мають дві трубки з матеріалів із різними температурними коефіцієнтами лінійного розширення, які одним кінцем скріплені одна з одною (рис. 5.4). Вільні кінці рухаються по-різному, що застосовується для вимірювання температури. Зовнішню трубку 1 виготовляють з металу (латуні, міді, сталі) з більшим коефіцієнтом лінійного розширення, внутрішню трубку або стрижень 2 виготовляють із кварцу, фарфору або інвару. Зовнішня трубка закріплена у штуцері 4, а внутрішня трубка механічно зв'язана з контактним

пристроєм 3 та встановлюваною шкалою 5. При підвищенні температури середовища, у яке повністю занурюється нижня частина термометра, зовнішня трубка подовжується більше, ніж внутрішня. Різниця переміщень рухомих кінців пропорційна зміні температури. Переміщення внутрішнього стрижня відбувається при зміні температури.

Біметалічні термометри застосовуються для вимірювання температури у приміщеннях. У них застосовуються біметали у вигляді плоскої спіралі (рис. 5.3). У промисловості найчастіше застосовують біметалічні термометри з циліндричною пружиною (рис. 5.5).

Біметал, скручений у циліндричну спіраль, встановлюють у захисну арматуру, яка з'єднується з головкою термометра, у якій розміщено передавальний механізм, стрілка та шкальна пластина. Тепловий контакт між захисною арматурою та спіраллю повинен бути якомога кращим для збільшення швидкодії термометра.

Дилатометричні термометри застосовуються також в автоматичному регулюванні.

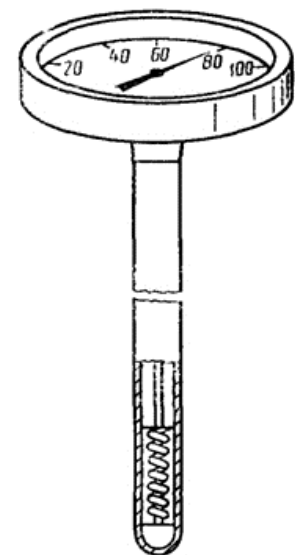


Рисунок 5.5– Біметалічний термометр із циліндричною пружиною

5.4 Манометричні термометри

Принцип дії базується на зміні тиску робочої речовини у замкнутому об'ємі залежно від температури. Основними частинами манометричних термометрів є термобалон (чутливий елемент), капіляр і деформаційний манометричний перетворювач, пов'язаний зі стрілкою приладу.

Манометричні термометри залежно від типу робочої речовини, що заповнює термосистему, діляться на газові, рідинні і конденсаційні.

Газові манометричні термометри призначені для вимірювання температур від -200 до 600 °С. Як робоче тіло застосовується азот.

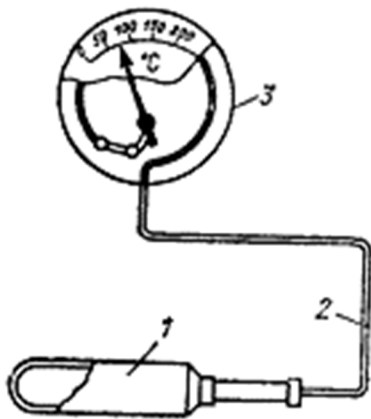


Рисунок 5.6 – Манометричний термометр

Рідинні манометричні термометри призначені для вимірювання температур від -150 до 300 °С. Як робоча речовина, що заповнює термосистему, застосовують ртуть, пропіловий спирт, метаксилол і інші рідини. Робоча речовина рідинних термометрів практично не стискувана. Рідинні термометри так само як і газові, мають лінійну шкалу. Конденсаційні манометричні термометри призначені для вимірювання температур від -50 до 300 °С. Термобалон термометра 1 (рис. 5.6) приблизно на $\frac{3}{4}$ заповнений низькотемпературнокиплячою рідиною (наприклад, R22, пропілен, ацетон), а інша частина заповнена насиченою парою цієї рідини. Кількість рідини у термобалоні повинна бути такою, щоб при максимальній температурі не вся рідина переходила у пару. Капіляр 2 і манометрична пружина, пов'язана зі шкалою передавальним механізмом та знаходиться у корпусі 3, заповнюються, як правило, іншою рідиною. Тиск у термосистемі конденсаційного термометра дорівнює тиску насиченої пари робочої рідини, який визначається, у свою чергу, температурою робочої рідини, тобто температурою вимірюваного середовища з розміщеним у ній термобалонем. Залежність тиску насиченої пари від температури має нелінійний характер.

Відмінність у положенні термобалона і вимірювального приладу щодо рівня землі викликає так звану *гидростатичну похибку*. Вона має місце в

рідинних і конденсаційних манометричних термометрах. Зміна температури навколишнього середовища викликає *температурну* або *капілярну похибку*. Вона має місце в газових і рідинних манометричних термометрах. Зміна барометричного тиску практично не впливає на покази термометра. Можливий невеликий вплив на початковій ділянці шкали у конденсаційних манометричних термометрах.

Манометричні термометри відрізняються простотою конструкції, можливістю дистанційної передачі показів і автоматичного запису. Однією з важливих переваг є можливість їх використання у пожежо- і вибухонебезпечних приміщеннях. До недоліків необхідно віднести складність ремонту при розгерметизації системи, обмежену відстань дистанційної передачі і у багатьох випадках великі розміри термобалона. Газові і рідинні манометричні термометри мають клас точності 1; 1,5 і 2,5, а конденсаційні – 1,5; 2,5 і 4.

5.5 Термоелектричні термометри

Принцип дії термоелектричного термометра базується на виникненні ЕРС в електричному колі, складеному з різнорідних провідників (рис. 5.7) за нерівності температур у місцях з'єднання провідників, тобто на ефекті Зеєбека.

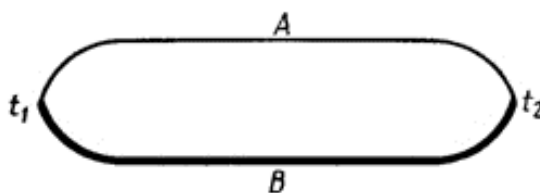


Рисунок 5.7 – Термоелектричний ланцюг із двох різних провідників ($t_1 > t_2$)

Способи увімкнення вимірювального приладу подані на рис. 5.8.

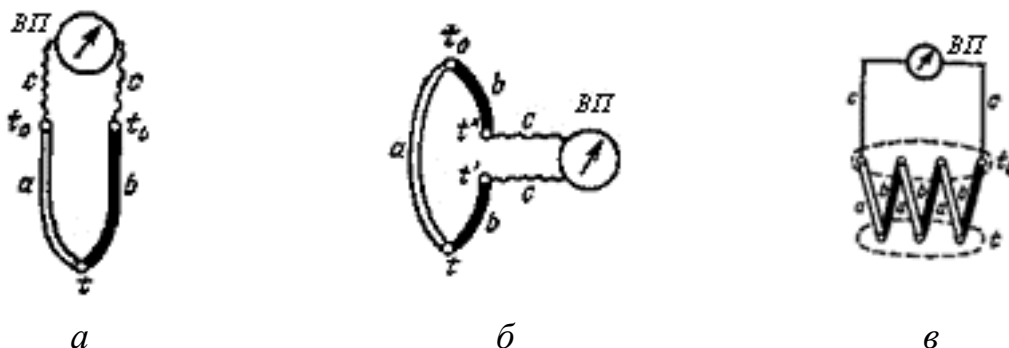


Рисунок 5.8 – Способи під'єднання термоелектричних перетворювачів:
а) точковий; б) диференціальний; в) термобатарей

Матеріали, які застосовуються для термоелектродів, їх приблизний склад та термоЕРС подані у табл. 5.2.

Таблиця 5.2 – Матеріали, які застосовуються для термоелектродів

Матеріал	Склад (приблизний)	ТермоЕРС, мВ
Залізо	Практично чисте	+1,80
Мідь	Те саме	+0,75
Нікель	Те саме	-1,49
Кобальт	Те саме	-1,80
Вісмут	Те саме	-7,30
Олово	Те саме	+0,43
Золото	Те саме	+0,75
Срібло	Те саме	+0,72
Платинородій	90 % Pt + 10 % Rh	+0,64
Константан	60 % Cu + 40 % Ni	-3,35
Копель	56 % Cu + 44 % Ni	-(3,90 – 4,18)
Ніхром	(75–88) % Ni + (10–20) % Cr + (2–5) % Fe	+(1,6 – 2,4)
Манганін	84 % Cu + 13 % Mn + 2 % Al + 1 % Fe	+0,80
Алюмель	94,5 % Ni + 2 % Al + 2 % Mn + 1 % Si + 0,5 % Co	-(1,14 – 1,34)
Хромель	90,5 % Ni + 9,5 % Cr	+(2,74 – 2,96)
Вугілля (вуглець)	–	+0,30
Кремній	Практично чистий	+44,8

При визначенні умовного заряду застосовують поняття *нормальний термоелектрод*, яким є чиста платина.

Позитивними умовно називають матеріали, у яких у парі з платиною струм на більш гарячому кінці спаю ($t > t_0$) рухається від платини до цього матеріалу. При цьому платина є негативним електродом.

Як правило, підбирають пару з великим значенням термоЕРС.

Для з'єднання кінців провідників застосовують паяння та зварювання.

Робочий кінець занурений у вимірювальне середовище, а вільний – у навколишнє (атмосферу).

Стандартні термопари наведені у таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Стандартні термопари

Умовне позначення	Найменування	Межа вимірювань, °С	
		нижня	верхня
ТПП	Платинородій – платина	-20	+1300
ТПР	Платинородій (30 % Rh) – платинородій (6 % Rh)	+300	+1600
ТХА	Хромель – алюмель	-50	+1000
ТХК	Хромель – копель	-50	+600
ТНС	Сплав Ni + Co – сплав Si + Al	+300	+1000

Найбільшу термоЕРС має термопара ТХК.

Власна похибка термопар становить від 0,25 до 2,5 % залежно від типу термопари.

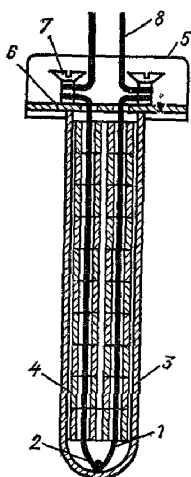


Рисунок 5.9 – Будова термоелектричного термометра

захисний корпус 5 з основою 6, під яким розміщені гвинти 7, що з'єднують термоелектроди 1 з подовжувальними дротами 8.

Конструктивна схема. Конструктивне виконання термоперетворювачів визначається умовами їх використання. Найбільш загальним є виконання, показане на рисунку 5.9. Термоелектричний перетворювач у своєму складі має два термоелектроди 1, що з'єднуються у спаї 2. Захисний чохол 3 запобігає механічному та хімічному руйнуванню термоелектродів під впливом зовнішніх чинників. Термоелектроди вкриті шаром електро- та термоізоляції 4, а зовні весь термоперетворювач для запобігання випадковим контактам та окисненню має

Компенсаційні провідники можна виготовити з тих самих матеріалів, що й термоелектроди термопари, але часто їх виготовляють із більш дешевих матеріалів. При обранні матеріалу провідників головне, щоб не виникало паразитних термоЕРС.

Необхідно враховувати поправку на температуру вільних кінців.

Вимірювання термоЕРС. ТермоЕРС вимірюють двома методами:

1) *магнітоелектричними мілівольтметрами* із класами точності:

0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5.

Прямі вимірювання термоЕРС є більш простими;

2) *компенсаційний метод вимірювання* є більш точним та полягає у порівнянні термоЕРС, що виникла у спаї з відомою величиною, та визначається падіння напруги при проходженні мостової схеми. При цьому фіксується струм за допомогою гальванометра.

Прилади зі сталою силою струму у компенсаційному колі називаються *потенціометрами*, а прилади зі сталим опором у компенсаційному колі – *компенсографами*.

Для роботи вимірювального приладу необхідні нормальні елементи зі сталим значенням ЕРС.

Класи точності потенціометрів від 0,02 до 0,2.

5.6 Електричні термометри опору

Принцип дії базується на властивості провідника (або напівпровідника) змінювати свій опір із температурою. Термометри опору дозволяють вимірювати температуру з високою точністю (до 0,02 °C).

Недоліками цих термометрів є великі розміри чутливого елемента та необхідність у зовнішньому джерелі живлення.

Матеріалами чутливого елемента можуть бути металеві сплави або напівпровідники. Найбільше підходять серед металів – платина та мідь, а серед напівпровідників – суміші оксидів міді, марганцю, магнію, нікелю, кобальту та інших металів.

Основними частинами термоперетворювача опору (рис. 5.10) є чутливий елемент 1, захисна арматура 3 і головка перетворювача 9 із затискачами для з'єднання чутливого елемента і з'єднувальних дротів (кабелю).

Стандартні типи чутливих елементів термометрів опору подані у таблиці 5.4.

Для вимірювання опору використовують чотириплечі урівноважені та неурівноважені мости.

Логометри – прилади магнітоелектричної системи, принцип дії яких базується на порівнянні величини струму в електричному колі термометра та сталого опору. Застосовуються як вторинні прилади при вимірюванні температури термометрами опору. Часто логометри градууються у величинах температурної шкали.

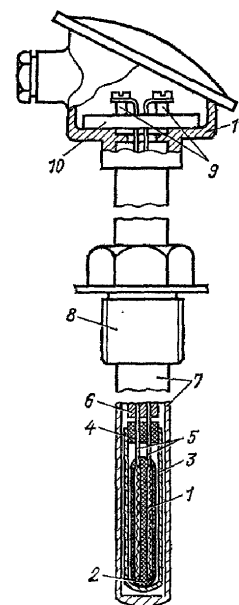


Рисунок 5.10 – Будова термометра опору

Таблиця 5.4 – Стандартні типи чутливих елементів термометрів опору

Умовне позначення	Найменування	Межа вимірювань, °С	
		нижня	верхня
ТСН	Нікелевий	–60	+180
ТСП	Платиновий	–260	+1100
ТСМ	Мідний	–260	+200
ТСПП	Напівпровідниковий	–270	+600

Для низькотемпературних вимірювань застосовують германієві термометри опору ТСПП. Конструкція чутливого елемента такого термометра подана на рис. 5.11.

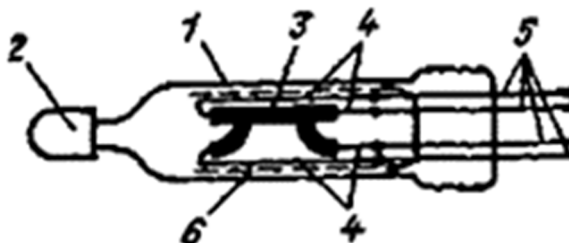


Рисунок 5.11 – Чутливий елемент германієвого термометра опору

1 – мідна гільза луджена; 2 – герметична пробка; 3 – кристал германію;
4 – золоті провідники, приварені до кристала; 5 – платинові виводи;
6 – ізоляційна плівка

Розрізняють дво-, три- та чотирипровідникові схеми під'єднання термометрів опору до вимірювального приладу.

5.7 Методи вимірювання температури та їх похибки

5.7.1 Похибки контактних методів вимірювання температури

Основні специфічні похибки контактних методів вимірювання температури, окрім похибок самого вимірювального приладу, також виникають за рахунок:

- 1) променевого теплообміну між термоприймачем та оточуючими його тілами;
- 2) відведення тепла теплопровідністю по арматурі та деталях термоприймача;
- 3) додаткового підігрівання газу внаслідок тертя у зоні розміщення термоприймача.

Типові випадки вимірювання температури:

- 1) рідини та газів, які рухаються по трубах із помірною швидкістю;
- 2) газів, які рухаються із високою швидкістю;
- 3) повітря у приміщеннях, газів у камерах, що рухаються з невеликою швидкістю та мають відповідно низькі коефіцієнти тепловіддачі до твердих поверхонь.

Типові схеми вимірювання показані на рис. 5.12.

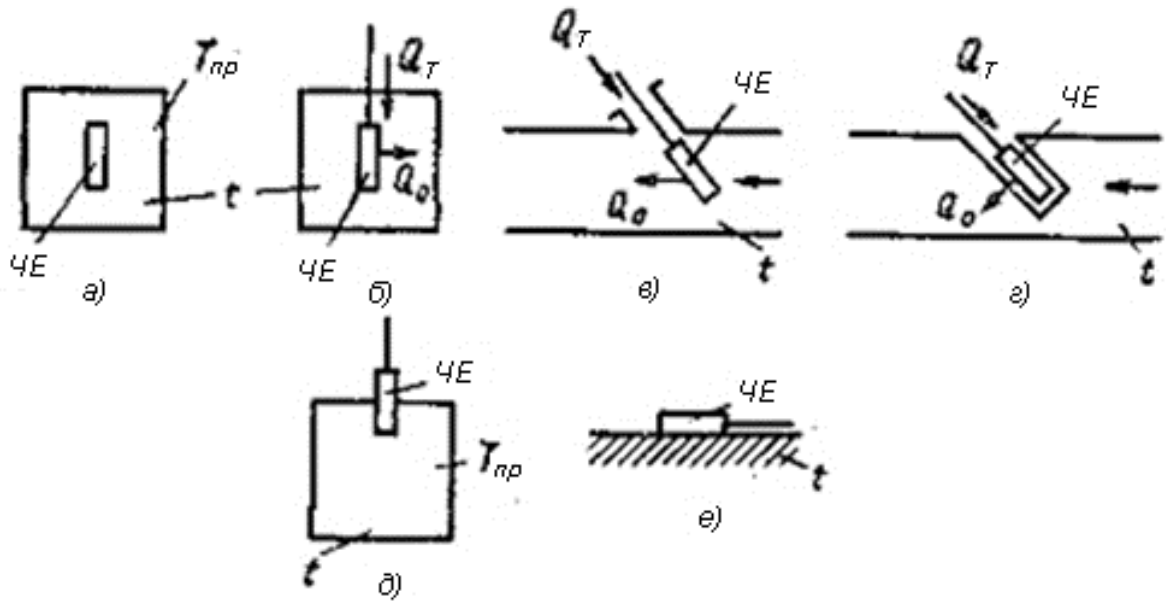


Рисунок 5.12 – Типові схеми вимірювання температури:

- a) середовище малорухоме, чутливий елемент (ЧЕ) повністю занурений у вимірюване середовище, підведення тепла здійснюється за рахунок променевого теплообміну;
- б) те саме, підведення тепла здійснюється за рахунок конвективного теплообміну;
- в) вимірюване середовище рухається з помірною швидкістю та/або має незначні термічні параметри та/або не агресивне щодо матеріалу ЧЕ; г) вимірюване середовище рухається зі значною швидкістю та/або має значні термічні параметри та/або агресивне щодо матеріалу ЧЕ; д) згідно з пунктом a, але ЧЕ частково занурений у вимірюване середовище;
- е) вимірювання температури твердої поверхні

Відповідно до основного рівняння теплопередачі тепловий потік від робочого тіла з температурою t_c до ЧЕ може бути визначений як

$$Q_0 = k \cdot F \cdot (t_c - \theta), \quad (5.4)$$

де k – коефіцієнт теплопередачі; F – площа робочої поверхні ЧЕ; θ – температура ЧЕ.

Величину теплового потоку можна розглядати як конвективний тепловий потік, тому

$$Q_k = \alpha \cdot F \cdot (t_c - \theta), \quad (5.5)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі від робочого середовища до чутливого елемента.

Похибка вимірювання температури може бути визначена з рівняння

$$\Delta t_{мет} = t_c - \theta = Q_{відв} / (k \cdot F). \quad (5.6)$$

Розглянемо випадок, коли чутливий елемент не до кінця занурений у робоче середовище, як показано на рис. 5.12 д.

Вважаємо, що температура θ однакова по всьому ЧЕ, індекс «1» відповідає параметрам верхньої частини, а «2» – нижньої.

При цьому похибка вимірювання температури становитиме

$$\Delta t_{мет} = (t_c - t_0) / [(k_2 \cdot F_2) / (k_1 \cdot F_1) - 1]. \quad (5.7)$$

Тепловий баланс термометра можна записати у вигляді трьох варіантів:

$$Q_k = Q_T; \quad Q_k = Q_{np}; \quad Q_k = Q_T + Q_{np} = Q_{відв}, \quad (5.8)$$

де Q_T – тепловий потік від ЧЕ за рахунок теплопровідності вздовж ЧЕ; Q_{np} – тепловий потік від ЧЕ за рахунок променевого теплообміну; $Q_{відв}$ – загальний тепловий потік, який втрачається (надходить) поверхнею ЧЕ у навколишнє середовище.

5.7.2 Похибки, що виникають унаслідок променевого теплообміну

Тепло, яке отримує термоприймач від газу конвективним шляхом

$$Q_k = \alpha \cdot F \cdot (t_c - \theta), \quad (5.9)$$

де t_c – температура газу (поток); θ – температура термоприймача (середня температура гільзи); α_k – коефіцієнт тепловіддачі від газу до стінки термоприймача; F – поверхня теплообміну.

Кількість тепла, яка передається випромінюванням стінкам каналу

$$Q_{np} = C_0 \cdot \varepsilon_{зв} \cdot F \cdot \left[\left(\frac{\Theta}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{cm}}{100} \right)^4 \right] \cdot \varphi_{12}, \quad (5.10)$$

де C_0 – стала Стефана-Больцмана, $C_0 = 5,67 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$; $\varepsilon_{зв}$ – зведений коефіцієнт чорноти між термоприймачем та стінками каналу; T_{cm} та Θ – абсолютні температури стінки та термоприймача; φ_{12} – середній кутовий коефіцієнт випромінювання термоприймача стосовно стінок каналу.

За умови стаціонарного теплообміну похибка вимірювання температури внаслідок впливу випромінювання може бути визначена з виразу

$$\Delta t = \theta - t_c = - \frac{C_0 \cdot \varepsilon_{зв}}{\alpha_k} \cdot \left[\left(\frac{\Theta}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{cm}}{100} \right)^4 \right]. \quad (5.11)$$

Як правило, площа поверхні термopриймача F значно менша від поверхні стінок $F_{\text{н}0}$ каналу, тому зведений коефіцієнт чорноти системи $\varepsilon_{\text{зв}}$ можна замінити на коефіцієнт чорноти термopриймача ε , тоді

$$\Delta t = \theta - t_c = -\frac{C_0 \cdot \varepsilon}{\alpha_\kappa} \cdot \left[\left(\frac{\Theta}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{cm}}{100} \right)^4 \right]. \quad (5.12)$$

Звідси бачимо, що для зменшення похибки вимірювання за рахунок променевого теплообміну необхідно:

а) по можливості зменшувати коефіцієнт чорноти термopриймача. Для цього захисну гільзу виконують із гладкою та блискучою поверхнею. Однак із часом забруднення гільзи збільшується, що зводить нанівець ефективність цих заходів (необхідність постійного підтримання чистоти поверхні);

б) збільшувати коефіцієнт тепловіддачі α_κ . Це досягається або встановленням термopриймача у тих місцях, де швидкість потоку найбільша, або необхідно штучно збільшувати швидкість руху біля термopриймача;

в) збільшувати температуру стінки (у випадку $\Theta > T_{cm}$). Для цього трубопровід обов'язково покривають ізоляцією.

5.7.3 Похибки внаслідок теплопровідності термометра (гільзи)

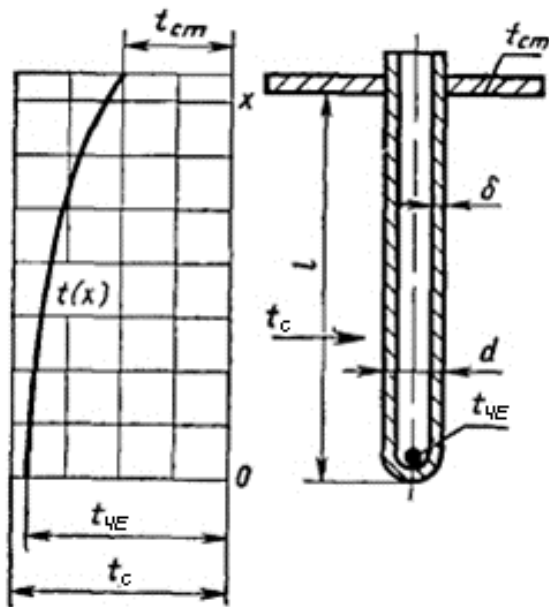


Рисунок 5.13 – До визначення похибки тепловідведення при вимірюванні температури рідини або газу

Похибка за рахунок теплопровідності матеріалу термopриймача (рис. 5.13) може бути визначена за формулою

$$\Delta t_{\text{м}} = t_c - \theta = \frac{t_c - t_{cm}}{\text{ch}\left(l \cdot \sqrt{P \cdot \alpha / (\lambda \cdot S)}\right)}, \quad (5.13)$$

де t_{cm} – температура стінки труби у місці встановлення термометра; l – довжина термометра (від кінця до стінки); P – периметр термометра; S – площа перерізу термометра; λ – коефіцієнт теплопровідності чохла термометра; α – коефіцієнт тепловіддачі від середовища до термометра.

Для циліндричного чохла термометра застосовують формулу

$$\Delta t_m = t_c - \theta = \frac{t_c - t_{cm}}{\text{ch}(l \cdot m)}, \quad (5.14)$$

де $m = \sqrt{\alpha / (\lambda \cdot \delta)}$ – параметр; δ – товщина стінки чохла.

5.7.4 Похибки при вимірюванні температури газових потоків із високою швидкістю

Якщо потік рухається зі швидкістю w , має статичну абсолютну температуру T_c , а місцева швидкість звуку у потоці a , температура гальмування потоку визначається з виразу

$$T^* = T_c \cdot (1 + M^2 \cdot (k - 1) / 2), \quad (5.15)$$

де $M = w / a$ – число Маха потоку.

Температура, яка встановиться на поверхні ЧЕ термометра (гільзи), буде визначатися в інтервалі $T^* < \Theta < T_c$.

Температура гальмування потоку визначається залежністю

$$T^* = T_c + w^2 / (2 \cdot c_p). \quad (5.16)$$

Дійсну статичну температуру потоку можна визначити з виразу

$$T_c = \Theta - r \cdot w^2 / (2 \cdot c_p), \quad (5.17)$$

де $r = (\Theta - T_c) / (T^* - T_c)$ – коефіцієнт відтворення; у загальному випадку коефіцієнт перетворення $r = f(M; Pr)$; c_p – питома масова ізобарна теплоємність газу.

Методична похибка вимірювання температури газових потоків із високою швидкістю може бути визначена з виразу

$$\Delta t_i = t_c - \theta = T_c - \Theta = r \cdot w^2 / (2 \cdot c_p). \quad (5.18)$$

Величина коефіцієнта відтворення залежить від режиму руху газу: для ламінарного режиму $r = \sqrt{Pr}$, для турбулентного $r = \sqrt[3]{Pr}$.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що таке температура та який її фізичний зміст?
2. Які температурні шкали ви знаєте, який взаємозв'язок між ними?
3. Що таке термометр, їх види за термометричними властивостями?
4. Який принцип дії та конструкція рідинних термометрів розширення?
5. Які похибки характерні для рідинних термометрів розширення?
6. Який принцип дії та конструкція біметалічних термометрів?

7. Який принцип дії та конструкція дилатометричних термометрів?
8. Який принцип дії та конструкція манометричних термометрів?
9. Які похибки характерні для манометричних термометрів?
10. Який принцип дії та конструкція термоелектричних термометрів.
11. Які матеріали застосовуються для термоелектродів термоелектричних термометрів?
12. Що таке нормальний електрод, які матеріали називають позитивними?
13. Які ви знаєте види стандартних термопар?
14. Який принцип дії та конструкція термометрів опору?
15. Які стандартні типи чутливих елементів термометрів опору?
16. Який принцип дії та конструкція термометрів опору ТСПП?
17. Які ви знаєте основні специфічні похибки контактних методів вимірювання температури?
18. Які типові схеми вимірювання температури?
19. Які похибки виникають унаслідок променевого теплообміну?
20. Що необхідно для зменшення похибки вимірювання за рахунок променевого теплообміну?
21. Що впливає на величину похибки, що виникає внаслідок теплопровідності термометра?
22. Що впливає на величину похибки, яка виникає при вимірюванні температури потоку, що рухається з високою швидкістю?

6 ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ ТА РІЗНИЦІ ТИСКІВ

6.1 Загальні відомості

Тиск характеризує інтенсивність нормальних сил, що діють на поверхню тіла. Розмірність вимірювання тиску у системі СІ $H / м^2 = Па$.

Також існують позасистемні одиниці: технічна атмосфера ($кгс / см^2$, або $ат$), фізична атмосфера ($атм$), міліметри водяного стовпа ($мм вод. ст. = кгс / м^2$), міліметри ртутного стовпа ($мм рт. ст. = Торр$); фунти на квадратний фут ($pound square feet = psf$); фунт на квадратний дюйм ($pound square inches = psi$).

Взаємозв'язок між різними системними одиницями можна виразити такими співвідношеннями:

$$750Торр = 100кПа = 1бар; 735,6Торр = 1кгс / см^2 = 98,1кПа;$$

$1 мм вод. ст. = 9,81 Па$; $1 Торр = 13,6 мм вод. ст. = 133,3 Па$; дюйм ртутного стовпа $in Hg = 345,3 мм вод. ст. = 3386 Па$; фунт-сила на квадратний дюйм $1 psi = 1 lbf / in^2 = 6895 Па = 703,1 мм вод. ст. = 144 psf$;

$$1 атм = 760Торр = 101,3кПа.$$

Залежно від системи відліку тиск є абсолютним та умовним. Абсолютний тиск відлічується від повного вакууму (абсолютний нуль тиску). Умовний тиск відлічується від умовного нуля (атмосферний тиск B). Він буває додатним та від'ємним, тобто надлишковим (манометричним) та розрідження (вакуумним):

$$p_{абс} = B + p_m, p_{абс} = B - p_{вак}. \quad (6.1)$$

Для високих надлишкових тисків ($p_m \gg B$) вимірюванням атмосферного тиску можна нехтувати, тобто атмосферний тиск оцінюють таким, що дорівнює $B = 1 бар$.

Прилад для вимірювання атмосферного тиску називається *барометром*, надлишкового – *манометром*, розрідження – *вакуумметром*.

Для вимірювання малих надлишкових тисків та розрідження (до $40 кПа$) застосовують *напоро-* та *тягоміри*. Для вимірювання дуже малих надлишкових тисків у $(1-10) кПа$ застосовують *мікрманометри*.

6.2 Фізичні основи первинних перетворювачів тиску

6.2.1 Класифікація перетворювачів

Перетворювачі тиску існують двох типів: *силові* та *непрямі*.

До силових належать перетворювачі, які вимірюють силу, пропорційну тиску або різниці тисків. Вони є найбільш поширеними.

До непрямих належать перетворювачі, в яких використовують зміну фізичних властивостей робочого середовища під впливом тиску. Наприклад, зміна тепловіддачі від твердого тіла до газу.

Залежно від вихідної величини перетворювачі поділяють на *механічні*, *електричні* та *пневматичні*.

У механічних перетворювачах вихідна величина отримується у результаті лінійного або кутового переміщення чутливого елемента.

В електричних перетворювачах вихідним сигналом є сила струму або напруга, а також такі параметри, як індуктивність, ємність, опір тощо.

У пневматичних перетворювачів вихідною величиною є тиск стиснутого повітря.

Схеми пружинних елементів, які застосовуються при вимірюванні тиску, подані рис. 6.1.

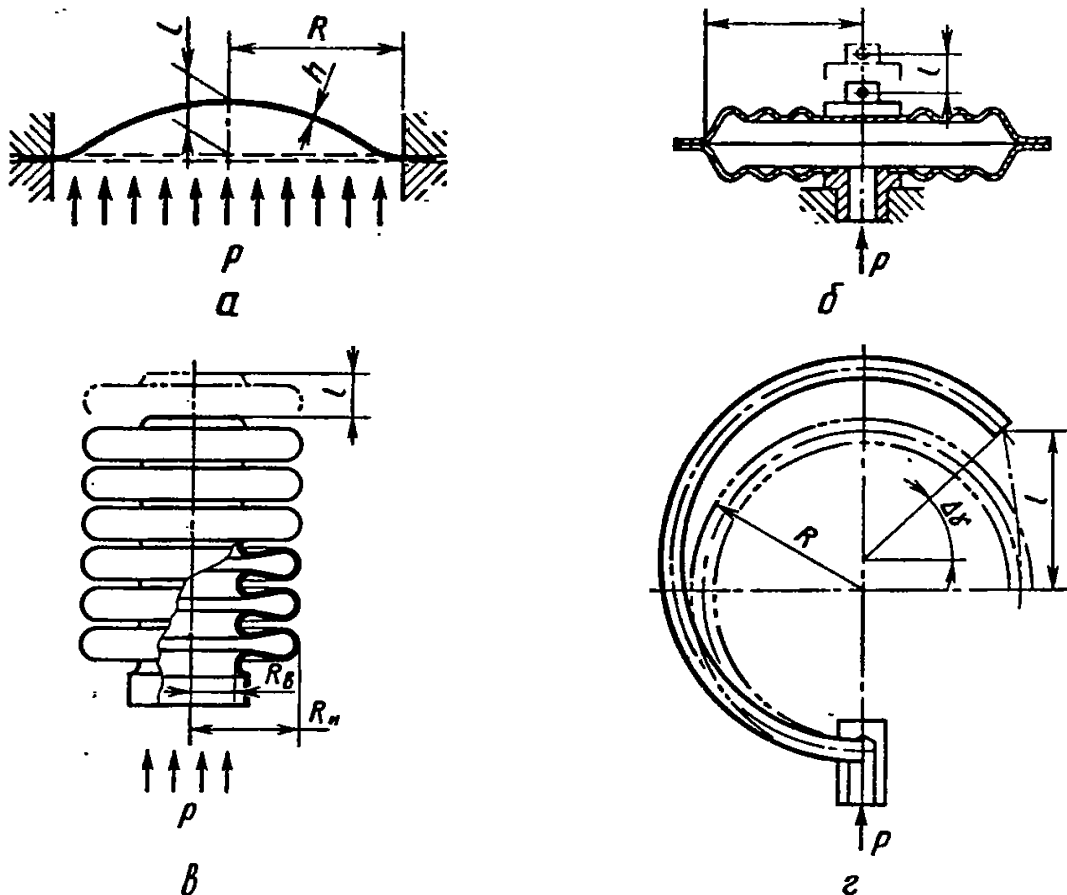


Рисунок 6.1 – Схеми пружинних елементів:

а) плоска мембрана; б) гофрована мембрана; в) сильфон; з) трубка Бурдона

Усі ці елементи можна застосовувати для вимірювання абсолютного, надлишкового тиску та розрідження.

6.2.2 Силіві перетворювачі

Існують *рідинні* та *деформаційні* силіві перетворювачі. У рідинному типі перетворювачів сила тиску урівноважується гідростатичною силою тиску стовпа рідини. Висота стовпа визначає значення тиску. У деформаційних перетворювачах сила тиску урівноважується силою пружної деформації ЧЕ, а тиск вимірюється переміщенням обраної точки пружного елемента.

Клас рідинних перетворювачів складається із таких приладів:

- 1) двотрубні (U-подібні);
- 2) чашоподібні (однотрубні) з відкритим кінцем трубки;
- 3) чашоподібні однотрубні із запаяною трубкою – для вимірювання абсолютного тиску;
- 4) поплавцеві.

Функція перетворення для U-подібного приладу:

$$\Delta h = \Delta p / [g \cdot (\rho - \rho_c)], \quad (6.2)$$

де $\Delta p = p_2 - p_1$ – різниця тисків, Па; Δh – різниця рівнів у трубках, м; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння; ρ та ρ_c – густина відповідно робочої рідини та середовища над робочою рідиною, кг/м^3 . Для газів, коли $\rho \approx \rho_c$, $\Delta h = \Delta p / (\rho \cdot g)$.

Для однотрубного чашоподібного приладу

$$\Delta h = h_T + h_p, \quad h_p = h_T \cdot d_T^2 / d_p^2, \quad (6.3)$$

$$\Delta h = h_T \cdot \left[1 + \left(d_T / d_p \right)^2 \right], \quad \Delta p = g \cdot (\rho - \rho_c) \cdot \Delta h. \quad (6.4)$$

Для поплавцевих перетворювачів вихідний вимірювальний елемент – резервуар, а не трубка, тому

$$\Delta h = \Delta p^2 / \left[g \cdot (\rho - \rho_c) \cdot \left(1 + \left(d_T / d_p \right)^2 \right) \right]. \quad (6.5)$$

6.2.3 Непрямі перетворювачі тиску

Існує велика кількість непрямих методів, що ґрунтуються на використанні різних законів прикладної фізики. Непрямі механічні методи вимірювання тиску базуються на визначенні пружного прогину відформованих певним чином чутливих елементів під дією контрольованого тиску, а також стискуваності газів і рідин. В ділянці вимірювання тисків, що виникають при вибуху, мірою досягнутого максимального тиску може бути

пластична деформація чутливого елемента, а також електричні, оптичні й хімічні явища, що виникають при певних тисках.

Прикладами таких перетворювачів можуть бути *п'єзоелектричні прилади*, принцип дії яких базується на перетворенні пружної деформації кварцової пластини під дією тиску в електричні заряди. *Манометри з тензоперетворювачами* працюють за принципом зміни опору тензодатчика – мембрани, на якій розміщені дротові, фольгові або напівпровідникові резистори – під впливом вимірюваного тиску, що приводить до зміни сили струму у мережі перетворювача при живленні від джерела сталого струму.

6.2.4 Електричні перетворювачі тиску

Перетворюють переміщення ЧЕ в електричний сигнал. Залежно від виду сигналу їх розділяють на *параметричні* та *генераторні*, або *енергетичні*.

Параметричні перетворювачі мають такий вихідний сигнал: зміна опору, ємності, індуктивності тощо.

Генераторні виробляють сигнал у зміні струму або напруги.

В усіх випадках вхідним сигналом є пересування чутливого елемента.

Тензометричні перетворювачі (рис. 6.2 а) бувають дротові на плоских мембранах, напівпровідникові (монокристал сапфіру із кремнієвими тензорезисторами). Для вимірювання струму застосовують мостову схему.

Можливі похибки, що виникають при перетворенні тиску, – вплив температури на опір, нестабільність функції перетворення у часі, нестабільність напруги живлення.

Індуктивні перетворювачі (рис. 6.2 б). Пересування чутливого елемента передається феромагнітному осердю C_p , яке знаходиться у магнітному полі котушок L_1 та L_2 , об'єднаних із допоміжними резисторами у міст.

Недолік цього типу перетворювачів – нестабільність напруги живлення.

Диференційно-трансформаторні перетворювачі (рис. 6.2 в). Пересування чутливого елемента передається феромагнітному осердю C_{p1} , яке знаходиться у магнітному полі, створеному первинною обмоткою I диференційного трансформатора DT_1 . На ту саму котушку наносять дві вторинні обмотки II , з'єднані назустріч одна одній. Якщо осердя розміщується симетрично щодо вторинних обмоток, то ЕРС, що наводяться на них, однакові за величиною та протинапрямлені одна щодо одної. У результаті на виводах a та b трансформатора напруга дорівнює нулю. При пересуванні осердя рівність ЕРС порушується, і на виводах з'являється

результуюча напруга, величина якої залежить від пересування, а фаза – від його напрямку.

Характеристика такого перетворювача майже лінійна.

Разом із диференційно-трансформаторними перетворювачами часто застосовують мостові схеми увімкнення. Перевагою такої схеми є зменшення впливу зміни напруги та довжини з'єднувальних провідників на точність перетворення. Разом із тим застосування такої схеми пов'язане із застосуванням досить складних електромеханічних засобів, що призводить до зниження загальної точності перетворювача. Перетворювачі такого типу забезпечують основну зведену похибку близько (1–2) %.

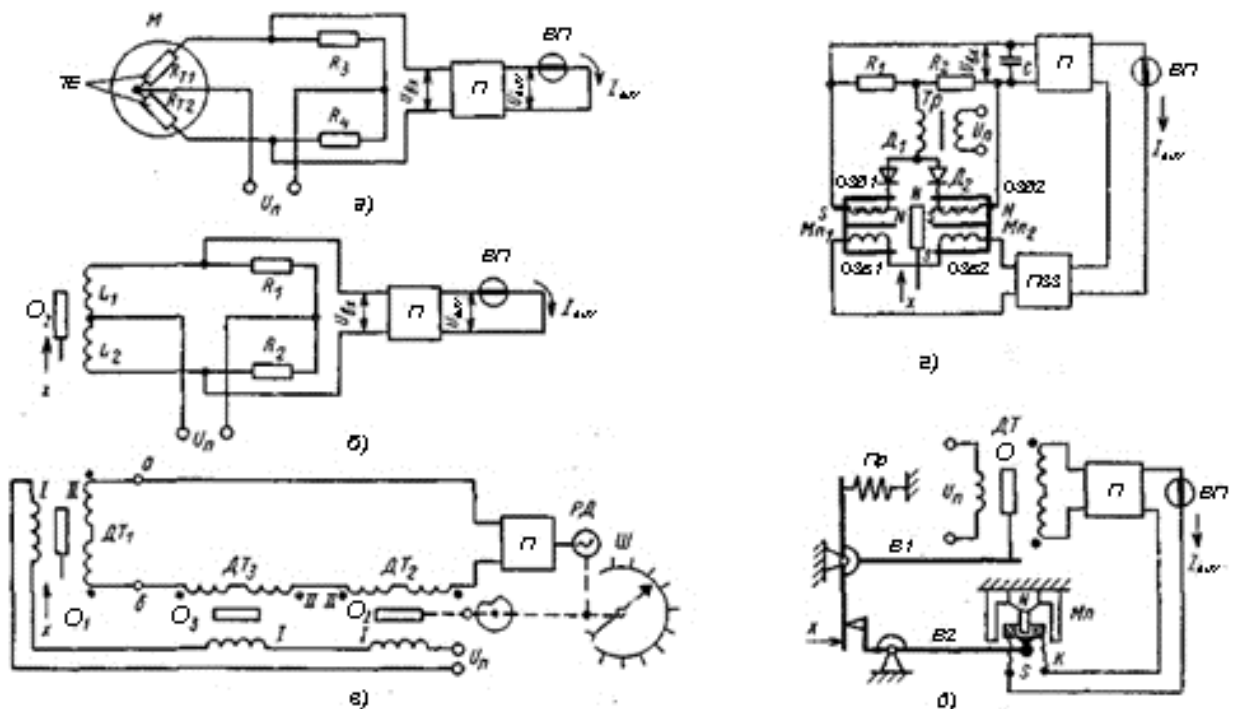


Рисунок 6.2 – Передавальні перетворювачі (спрощені схеми):

а) тензометричний; б) індукційний; в) диференційно-трансформаторний; г) із компенсацією магнітних потоків; д)– з електросиловою компенсацією; *M* – мембрана; *TE* – термоелементи; *П* – підсилювач; *ВП* – вимірювальний прилад; *O* – осердя; *ДТ* – диференційний трансформатор; *РД* – резервний двигун; *OЗб* та *OЗз* – обмотки збудження та зворотного зв'язку; *Д* – діод; *ПЗЗ* – прилад зворотного зв'язку; *Mn* – магнітопровід; *Tr* – трансформатор; *B* – важіль; *Pr* – пружина; *K* – катушка; *Ш* – шкала

6.3 Методи вимірювання тиску та методичні похибки

6.3.1 Відбирання статичного тиску

Методична похибка вимірювання виникає від того, що до вимірювального приладу підводиться не тільки статичний тиск, але й частина

динамічного, унаслідок чого $p_M > p_{CT}$, похибка $\Delta p_{CT} = p_M - p_{CT}$,
 $\delta p_{CT} = \Delta p_{CT} / p_{CT}$.

Джерело похибок: великий діаметр трубки для відбирання тиску d_T ,
якість отвору (негострота кромки), кривизна потоку.

Значення похибок залежить від швидкості потоку. Для помірних швидкостей
 $w = (0,2 - 0,4) \text{ м}$ кожне джерело має похибку $(0,5 - 1)\%$; кращі результати дає
застосування трубки $d_T = (1 - 1,5) \text{ мм}$; при $d_T < 0,5 \text{ мм}$ трубки часто забиваються
сміттям; при $d_T > 1,5 \text{ мм}$ відносна похибка вимірювання статичного тиску складе
 $\delta p_{CT} \approx 1\%$. Для зменшення впливу кривизни, відбирання тиску треба виконувати
на прямих ділянках (на практиці мінімальна відстань від точки вигину потоку до
точки відбирання повинна становити не менше 50 діаметрів труби).

6.3.2 Вимірювання тисків, близьких до атмосферного (напір вентилятора, тиск кипіння холодильного агента, газоповітряний тракт котлів тощо)

Особливість вимірювання полягає у малому значенні надлишкового
тиску, на початку шкали манометра, де спостерігаються підвищені відносні
похибки приладів. Крім того, на покази значно впливають зміни
атмосферного тиску.

Відомо, що абсолютна та відносна інструментальні похибки
розраховуються за формулами:

$$\Delta p_{in} = \gamma \cdot p_{max} / 100, \delta p_{in} = \Delta p_{in} \cdot 100 / p_e = \gamma \cdot p_{max} / p_e, (6.6)$$

де p_{max} – верхня межа вимірювального приладу; γ – клас точності
приладу; p_e – вимірюваний тиск.

Отже, для зменшення похибок вимірювання тиску треба зменшувати
верхню межу p_{max} . Більшість пружинних манометрів дозволяють
перевантаження до 25 % від p_{max} , тобто $p_a \leq 1,25 \cdot p_{max}$. Це дає можливість
зменшити p_{max} .

6.3.3 Вимірювання вакууму

Вакуум буває *низьким* (до 10 кПа), *середнім* ((1,5 – 10) кПа) та *глибоким*
(< 1,5 кПа). Він також може бути виміряний у відсотках.

Для глибокого вакууму (від 10 Па до 10^{-8} Па) вимірюють тільки
абсолютний тиск.

Вимірювання низького тиску здійснюють рідинними (ртутними, водяними) U-подібними приладами. Для середнього вакууму застосовують дифманометри, для середнього та глибокого вакууму застосовують манометри абсолютного тиску з електросиловим перетворювачем, $p_{\max} = 16 \text{ кПа}$, $p_{\min} = 60 \text{ Па}$, $\Delta p = \pm 0,1 \text{ кПа}$.

Вимірювання глибокого вакууму може також здійснюватися тепловими, іонізаційними, магнітними електророзрядними, в'язкісними радіометричними вакуумметрами та іншими типами.

6.3.4 Вимірювання різниці тисків

Вимірювати різницю тисків $\Delta p = p_1 - p_2$ можна або за допомогою двох манометрів (вакуумметрів) (p_1 та p_2) із подальшим арифметичним визначенням величини Δp , або одним диференційним манометром.

Для двох однакових приладів вимірювання тиску ($\gamma_1 = \gamma_2$, $p_{1\max} = p_{2\max}$) $\Delta p = p_1 - p_2$ абсолютну та відносну похибки визначення різниці тисків можна знайти з виразів:

$$\Delta(\Delta p) = b \cdot \sqrt{\Delta p_{1in}^2 + \Delta p_{2in}^2} = b \cdot \Delta p_{1in} \cdot \sqrt{2}; \quad (6.7)$$

$$\delta(\Delta p) = \Delta(\Delta p) \cdot 100 / \Delta p = b \cdot \Delta p_{1in} \cdot \sqrt{2} \cdot 100 / (p_1 - p_2), \quad (6.8)$$

де $\Delta p_{1in} = \gamma_1 \cdot p_{\max} / 100$ – абсолютна інструментальна похибка вимірювального приладу.

При вимірюванні диференційними манометрами похибка значно менша при однаковому класі точності, що пояснюється зменшенням елементів, що впливають на величину похибки вимірювання Δp унаслідок застосування одного вимірювального приладу замість двох.

6.3.5 Похибки від різниці висоти точок відбирання та вимірювання тиску

Методична похибка з'являється внаслідок наявності *гідростатичного стовпчика*, який виникає за наявності геометричної розбіжності між горизонтальними площинами, через які проходять осі вимірювального приладу та середовища (див. рис. 6.3). Цю величину можна розрахувати за формулою

$$p_{z.c.} = \rho \cdot g \cdot h, \quad (6.9)$$

де ρ – густина вимірюваного середовища при термічних параметрах у точці відбирання; g – прискорення вільного падіння; h – гідростатичний стовпчик.

Дійсна величина тиску газового (парового) середовища може бути визначена з урахуванням поправки на наявність гідростатичного стовпчика та особливостей встановлення вимірювального приладу (вище від точки відбору)

$$p = p_M + p_{z.c.} = p_M + \rho \cdot g \cdot h_1, \quad (6.10)$$

де p_M – покази вимірюваного приладу (манометра, вакуумметра тощо).

Якщо вимірюється тиск рідини, то вимірювальний прилад встановлюють нижче від точки відбору, тоді дійсне значення тиску рідини може бути розраховане за формулою

$$p = p_M - \rho \cdot g \cdot h_2.$$

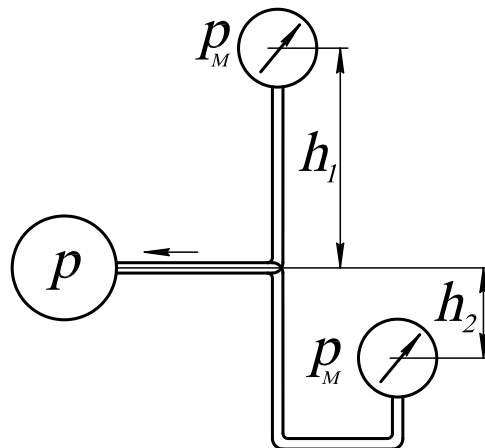


Рисунок 6.3 – До визначення гідростатичної похибки

Лінію до точки відбирання сигналу тиску при вимірюваннях у двофазних середовищах, або у середовищах, здатних до конденсації, прокладають з ухилом, щоб конденсат повертався у трубу.

Для захисту вимірювального приладу від гарячої пари або води при температурах середовища $t \geq 70^\circ\text{C}$ перед місцем його встановлення розміщують *кільцеву сифонну трубку*.

6.3.6 Методичні похибки вимірювання тиску силовими перетворювачами

Загальні вимоги до робочої рідини, за допомогою якої виконується вимірювання тиску середовища:

1) густина робочої рідини повинна бути більшою за густину вимірюваного середовища, тобто $\rho > \rho_c$;

2) робоча рідина не повинна розчинятися у середовищі, тиск якого вимірюють;

3) тиск кипіння робочої рідини при заданій температурі має менше значення від нижньої межі вимірювання.

Похибки вимірювання тиску виникають за рахунок таких факторів:

- відхилення трубок від вертикального положення;
- неврахування залежності зміни густини робочої рідини манометра від температури;
- зміни довжини шкали під впливом температури;
- відхилення величини прискорення вільного падіння залежно від географічної широти.

Деформаційні прилади (ЧЕ перетворює величину тиску на механічне пересування) мають такі характеристики:

а) функція перетворення $x = f(p_1 - p_2)$;

б) жорсткість пружного елемента щодо різниці тисків

$$k_{\delta} = (p_1 - p_2) / x, \text{ Н / м}; \quad (6.11)$$

в) чутливість пружного елемента

$$s_{\delta} = 1 / k_{\delta} = x / (p_2 - p_1), \text{ м / Па}. \quad (6.12)$$

г) ефективна площа пружного елемента

$$F_{ef} = k_c / k_{\delta}, \quad (6.13)$$

де $k_c = P / x$ – жорсткість пружного елемента щодо результуючої сили P Н / м .

Взаємозв'язок між цими характеристиками може бути поданий у вигляді виразів:

$$P = (p_1 - p_2) \cdot F_{ef}, \quad x = (p_1 - p_2) \cdot F_{ef} / k_c. \quad (6.14)$$

Функція перетворення має неоднозначність унаслідок гістерезису наявності

$$\Gamma = x_+ + x_-, \quad (6.15)$$

де x_+ і x_- – значення пересування при прямому та зворотному ходах, тобто при $P_+ = P_-$.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. У чому полягає фізичний зміст тиску, його основні розмірності та взаємозв'язок між ними?

2. Як називають прилади для вимірювання тиску залежно від його величини?

3. Наведіть класифікацію перетворювачів тиску.
4. Які бувають схеми пружинних елементів для вимірювання тиску?
5. Охарактеризуйте силові перетворювачі тиску.
6. Що ви знаєте про непрямі перетворювачі тиску?
7. Охарактеризуйте один із видів електричних перетворювачів тиску.
8. Що впливає на виникнення похибок при відбиранні статичного тиску?
9. Які особливості вимірювання тисків, близьких до атмосферного?
10. Як вимірюють вакуум?
11. Як вимірюють різницю тисків?
12. Як урахувати похибку, що виникає за рахунок різниці висоти точок відбирання та вимірювання тиску?
13. Які загальні вимоги до робочої рідини, за допомогою якої виконується вимірювання тиску середовища?
14. За рахунок чого в основному виникають похибки вимірювання тиску силовими перетворювачами?

7 ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ ГАЗІВ ТА РІДИНИ

7.1 Загальні відомості

Витрата – це кількість речовини (маси або об'єму), яка проходить через визначений переріз за одиницю часу.

Одиниці вимірювання витрати: $кг / с$; $м^3 / с$; $кг / год$; $м^3 / год$; $л / год$ та ін.

Об'ємна витрата газу або рідини залежить від тиску і температури середовища. При вимірюванні об'ємної витрати газів результати зводять до так званих *нормальних технічних умов*, щоб надалі їх можна було порівнювати. Для промислових вимірювань це $p_n = 101,3 \text{ кПа}$, $t_n = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, а в умовному позначенні витрати записують відповідний індекс \dot{V}_n , \dot{m}_n тощо. Індекс «*n*» означає, що витрата зведена до нормальних технічних умов.

Прилад, який вимірює витрату, має назву *витратомір*, а прилад для вимірювання кількості речовини, – *лічильник*. Лічильник може вимірювати лише середню витрату:

$$\bar{V} = V / (\tau_2 - \tau_1), \quad (7.1)$$

де $V = q_V \cdot (N_2 - N_1)$ – кількість рідини або газу, яка пройшла через лічильник за проміжок часу $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$; N_2 і N_1 – покази лічильника в моменти часу τ_2 і τ_1 ; q_V – стала лічильника.

Миттєва витрата може бути розрахована за формулами

$$\dot{m} = dM / d\tau, \quad \dot{V} = dV / d\tau. \quad (7.2)$$

Кількість речовини може бути визначена з показів витратоміра

$$V = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \dot{V} d\tau \quad \text{або} \quad M = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \dot{m} d\tau. \quad (7.3)$$

За методами вимірювання витратоміри поділяють на такі різновиди:

1) *пневмометричні* (напірні) – вимірюють витрату через швидкість струму в одній або декількох точках перерізу каналу;

2) *змінного перепаду тисків* – вимірюють витрату з перепаду тисків на місцевих звуженнях (стандартних (діафрагми, сопла Вентурі) або нестандартних) потоку;

3) *сталого перепаду тисків* – вимірюють витрату по перерізу потоку біля рухомої опори (поплавця), це прилади обтікання, або ротаметри;

4) *тахометричні* – вимірюють витрату за швидкістю обертання ротора, крильчатки або диска (кульки), розміщених у потоці;

5) *електромагнітні*, або *індукційні* – вимірюють витрату за ЕРС, яка індукується електропровідною рідиною в електромагнітному полі;

б) *ультразвукові* – вимірюють витрату за зміщенням звукових коливань рухомою рідиною.

Крім зазначених вище, є менш поширені витратоміри: *калориметричні, термоанемометричні, іонізаційні, радіоізотопні, лазерні* та ін.

Не всі різновиди витратомірів можна застосовувати в усіх випадках вимірювання витрати. Найбільш універсальними є витратоміри змінного перепаду тисків. Їх застосовують для вимірювання витрати рідини, газу та пари практично будь-яких тисків і температур.

Стандартні звужувальні прилади мають такі обмеження: їх не застосовують для малих діаметрів ($d < 50 \text{ мм}$), а також для середовищ із великою в'язкістю, з наявністю забруднень, абразивних частинок. Однак для цього є нестандартні пристрої – здвоєні діафрагми, сопла з профілем «чверть кола», сегментні діафрагми.

Лічильники бувають двох основних видів:

- 1) *тахометричні*, аналогічні витратомірам;
- 2) *об'ємні* – речовина вимірюється однаковими частинами (за об'ємом), дозами. Лічильники цього типу мають значно більше обмежень. Їх застосовують при невеликих тисках і температурах вимірюваної речовини та невеликих витратах.

7.2 Пневмометричне вимірювання витрати

Принцип дії пневмометричного способу вимірювання витрати базується на вимірюванні місцевих швидкостей потоку в окремих точках перерізу каналу W та подальшому визначенні середньої швидкості \bar{w} та витрати за відомим геометричним розміром каналу (наприклад, внутрішнім діаметром труби D), як показано на рис. 7.1. Середня величина об'ємної або масової витрати визначається з виразів

$$\dot{V} = \bar{w} \cdot \pi \cdot D^2 / 4, \text{ м}^3 / \text{с}, \text{ або } \dot{m} = \bar{w} \cdot \rho \cdot \pi \cdot D^2 / 4, \text{ кг} / \text{с}. \quad (7.4)$$

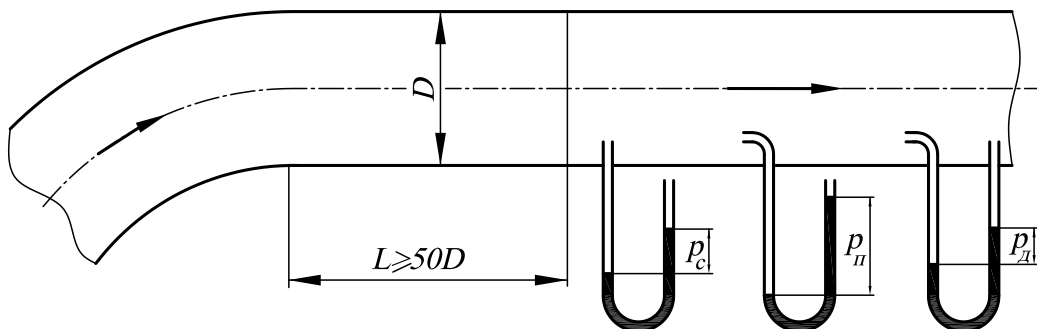


Рисунок 7.1 – Схема визначення статичного p_c , повного $p_п$ та динамічного $p_д$ тисків рухомого середовища

Із курсу гідрогазодинаміки відомо, що повний тиск середовища p_{Π} складається зі статичного p_C та динамічного p_D тисків (змінною геометричного напору нехтуємо, оскільки метод вимірювання застосовується, як правило, на горизонтальних ділянках трубопроводу):

$$p_{\Pi} = p_C + p_D, \quad (7.5)$$

звідки

$$p_D = p_{\Pi} - p_C = \Delta p.$$

З урахуванням того, що $p_D = \rho \cdot w^2 / (2 \cdot k_T) = \Delta p$, можемо записати формулу для визначення місцевої швидкості потоку на i -му радіусі:

$$w_i = k_T \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p_i / \rho}, \quad (7.6)$$

де k_T – коефіцієнт трубки.

Середня швидкість потоку може бути розрахована при виконанні n повторних вимірювань на різних радіусах труби в межах одного перерізу та визначена як середнє арифметичне:

$$\bar{w} = \sum w_i / n. \quad (7.7)$$

Необхідність багаторазових вимірювань пояснюється змінною місцевої швидкості середовища у радіальному напрямку внаслідок наявності в'язкісного тертя. Виходячи з викладеного, можна зробити висновок, що точність визначення залежить від розподілу швидкісних полів, які визначаються в першу чергу режимом руху середовища (рис. 7.2).

Отже, розподіл швидкості в трубі у загальному випадку може бути записаний функцією

$$w_i / \bar{w} = f(r / R; Re). \quad (7.8)$$

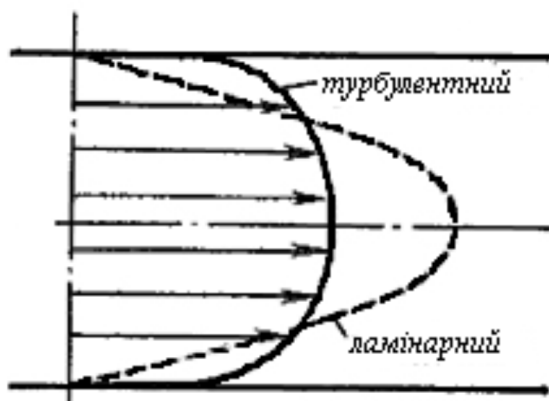


Рисунок 7.2 – Профілі швидкостей при ламінарному і турбулентному режимах руху

Для ламінарного потоку ($Re \leq 2320$) на основі емпіричних даних доведено, що $w_i / \bar{w} = 1$ при $r / R = 0,707$; для турбулентного потоку ($Re > 4000$) $w_i / \bar{w} = 1,0 \pm 0,005$ при $r / R = 0,762$.

Отже, при визначенні витрати середовища пневмометричним методом перш за все необхідно

оцінити режим руху середовища і залежно від цього визначити радіус встановлення точки відбору сигналу пневмометричної трубки.

Пневмометричну трубку вперше (1732 р.) застосував французький вчений Анрі Піто з метою визначення повного напору потоку (рис. 7.3). Зараз застосовують комбіновані трубки Піто-Прандтля, які дозволяють визначати динамічну складову напору як різницю повної і статичної складових. Зовнішній діаметр трубок становить $d = (5 - 12) \text{ мм}$.

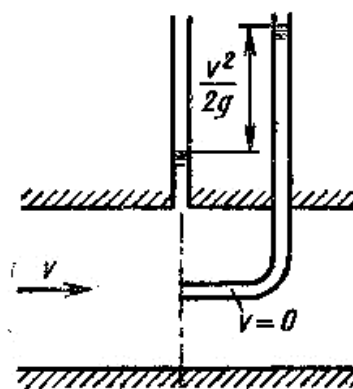


Рисунок 7.3 – Схеми встановлення трубок повного і статичного напору

Теоретично трубки Піто та Піто-Прандтля можна застосовувати при будь-яких параметрах (p і T), але на практиці вони застосовуються при невеликому статичному тиску.

7.3 Вимірювання витрати за перепадом тисків на звужуючому пристрої

7.3.1 Загальні рівняння витрати

Вимірювання витрати за перепадом тисків на звужуючому пристрої найбільш поширене у практиці теплотехнічних вимірювань. Витрату вимірюють за різницею статичних тисків до та після звуження. Звужуючі пристрої бувають стандартними та нестандартними.

Основні вимоги при застосуванні звужуючих пристроїв:

а) потік такий, що встановився, до та після звужуючого пристрою, наявні прямі ділянки довжиною $l \geq 50D$;

б) потік повністю заповнює всі перерізи трубопроводу та звужуючого пристрою;

в) вимірюване середовище однофазне, його фазовий стан не змінюється при проходженні звужуючого пристрою;

г) перед звужуючим пристроєм не накопичуються пил, бруд, конденсат тощо.

Загальний вигляд діафрагми та зміни тиску при проходженні звужуючого пристрою поданий на рис. 7.4.

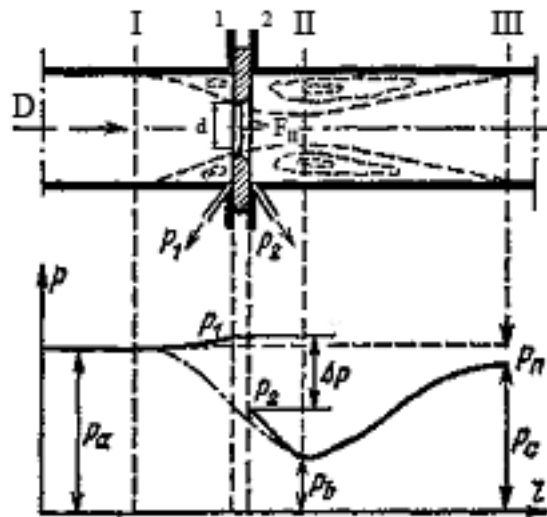


Рисунок 7.4 – Загальний вигляд діафрагми та зміни тиску при проходженні звужуючого пристрою:

F_1 ; F_0 ; F_2 – відповідно перерізи труби до та після діафрагми та найбільш вузької частини потоку; p_n – незворотні втрати напору

З рис. 7.4 видно, що після проходження звужуючого пристрою спостерігається значне падіння тиску, що супроводжується виникненням вихорів безпосередньо за діафрагмою. Саме за зміною цього тиску оцінюють витрату. Остаточний повний тиск потоку після проходження діафрагми завжди менший від початкового і залежить від режиму руху середовища, агрегатного стану середовища, типу звужуючого пристрою та інших факторів. Найбільшою втратою тиску характеризуються саме діафрагми порівняно з іншими типами звужуючих пристроїв: нормальними соплами, соплами Вентурі. Втрату тиску у звужуючому пристрої як елементі місцевого гідравлічного опору необхідно враховувати при проектуванні гідравлічних систем.

Основними геометричними розмірами при застосуванні звужуючого пристрою є:

– переріз внутрішньої частини труби перед звужуючим пристроєм $F_1 = \pi \cdot D^2 / 4$;

– переріз найбільш вузької частини потоку $F_0 = \pi \cdot d^2 / 4$,

де D – внутрішній діаметр труби; d – внутрішній діаметр найвузької частини звужуючого пристрою.

Однією з основних характеристик звужуючого пристрою, яка характеризує її геометрію, є модуль звужуючого пристрою

$$m = F_0 / F_1 = (d / D)^2. \quad (7.9)$$

Під час аналізу руху рідини через звужуючий пристрій вважають, що рідина є ідеальною та нестискуваною, а процес перетікання – адіабатний, швидкість руху рідини менша за швидкість звуку $w < a$ (повільна течія).

Рівняння Бернуллі для перерізів $I - I$ та $II - II$ (рис. 7.4) має вигляд

$$p_I / \rho_I + w_I^2 / 2 = p_{II} / \rho_{II} + w_{II}^2 / 2. \quad (7.10)$$

Також можемо записати рівняння нерозривності для вказаних перерізів

$$\rho_I \cdot w_I \cdot F_I = \rho_{II} \cdot w_{II} \cdot F_{II}; \quad \rho_I = \rho_{II}. \quad (7.11)$$

Площу перерізу F_{II} виміряти складно, тому вводять коефіцієнт звуження струменя μ . Тоді $F_{II} = \mu \cdot F_0$.

Отже, рівняння витрати з урахуванням зазначених вище припущень та рівнянь (7.11) матиме вигляд

$$w_I \cdot F_I = \mu \cdot w_{II} \cdot F_0, \quad (7.13)$$

тоді розрахункові значення швидкостей потоку у перерізах $I - I$ та $II - II$ з урахуванням рівнянь (7.9), (7.10) і (7.13)

$$w_I = \mu \cdot m \cdot w_{II}; \quad (7.14)$$

$$w_{II} = \frac{1}{\sqrt{1 - \mu^2 \cdot m^2}} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (p_I - p_{II})} = \frac{1}{\sqrt{1 - \mu^2 \cdot m^2}} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \Delta p}. \quad (7.15)$$

Прийнято визначати швидкість за перепадом тисків $\Delta p = p_1 - p_2$. При розрахунках вводять поправковий коефіцієнт ζ , який враховує вплив тертя між шарами рідини та між рідиною і нерухомою стінкою, тоді дійсна швидкість руху рідини у перерізі $II - II$

$$w_{II\alpha} = \left(\zeta / \sqrt{1 - \mu^2 \cdot m^2} \right) \cdot \sqrt{2 \cdot (p_1 - p_2) / \rho}. \quad (7.16)$$

Об'ємну витрату рідини можна розрахувати за рівнянням, m^3 / c :

$$\dot{V} = w_{II\alpha} \cdot F_{II} = w_{II\alpha} \cdot \mu \cdot F_0 = \left(\mu \cdot \zeta / \sqrt{1 - \mu^2 \cdot m^2} \right) \cdot \sqrt{2 \cdot (p_1 - p_2) / \rho}. \quad (7.17)$$

Або масову витрату, kg/c :

$$\dot{m} = \rho \cdot \dot{V} = \left(\mu \cdot \zeta / \sqrt{1 - \mu^2 \cdot m^2} \right) \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot (p_1 - p_2)}, \quad (7.18)$$

де $\alpha = \mu \cdot \zeta / \sqrt{1 - \mu^2 \cdot m^2}$ – коефіцієнт витрати звужуючого пристрою.

З урахуванням цього коефіцієнта можемо записати

$$\dot{V} = \alpha \cdot F_0 \cdot \sqrt{2 \cdot (p_1 - p_2) / \rho}; \quad \dot{m} = \alpha \cdot F_0 \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot (p_1 - p_2)}. \quad (7.19)$$

Для стискуваних середовищ додатково у співмножники вводять коефіцієнт ε на розширення середовища. Цей коефіцієнт $\varepsilon = \varepsilon(\Delta p / p_1)$, але, як правило, його найчастіше беруть за середньою величиною $\varepsilon = \bar{\varepsilon}$.

Це основні рівняння витратомірів зі звужуючими пристроями. Їх застосовують у припущенні, що значення ρ , F_0 , α і ε не залежать від витрати, і тоді можна записати

$$\dot{m} = k_M \cdot \sqrt{\Delta p}, \quad \dot{V} = k_0 \cdot \sqrt{\Delta p}, \quad (7.20)$$

де k_M і k_0 – сталі коефіцієнти.

Однак існуючі конструкції звужуючих пристроїв забезпечують $\alpha = \text{const}$ лише в обмеженому інтервалі числа Re , $\alpha = f(Re)$ (рис. 7.5). Отже, застосування такого спрощення призводить до зростання похибки вимірювання величини витрати.

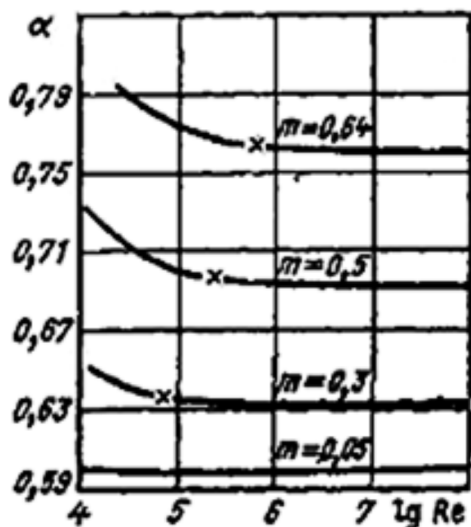


Рисунок 7.5 – Залежність $\alpha = f(Re)$

для стандартних діафрагм:

× – Re_{\min} , $\alpha = \text{const}$ для $Re > Re_{\min}$

Недоліки методу вимірювання витрати за допомогою звужуючих пристроїв:

а) квадратична залежність

$$\dot{V} = f(\Delta p);$$

б) у схему приладу треба включати пристрій для підрахунку

$$\sqrt{\Delta p};$$

в) звужений діапазон застосування (30–100) % від

максимальної витрати \dot{V}_{\max} , де гарантується точність витратоміра;

г) зміна густини середовища ρ при зміні термічних параметрів (p і T). Для

вирішення цієї проблеми вводять поправковий множник $C_M = \sqrt{\rho / \rho_{GP}}$,

$C_0 = \sqrt{\rho_{GP} / \rho}$, де ρ_{GP} – градувальна густина (відома величина), ρ – дійсна густина.

Наприклад, звужувальний пристрій розраховано для природного газу з $\bar{t} = 20^\circ C$, дійсна температура вимірювання $t = 5^\circ C$, поправковий множник при $p = \text{const}$ для об'ємної витрати

$$C_0 = \sqrt{\rho_{GP} / \rho} = \sqrt{T / T_{GP}} = \sqrt{278 / 293} = 0,974, \quad (7.21)$$

тобто зміна температури від 20 до 5 °C призводить до виникнення похибки у 0,026, або 2,6 %.

7.3.2 Основні розрахункові формули

Для практичного застосування рівняння витрати записують у такому вигляді:

$$\dot{V} = 0,01252 \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot m \cdot D^2 \cdot \sqrt{\Delta p / \rho}; \quad (7.22)$$

$$\dot{m} = 0,01252 \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot m \cdot D^2 \cdot \sqrt{\rho \cdot \Delta p}, \quad (7.23)$$

де $m = F_0 / F = d^2 / D^2$ – модуль звужуючого пристрою; D – внутрішній діаметр труби, мм; Δp – різниця тисків на звужуючому пристрої, $\text{кгс} / \text{м}^2$; ρ – густина, $\text{кг} / \text{м}^3$; G , $\text{кг} / \text{год}$ та \dot{V} , $\text{м}^3 / \text{год}$ – масова та об'ємна витрати.

Для розрахунку витрати необхідно обчислити величини α , ε , d , ρ у робочих точках при відомих діаметрах, виміряних при температурі 20°C d_{20} і D_{20} , і виміряному дифманометром перепаді тиску Δp .

Коефіцієнт витрати є величиною, яка залежить від багатьох факторів $\alpha = \alpha(m, \text{Re}, k_{ш}, k_{п})$, тому на практиці для його визначення часто користуються параметром α_f – початковий коефіцієнт витрати звужувального пристрою ідеальної форми, який має коефіцієнт витрати ідеальної діафрагми із прямокутною формою вхідної кромки при $\text{Re} > \text{Re}_{\min}$, яку встановлено в ідеально гладенькому трубопроводі (без шорсткості).

Значення α_f наведені у нормативних документах («Правилах вимірювання витрати газів та рідини 28-67», РД 50-213-80) залежно від $\alpha_{п} = \alpha_{п}(m, \text{Re})$.

Розрахунковий коефіцієнт витрати α знаходять залежно від типу звужуючого пристрою:

а) для діафрагм $\alpha = \alpha_{п} \cdot k_{ш} \cdot k_{п}$;

б) для сопел $\alpha = \alpha_{п} \cdot k_{ш}$,

де $k_{ш}$ – поправковий множник на шорсткість, $k_{ш} = k_{ш}(m, D)$;

$k_{п}$ – поправковий множник на затуплення вхідної кромки діафрагми, $k_{п} = k_{п}(m, D)$.

Поправковий множник ε на розширення середовища вводиться для врахування зміни густини газу $\varepsilon = \varepsilon(\Delta p / p, m, k)$ та може бути визначений емпіричними формулами.

На практиці при малих $\Delta p / p$ $\varepsilon \approx 1$, для $\Delta p / p \leq 0,05$, для сопел $\varepsilon_c > 0,94$, для діафрагм $\varepsilon_c > 0,97$.

Діаметри звужувального пристрою та трубопроводу $d = d_{20} \cdot K'_t$,
 $D = D_{20} \cdot K''_t$, K'_t і K''_t – поправкові множники на розширення матеріалу
звужуючого пристрою і труби. Для температур $(-20 - +60)^\circ\text{C}$ $K'_t = K''_t = 1$.

Густина ρ , яка входить у рівняння витрати, визначається за станом потоку до звужуючого пристрою. Для рідини за відсутності табличних даних за відомими ρ_n при температурі t_i густину визначають за формулою

$$\rho = \rho_i \cdot [1 - \beta \cdot (t - t_i)], \quad (7.24)$$

де t – робоча температура рідини; β – середній коефіцієнт об'ємного теплового розширення у температурному інтервалі $[t_n; t]$.

Густина сухого газу при робочих параметрах p і T визначається за формулою

$$\rho = \rho_n \cdot p \cdot T_n / (p_n \cdot T \cdot k), \quad (7.25)$$

де k – коефіцієнт стискуваності; $T_n = 293\text{ K}$, $p_n = 101,3\text{ kPa}$ – абсолютна температура і тиск за нормальних технічних умов.

7.3.3 Оцінювання похибки вимірювання витрати

Витрата при застосуванні звужуючих пристроїв визначається внаслідок непрямих вимірювань, тому похибку вимірювання витрати можна визначити, якщо відомі похибки вимірювання всіх складових, що входять до рівняння витрати.

Однак тут є труднощі. Рівняння витрати має дві групи величин, які отримані різними засобами. Величини α та ε обчислені після оброблення багатьох результатів вимірювань і для них відомі максимальні середньоквадратичні похибки σ_α та σ_ε . Другу групу величин – d , ρ і Δp – визначають однократними вимірюваннями і для них відомі максимальні відносні похибки δd , $\delta \rho$, $\delta(\Delta p)$. Додавати їх не можна. Тоді роблять припущення нормального розподілу похибок і при довірчій імовірності $P_0 = 0,95$ вважають, що середньоквадратична похибка вимірювання величини другої групи дорівнює половині максимальної, тобто $\sigma d = \delta d / 2$, $\sigma \rho = \delta \rho / 2$, $\sigma(\Delta p) = \delta(\Delta p) / 2$.

Як правило, дифманометри-витратоміри обладнані пристроями для добування квадратного кореня із Δp для отримання рівномірної шкали за витратою. У такому випадку клас дифманометра характеризує точність вимірювання $\sqrt{\Delta p}$, а не Δp , причому $\sigma_{\sqrt{\Delta p}} = \delta(\sqrt{\Delta p}) / 2$.

Середньоквадратичну похибку вимірювання масової витрати можемо знайти з виразу

$$\sigma \dot{m} = \sqrt{(\sigma \alpha)^2 + (\sigma \varepsilon)^2 + (\sigma \rho)^2 + (\sigma \sqrt{\Delta p})^2}.$$

Клас вторинного приладу визначає граничну похибку $\delta(\sqrt{\Delta p})$, а шукана максимальна відносна похибка $\delta \dot{m}$ дорівнює подвоєній середньоквадратичній похибці

$$\delta \dot{m} \cong 2 \cdot (\sigma \dot{m}).$$

7.3.4 Особливі випадки вимірювання витрати за допомогою нестандартних звужуючих пристроїв

При малих числах Рейнольдса Re застосовують *здвоєні діафрагми*, у яких коефіцієнт витрати є сталою величиною $\alpha = \text{const}$ у широкому діапазоні чисел Re , а також *сопла із профілем у чверть кола*.

У здвоєній діафрагмі основна діафрагма – друга за напрямком руху потоку. Саме для неї виконують розрахунки. Відстань між діафрагмами вибирається у діапазоні $l = (0,2 - 0,8)D$, а діаметри отворів $d_1 > d$ (рис. 7.6).

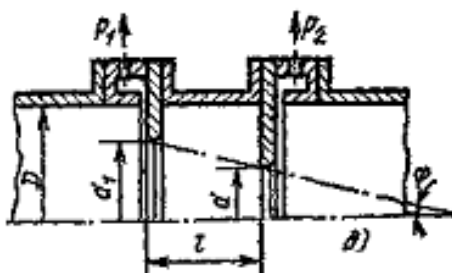


Рисунок 7.6 – Схема здвоєної діафрагми

Крім цих пристроїв, застосовують також при малих числах Рейнольдса Re *діафрагми з подвійним скосом*, *сопла з профілем «півколо»* (рис. 7.7).

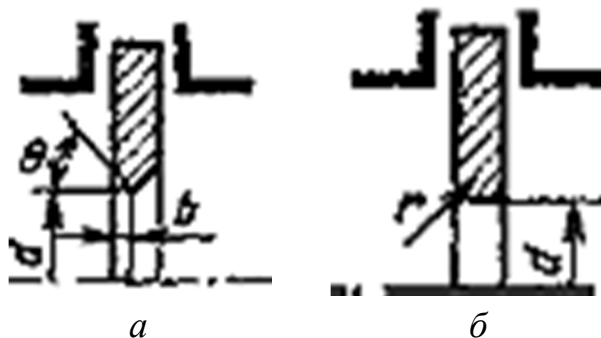


Рисунок 7.7 – Типи профілів діафрагм
а) з подвійним скосом; б) з профілем «півколо»

При вимірюванні витрати забрудненого середовища або при вимірюванні витрати великих газових потоків ($D > 1\text{ м}$) застосовують *сегментну діафрагму* (рис. 7.8), в якій знизу не відкладається сміття.

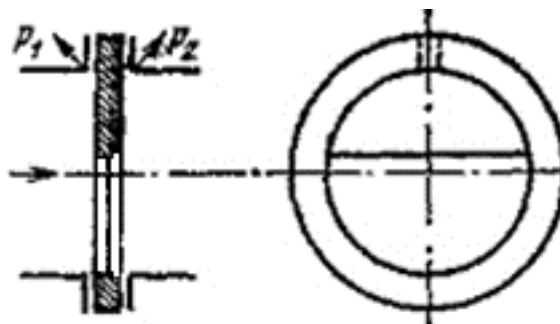


Рисунок 7.8 – Сегментна діафрагма

Для вимірювання витрати на вході у трубопровід або на виході з нього можна використовувати стандартні діафрагми.

Способи відбирання тиску подані на рис. 7.9.

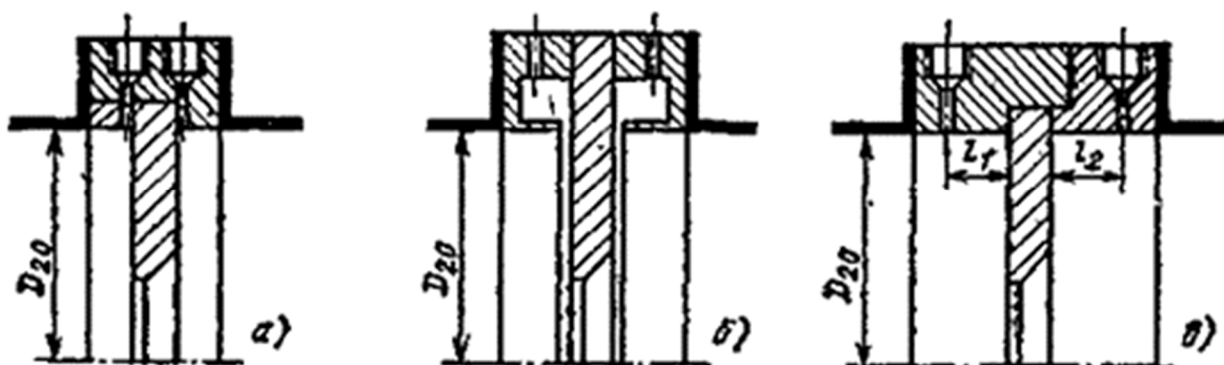


Рисунок 7.9 – Способи відбирання тиску:

a – через окремі отвори; *б* – через кільцеві камери; *в* – фланцевий

Отже, підсумовуючи викладене, зосередимо увагу на перевагах та недоліках звужуючих пристроїв. Серед переваг треба виділити:

- 1) простоту, надійність і дешевизну;
- 2) універсальність – широкий діапазон параметрів (діаметрів, витрати тощо);
- 3) можливість отримання характеристики пристрою $\dot{V} = f(\Delta p)$ розрахунковим шляхом;
- 4) можливість використання однотипних дифманометрів для різних умов вимірювання.

До недоліків застосування звужуючих пристроїв відносять:

- 1) нелінійність характеристики $\dot{V} = f(\Delta p)$, яка при витраті $\dot{V} < 0,3 \cdot \dot{V}_{\max}$ призводить до значного зростання відносної похибки;
- 2) необхідність індивідуального градуювання звужуючих пристроїв при вимірюваннях витрати середовищ, що рухаються з малими числами Рейнольдса Re або у трубах малого діаметра ($d_y < 50$ мм);
- 3) обмежену точність похибки у межах (1,5 – 3) %;
- 4) значну інерційність (унаслідок наявності довгих імпульсних трубок), труднощі вимірювання витрати, яка швидко змінюється.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що таке витрата, одиниці її вимірювання?
2. Які витратоміри за методами вимірювань ви знаєте?
3. У чому полягає відмінність лічильника від витратоміра та які різновиди лічильників ви знаєте?
4. Опишіть пневмометричний спосіб вимірювання витрати.
5. Які різновиди пневмометричних трубок ви знаєте, їх призначення.
6. У чому полягають основні вимоги при застосуванні звужуючих пристроїв?
7. Опишіть стандартну діафрагму.
8. Що таке модуль звужуючого пристрою та як він впливає на величину витрати?
9. Перелічіть основні недоліки методу вимірювання витрати за допомогою звужуючих пристроїв.
10. Які фактори впливають на величину похибки визначення витрати середовища за допомогою звужуючого пристрою?
11. Коли застосовують здвоєні діафрагми?
12. З якою метою діафрагму виготовляють із профілем «півколо»?
13. Що дає наявність подвійного скосу на діафрагмі?
14. Коли застосовують сегментну діафрагму?
15. Які способи відбирання тиску ви знаєте? Зобразіть їх схематично.
16. У чому полягають основні переваги застосування звужуючих пристроїв?

8 ВИМІРЮВАННЯ РІВНЯ

8.1 Загальні відомості

Вимірювання рівня рідин та сипких тіл найчастіше застосовується з метою автоматизації технологічних процесів. Рівнеміри застосовуються або з метою контролю за відхиленням рівня від номінального, і у цьому випадку вони мають двосторонню шкалу, або для визначення кількості речовини (при відомих розмірах ємності) і у цьому випадку вони мають односторонню шкалу. Велику групу займають сигналізатори рівня, які спрацьовують при досягненні рівня мінімального або максимального значення.

Залежно від умов вимірювань, характеру контролюваного середовища застосовуються різні методи вимірювання рівня. Якщо відсутня необхідність у дистанційній передачі показів, то застосовують рівнеміри з візуальним визначенням (показуючі скельця із нанесеної на них шкалою). Якщо сигнал рівня необхідно дистанційно передавати, то застосовують більш складні рівнеміри: гідростатичні (дифманометричні та барботажні), буйкові та поплавцеві, ємнісні, індуктивні, радіоізотопні, хвильові, акустичні, термокондуктометричні. Різноманітність конструкцій та принципів дій зумовлена їх застосуванням для вимірювання рівня води, розчинів та суспензій, нафтопродуктів, меж розподілу середовищ, сипких тіл тощо.

8.2 Рівнеміри з візуальним відліком

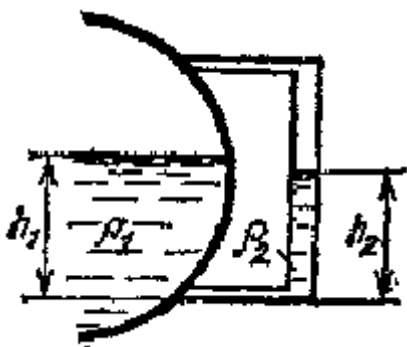


Рисунок 8.1 – Схема рівнеміра з візуальним відліком

Принцип дії базується на візуальному вимірюванні висоти рівня рідини. При невеликих тисках середовища висота рівня вимірюється за допомогою скляної трубки з нанесеною на неї шкалою (показуючого скельця), яка з'єднана з рідинним та газовим просторами контролюваного резервуара (рис. 8.1). При підвищених тисках застосовуються плоскі скельця на поверхні яких із боку рідини нанесені вертикальні огранені канавки. Максимальна довжина показуючого скельця не повинна перевищувати 0,5 м з метою забезпечення умов міцності. При великому діапазоні вимірювання рівня встановлюють декілька скелець у шаховому порядку таким чином, щоб їхні діапазони перекривалися.

Основним джерелом додаткової похибки таких рівнемірів є різниця густин рідини у контрольованому резервуарі та у склі, яка виникає за рахунок відмінності у температурі середовищ.

Абсолютна похибка вимірювання рівня може бути обчислена за формулою

$$\Delta h = h_2 - h_1 = h_2 \cdot \left(1 - \frac{\rho_2}{\rho_1}\right), \quad (8.1)$$

де ρ_1 і ρ_2 – густини рідини у резервуарі та показуючому скельці.

З метою зменшення або запобігання виникненню зазначеної похибки виконують теплове ізолювання рівнеміра або його продування рідиною з резервуара безпосередньо перед вимірюванням.

8.3 Гідростатичні рівнеміри

Принцип дії гідростатичних рівнемірів базується на вимірюванні гідростатичного тиску рідини на основі рівняння

$$p = \rho \cdot g \cdot h \pm p_M, \quad (8.2)$$

звідки можна визначити висоту гідростатичного стовпа h .

У наведеній вище формулі p_M – покази манометра (підставляється знак «+») або покази вакуумметра (підставляється знак «-») залежно від умов вимірювання.

Схема гідростатичного рівнеміра подана на рис. 8.2.

Зонд являє собою трубку 1, внутрішня порожнина якої має контакт з рідиною. Таким чином, тиск усередині трубки збігається із тиском рідини. У нижній частині трубки 1 знаходяться вимірювальна мембрана, тензоперетворювач та електрична схема, захищена від потрапляння рідини ковпаком 2. Вентиляційна трубка з'єднана з простором під вимірювальною мембраною та атмосферою. М'яка трубка 3 може мати довжину до 20 м, у ній знаходяться несучий тросик a та екрановані струмові виводи b , вентиляційна трубка v діаметром 1 мм. Зонд витримує перевантаження до 0,6 МПа, вихідний сигнал становить (4 – 20) мА, похибка не перевищує $\pm 0,3$ %. Найбільш поширеним дифманометром-рівнеміром з відкритою мембраною є прилад типу «Метран».

Якщо у трубці, яка з'єднує газовий простір над рідиною із площиною статичного тиску перетворювача, утворюється конденсат, то для вимірювання рівня застосовуються дифманометри із додатковими пристроями для стабілізації рівня конденсату. Гідростатичний рівнемір, у якому гідростатичний тиск рідини вимірюється дифманометром, називається

дифманометричним. Гідростатичний рівнемір, у якому гідростатичний тиск рідини перетворюється у тиск повітря, називається *пневморівнеміром*. Різновидом пневморівнеміра є *барботажний рівнемір*, у якому повітря, яке подається від зовнішнього джерела, барботує через шар рідини.

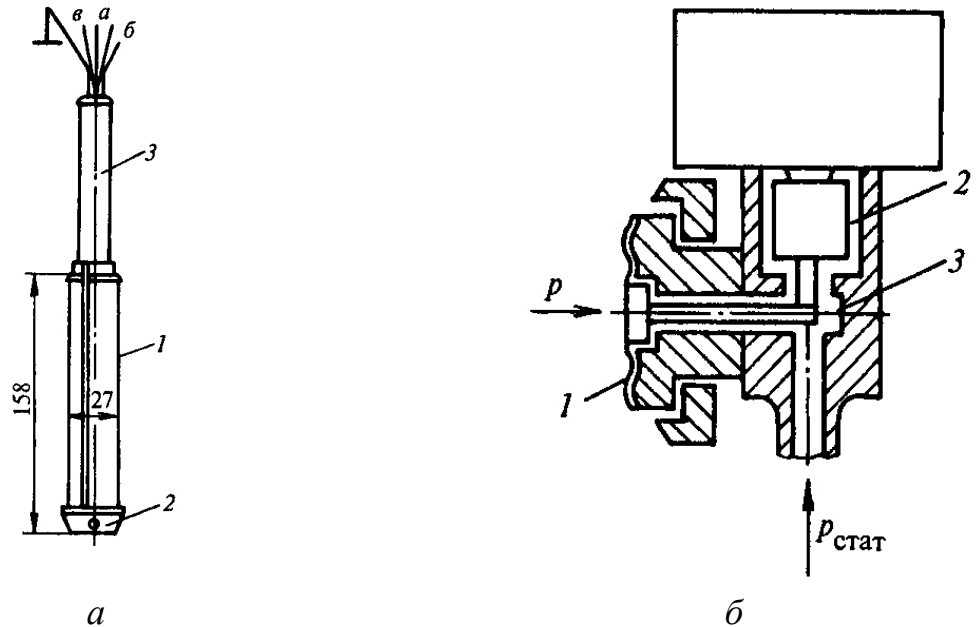


Рисунок 8.2 – Схема гідростатичного рівнеміра:
 а) занурювальний зонд; 1 – труба; 2 – ковпак; 3 – м'яка трубка;
 б) дифманометр із відкритою мембраною; 1 – мембрана;
 2 – тензоперетворювач; 3 – площина статичного тиску

Схема під'єднання дифманометра до відкритого резервуара, який перебуває під атмосферним тиском, подана на рис. 8.3.

Обидві імпульсні трубки дифманометра 2 заповнюються контрольованою рідиною (якщо вона неагресивна). Дифманометр вимірює різницю тисків p_1 і p_2 , які впливають на чутливий елемент. Величини тисків можна розрахувати з виразів:

$$p_1 = (H + h_1) \cdot \rho_1 \cdot g; \quad (8.3)$$

$$p_2 = h_2 \cdot \rho_2 \cdot g. \quad (8.4)$$

Таким чином, дифманометр буде вимірювати перепад тисків, який виявляється через контрольований рівень H :

$$\Delta p = p_1 - p_2 = (H + h_1) \cdot \rho_1 \cdot g - h_2 \cdot \rho_2 \cdot g. \quad (8.5)$$

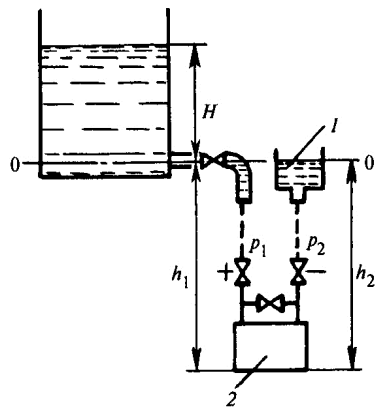


Рисунок 8.3 – Схема під'єднання дифманометра при вимірюванні рівня у відкритому резервуарі:
1 – зрівнювальна посудина; 2 – дифманометр

виникненню цієї похибки імпульсні трубки прокладають поряд), а також при відхиленні рівня у «мінусовій» імпульсній трубці (позначеній знаком «-»), тобто коли $h_1 \neq h_2$. Для суттєвого зменшення останньої похибки встановлюють зрівнювальну посудину 1 (рис. 8.3), площа якої значно перевищує площу перерізу імпульсної трубки.

При вимірюванні рівня рідини у посудинах, що перебувають під тиском, що не дорівнює атмосферному, застосовується рівнемір із однокамерною зрівнювальною посудиною (рис. 8.4).

Особливість схеми, показаної на рис. 8.4, полягає у її герметичності щодо навколишнього середовища, а також у підтриманні сталості рівня H за рахунок відсутності коливань температури в імпульсній трубці 2 та бакові 1, яка є близькою до температури навколишнього середовища.

Різниця тисків, яку вимірює дифманометр для випадку, що розглядається, може бути визначена за виразом

$$\begin{aligned} \Delta p &= p_1 - p_2 = [H \cdot \rho_e - h \cdot \rho' - (H - h) \cdot \rho''] \cdot g = \\ &= [H \cdot (\rho_e - \rho') - h \cdot (\rho' - \rho'')] \cdot g, \end{aligned} \quad (8.7)$$

Для випадку, коли $\rho_1 = \rho_2$ (рідини у обох імпульсних однакові) та $h_1 = h_2$, будемо мати

$$\Delta p = H \cdot \rho \cdot g. \quad (8.6)$$

Похибка показів такого вимірювання рівня може виникати, якщо виникне різниця густин ρ_1 і ρ_2 в імпульсних трубках (для запобігання

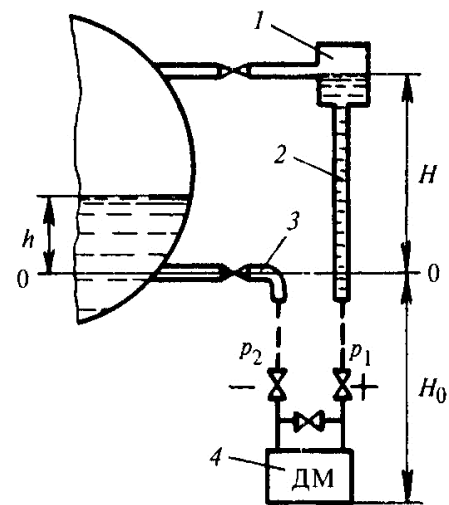


Рисунок 8.4 – Схема рівнеміра з однокамерною зрівнювальною посудиною:

1 – зрівнювальна посудина; 2, 3 – імпульсні трубки; 4 – дифманометр

де ρ_e – густина води у зрівнювальній посудині та імпульсній трубці; ρ' – густина стовпчика рідини в барабані висотою h ; ρ'' – густина стовпчика пари в барабані висотою $H - h$.

Покази дифманометра рівнеміра при зазначеній схемі вимірювання залежать не лише від поточного значення рівня, але й від густин води ρ' та пари ρ'' , які, у свою чергу, залежать від температури й тиску середовища у барабані. Для зменшення похибки, що виникає за рахунок впливу зміни термічних параметрів середовища, шкалу дифманометра-рівнеміра налаштовують на робочий (номінальний) тиск.

На результати також впливає зміна густини води в імпульсній трубці, яка може відбуватися за рахунок зміни температури навколишнього середовища або середовища у барабані. Для зменшення впливу зазначеного фактора застосовують *двокамерні зрівнювальні посудини*. Зовнішня поверхня посудини (перша камера), яка працює з барабаном за принципом з'єднаних посудин, вкрита теплоізоляцією для того, щоб густина води у ньому і у внутрішній трубці (друга камера) дорівнювала густині води у барабані. Аналогічно однокамерній зрівнювальній посудині у внутрішній трубці підтримується максимальний верхній рівень води H .

При вимірюванні рівня агресивної рідини на імпульсних лініях встановлюють розподільні пристрої. При цьому дифманометр та імпульсні трубки нижче розподільних пристроїв заповнюються неагресивною рідиною.

Для створення мінімальної похибки вимірювання тиску при номінальному рівні у барабані застосовують *рівнеміри з комбінованими зрівнювальними посудинами*. За конструкцією вони схожі на двокамерні зрівнювальні посудини. Основна відмінність конструкції полягає у виведенні заданої частини внутрішньої («плюсової») імпульсної трубки за межі першої («мінусової») камери. Це призводить до охолодження «плюсової» імпульсної трубки та, як наслідок, – до зростання навантаження на дифманометр. При незмінному налаштуванні дифманометра заміна двокамерної зрівнювальної посудини на комбіновану призводить до зміщення точки сходження статичних характеристик вимірювального приладу від максимальних значень показів рівнеміра до нульових (номінальних).

Отже, для забезпечення високої точності вимірювання необхідне забезпечення рівності температур у барабані та посудині, що забезпечується ізоляцією цих посудин, а також рівність температур в імпульсних трубках, що забезпечується близькістю їх прокладання. Однак усі три розглянуті типи дифманометричних рівнемірів не забезпечують незалежності показів від зміни тиску при довільному значенні контрольованого рівня. При застосуванні мікропроцесорних рівнемірів, окрім розглянутих схем,

застосовують автоматичну корекцію показів за сигналами датчиків температури вимірюваного та оточуючого середовищ, а також датчика тиску середовища.

Усі розглянуті схеми дифманометричних рівнемірів можуть застосовуватися для вимірювання рівня рідин в об'єктах електростанцій або промислових підприємств. Конкретна схема вимірювання визначається умовами роботи об'єкта та необхідною точністю вимірювання рівня. Наприклад, при вимірюванні рівня у підігрівачах живильної або мережевої води електростанцій найчастіше застосовують однокамерні зрівнювальні посудини. При вимірюванні рівня кріогенних середовищ дифманометри-рівнеміри під'єднують до ємностей без зрівнювальних посудин. Дифманометр отримує сигнал за тиском пари із парової частини та пари, яка утворюється при проходженні спеціального ковпачкового пристрою, а при великих різницях температур між оточуючим та вимірюваним середовищами (на практиці більше 50 °С) додатково застосовують камери із «тепловою сорочкою» – рекуперативні теплообмінні апарати.

Верхні межі вимірювань або сума абсолютних значень нижньої та верхньої меж дифманометрів-рівнемірів вибирають із ряду: 0,25; 0,4; 0,63; 1,0; 1,6; 2,5; 4,0; 6,3; 10; 16; 25; 40; 63 м.

Метод вимірювання рівня дифманометрами має ряд переваг: механічна міцність, простота монтажу, надійність. Основний недолік цього методу – чутливий елемент дифманометра перебуває у безпосередньому контакті з контрольованим середовищем. Для виключення потрапляння агресивного середовища до дифманометра застосовують включення розподільних пристроїв, продування імпульсних ліній чистою водою тощо.

8.4 Поплавцеві та буйкові рівнеміри

Поплавцевим називають рівнемір, що базується на вимірюванні положення поплавця, частково зануреного у рідину, причому ступінь занурення поплавця при сталій густині рідини не залежить від величини рівня. Поплавець переміщається вертикально разом із рівнем рідини та, як наслідок, за його положенням може бути визначено величину рівня.

Об'єм зануреної частини поплавця (осадження) є параметром, який визначає додаткову похибку, викликану зміною густини контрольованої рідини. Для зменшення цієї похибки доцільно зменшувати осадження поплавця, що може досягатися збільшенням площі поперечного перерізу поплавця, або зменшенням його маси.

Тип передачі сигналу залежить від термічних параметрів середовища. При тиску середовища, близькому до атмосферного, та температур, що знаходяться у діапазоні $(-50 - +50)$ °C застосовують безпосередню механічну передачу сигналу від поплавця до показуючого пристрою через систему важелів. Така конструкція має значний діапазон вимірювань, але не забезпечує гарної герметизації резервуара. При більших значеннях температури й тиску застосовують поплавцеві рівнеміри з магнітними перетворювачами. Такий рівнемір забезпечує вимірювання рівня за рахунок зміни магнітного поля при переміщенні сталого магніту, жорстко закріпленого із поплавцем, під дією виштовхувальної сили рідини. Вихідний сигнал таких рівнемірів – електричний (сила струму) або цифровий, який виробляється за допомогою герконів. При додатковому застосуванні датчиків температури рідини подібні рівнеміри дозволяють вимірювати масу середовища з урахуванням зміни густини рідини від температури.

Магнітні поплавці входять до складу ультразвукових рівнемірів.

Буйковими називають рівнеміри, дія яких ґрунтується на законі Архімеда: залежності виштовхувальної сили, яка діє на буйок, від рівня рідини. Чутливий елемент таких рівнемірів – масивне тіло (наприклад, циліндр) – буйок, підвішений вертикально всередині посудини та частково занурений у контрольовану рідину. Характеристика

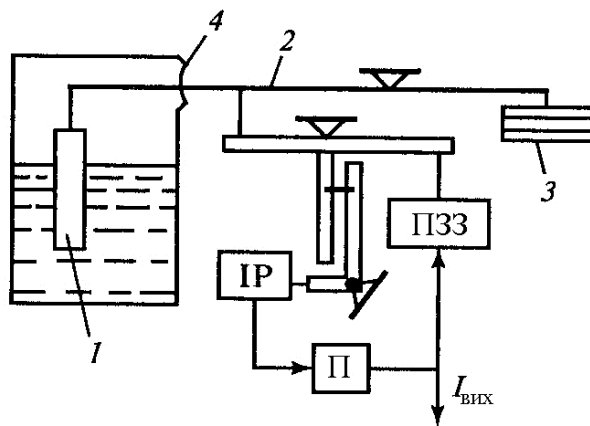


Рисунок 8.5 – Схема буйкового рівнеміра з електросиловим перетворювачем:

1 – буйок; 2 – важіль; 3 – вантаж; 4 – розподільна мембрана; IP – індикатор розузгодження; П – підсилювач; ПЗЗ – прилад зворотного зв'язку

рівнеміра має лінійний характер. Його чутливість може бути збільшена за рахунок зменшення площі буйка або зменшення жорсткості підвіски. Найбільш часто буйкові рівнеміри застосовуються у схемах із силовою компенсацією та уніфікованим струмовим або пневматичним вихідним сигналом. Такі рівнеміри призначені для вимірювання рівня в'язких та нев'язких рідин, що не випадають в осад, не кристалізуються.

Схема рівнеміра з електросиловим перетворювачем подана на рис. 8.5. Буйок 1 підвішений на кінець важеля 2, на іншому кінці якого розміщено вантаж 3, який зрівноважує вагу буйка 1 при нульовому рівні. Розподільна мембрана 4 слугує для герметизації резервуара. При вимірюванні рівня

змінюється зусилля, з яким буйок діє на важіль. Небаланс зусиль призводить до зміщення важеля та осердя диференціально-трансформаторного перетворювача, який виконує функцію індикатора розузгодження IP . Його вихідний сигнал надходить до підсилювача $П$, вихідний струмовий сигнал якого $I_{вих}$ надходить на вихід приладу та у прилад зворотного зв'язку $ПЗЗ$, який є електросиловим перетворювачем, який усуває небаланс сил.

8.5 Ємнісні рівнеміри

Ємнісними називаються рівнеміри, дія яких ґрунтується на залежності електричної ємності конденсаторного перетворювача, створеного одним або декількома стрижнями, циліндрами або пластинами, частково зануреними у рідину, від її рівня.

Конструкція конденсаторних перетворювачів відмінна для електропровідних та неелектропровідних рідин. Відмінність полягає в тому, що один з електродів рівнеміра для електропровідних рідин укритий електроізоляційним шаром, електроди перетворювачів для неелектропровідних рідин не мають електроізоляції. Електроди можуть мати різну форму, але найчастіше вони бувають циліндричними. Це зумовлено гарною технологічністю, кращою перешкодо-стійкістю, значною жорсткістю конструкції.

Конденсаторний перетворювач для неелектропровідних рідин, який складається з двох коаксіально розміщених електродів 1 і 2 , розміщених у резервуарі 3 , в якому виконується вимірювання рівня, показаний на рис. 8.6 а.

Взаємне розміщення електродів зафіксоване ізолятором 4 . Електроди утворюють циліндричний конденсатор, частина міжелектродного простору якого висотою H заповнена контрольованою рідиною, інша частина висотою $H-h$ – її парою.

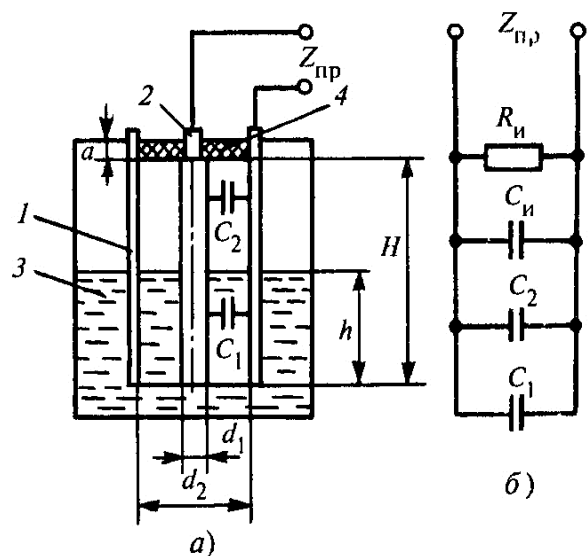


Рисунок 8.6 – Схема конденсаторного перетворювача рівня для неелектропровідних середовищ:

$1, 2$ – електроди; 3 – резервуар; 4 – електроізолятор

У загальному вигляді ємність циліндричного конденсатора визначається за виразом

$$C = 2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot H / \ln(d_2 / d_1), \quad (8.8)$$

де $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ – діелектрична проникність вакууму; ε – діелектрична проникність речовини, яка заповнює міжелектродний простір; H – висота електродів; d_1 і d_2 – діаметри внутрішнього і зовнішнього електродів.

З урахуванням зазначеної формули можна записати вираз для ємностей частин перетворювача C_1 , яка знаходиться у рідині, та C_2 , яка знаходиться у паровому (газовому) просторі:

$$C_1 = 2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_p \cdot \varepsilon_0 \cdot h / \ln(d_2 / d_1); C_2 = 2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_2 \cdot \varepsilon_0 \cdot (H - h) / \ln(d_2 / d_1), \quad (8.9)$$

де ε_p та ε_2 – відносні діелектричні проникності рідини та газу (пари) над нею.

Сумарний вихідний опір перетворювача $Z_{зв}$, крім ємностей C_1 та C_2 , визначається також ємністю C_i прохідного ізолятора та його активним опором R_i (ємність C_i утворюється електродами перетворювача на ділянці a ; опір R_i зумовлений провідністю матеріалу ізолятора на цій ділянці), а також ємністю і провідністю з'єднувального кабелю.

Таким чином, електрична схема перетворювача має вигляд, показаний на рис. 8.6 б. Сумарна ємність перетворювача

$$C_{зв} = C_i + C_1 + C_2. \quad (8.10)$$

Ємність C_i не залежить від величини h та є сталою величиною для визначеного типу перетворювача. Відносна діелектрична проникність газів (найчастіше це повітря) $\varepsilon_2 = 1$, тому

$$C_{зв} = C_i + \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0}{\ln(d_2 / d_1)} \cdot H \cdot \left[1 + (\varepsilon_p - 1) \cdot h / H \right]. \quad (8.11)$$

Таким чином, при $\varepsilon_p = \text{const}$ ємність $C_{зв}$ однозначно залежить від вимірюваного рівня h , але в реальних умовах ε_p може змінюватись, наприклад, при зміні температури рідини, її складу тощо. Для зменшення впливу зміни ε_p на покази рівнеміра застосовують компенсаційний конденсатор.

Негативний вплив на роботу ємнісних рівнемірів чинить активний опір перетворювача, який складається з активного опору прохідного ізолятора та активного опору контрольованої рідини у міжелектродному просторі. Остання складова, як правило, є досить малою. Для зменшення впливу

активного опору перетворювача у схему рівнеміра включають фазовий детектор. У конденсаційних перетворювачах для електропровідних рідин один з електродів ізолюють. Якщо резервуар металевий, його стінки можуть бути використані як другий електрод. У протилежному разі у рідину встановлюють металевий неізолюваний стрижень, який виконує роль другого електрода.

Ємнісні рівнеміри отримали значне поширення особливо як сигналізатори через дешевизну, простоту обслуговування, зручність монтажу первинного перетворювача, відсутність рухомих елементів, можливість застосування у широкому діапазоні температур і тисків. Суттєвою перевагою цих рівнемірів є нечутливість до сильних магнітних полів, можливості застосування у широкому інтервалі температур (від криогенних до 500 °C) та тисків. До недоліків треба віднести нездатність до вимірювання рівня в'язких (із коефіцієнтом динамічної в'язкості, більшим від 1 Па·с), плівкоутворювальних рідин, а також рідин, що кристалізуються або мають домішки, які випадають в осад. Також до недоліків відносять високу чутливість до зміни електричних властивостей рідини та ємності кабелю, який з'єднує первинний перетворювач із вторинним приладом.

8.6 Індуктивні рівнеміри

Принцип дії індуктивних рівнемірів базується на залежності одиничної котушки або взаємної індуктивності двох котушок від глибини їх занурення в електропровідну рідину. Така залежність зумовлена виникненням у рідині під дією магнітного поля змінного струму збудження вихрових струмів, магнітне поле яких впливає на розмагнічування поля струму збудження.

Згідно із визначенням індуктивність L котушки являє собою відношення магнітного потоку Φ до сили струму I , яка створює цей потік: $L = \Phi / I$. При зануренні котушки у рідину в ній виникають вихрові струми, магнітне поле яких згідно із законом Ленца спрямоване назустріч основному, тобто результуючий магнітний потік буде менший потоку «сухої» котушки. Це означає, що індуктивність зануреної котушки менша від індуктивності сухої котушки. Таким чином, якщо індуктивний перетворювач являє собою одну довгу котушку, то її індуктивність та повний опір $Z = R + j\omega L$ будуть залежати від глибини занурення (R – активний опір котушки; ω – колова частота струму збудження). Існують індуктивні перетворювачі, які складаються з двох з'єднаних котушок, що утворюють трансформатор (трансформаторні перетворювачі). Виходячи з викладеного, індуктивні рівнеміри придатні для вимірювання лише струмопровідних рідин. Крім

того, оскільки інтенсивність вихрових струмів залежить від електропровідності середовища, її зміна у процесі вимірювання викличе появу додаткової похибки. Ці рівнеміри набули найбільшого поширення для вимірювання рівня рідиннометалічних теплоносіїв у енергетичних установках.

Найпростіша схема індуктивного трансформаторного перетворювача наведена на рис. 8.7 а. Перетворювач складається з обмотки збудження 1, якою рухається змінний струм збудження $I_{зб}$, та вторинної обмотки 2, з якої знімають вихідний сигнал $U_{вих}$. Перетворювач знаходиться у металевому захисному чохлі 3, який герметично закріплений у кришці резервуара. Це дозволяє здійснювати заміну рівнеміра без порушення герметичності контуру. Під дією потоку збудження у товщі контрольованого середовища виникають вихрові струми. Це призводить до зміни взаємної індуктивності контуру M між обмотками від рівня контрольованої рідини. Зазначена залежність має лінійний характер по всій довжині обмоток, окрім кінцевих ділянок, довжиною, яка дорівнює діаметру котушки, де характеристика викривлюється.

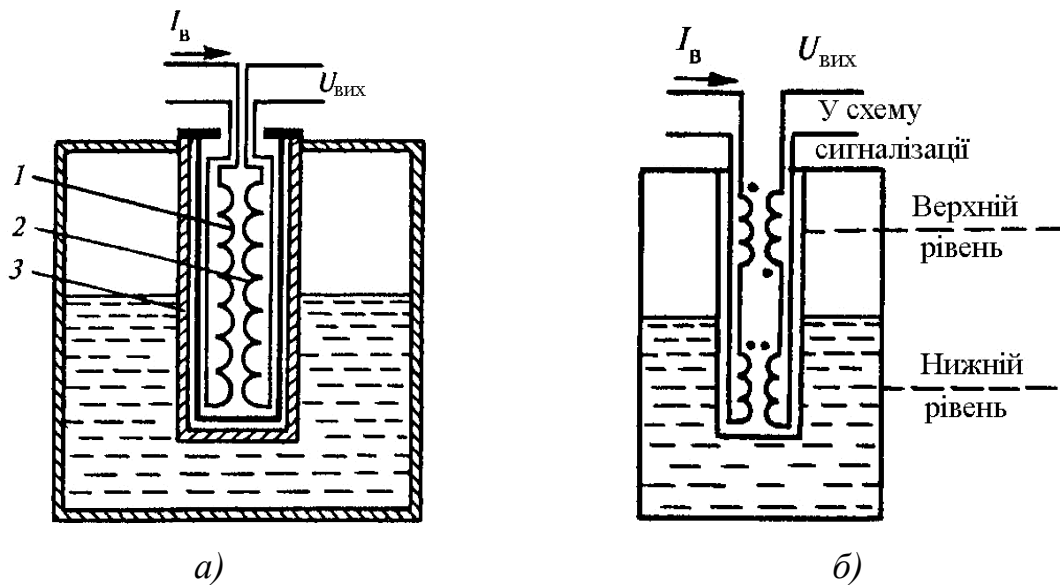


Рисунок 8.7 – Схема індуктивного трансформаторного перетворювача рівня: а) аналогового рівнеміра; 1 – обмотка збудження; 2 – вторинна обмотка; 3 – металевий захисний чохол; б) сигналізатор граничних значень рівня

Отже, ЕРС $E = \omega \cdot M \cdot I_{зб}$ у вторинній обмотці, а отже, і вихідна напруга $U_{вих}$ будуть лінійно залежати від рівня. З рис. 8.7 а видно, що взаємодія полів збудження та вихрових струмів здійснюється через металевий захисний чохол, який послаблює поля та, як наслідок, погіршує чутливість перетворювача. Причому екранувальна дія чохла збільшується зі зростанням

частоти ω струму збудження $I_{зб}$. Однак вибирати малі значення ω недоцільно, оскільки при цьому зменшується ЕРС E у вторинній обмотці, а отже, і $U_{вих}$. Як правило, частоту ω обирають такою, що дорівнює $4 - 5$ кГц.

Основний недолік трансформаторних перетворювачів – вплив зміни температури контрольованого середовища на результат вимірювання. Цей вплив зумовлений зміною активного опору обмоток залежно від зміни температури та зміною їх індуктивності у зв'язку з лінійним розширенням дроту, а також зміною провідності чохла та контрольованого середовища. Крім того, на результат вимірювання будуть впливати зміна складу середовища, а також зміна з часом властивостей матеріалу чохла. При вимірюванні рівня рідких металів також буде впливати наявність на чохлах плівки розплаву або плівки оксидів, автоматична компенсація цих похибок є складним завданням через складність вимірювання впливаючих величин та складного характеру їх впливу на похибку.

Перетворювачі трансформаторного типу часто застосовують як сигналізатори граничних значень рівня. У цьому випадку перетворювач складається з двох окремих коротких трансформаторів, рознесених на відстань, яка дорівнює різниці верхнього та нижнього рівнів (рис. 8.7 б). Первинні обмотки трансформаторів увімкнені послідовно та живляться від одного джерела. Вторинні обмотки увімкнені зустрічно, сигнал різниці спрямовується у схему сигналізації. спрацювання схеми аварійної сигналізації відбувається лише при нульовому значенні вихідної напруги $U_{вих}$, тобто коли ЕРС у вторинних обмотках трансформаторів буде однаковою. Очевидно, що це відбудеться у тому випадку, якщо обидва трансформатори опиняться одночасно або нижче рівня (тобто коли рівень досягне верхнього аварійного значення), або вище рівня (коли рівень досягне нижнього аварійного значення). При проміжних значеннях рівня $U_{вих} \neq 0$, тому спрацювання аварійної сигналізації не відбудеться.

Перелічені фактори чинять менший вплив на роботу індуктивних рівнемірів дискретної дії. У таких рівнемірів фіксується досягнення певних значень рівня, тобто покажчик переміститься на сусідню відмітку лише при зміні рівня на визначену величину – крок дискретності. Індуктивні рівнеміри дискретного типу складаються з ряду коротких котушок індуктивності, які розміщені у вигляді стовпця всередині металевого чохла, який відокремлює котушку від контрольованого середовища. Принципово важливою є та обставина, що слідкуюча система не вимірює безпосередньо індуктивність робочих котушок, а відшукує дві сусідні котушки з різко відмінними індуктивностями. Тобто це означає, що слідкуюча система працює у

релейному режимі, забезпечуючи тим самим гарну перешкодозахищеність перетворювача.

Усі рівнеміри, які розглядалися раніше, відносять до приладів загальнопромислового призначення, оскільки вони можуть застосовуватися у більшості випадків при вимірюванні рівня.

8.7 Радіохвильові рівнеміри

Радіохвильові рівнеміри застосовуються, коли вимірювання рівня неможливе через використання рівнемірів загальнопромислового призначення. Це пов'язано із важкими умовами роботи рівнеміра (високою температурою речовини, її агресивним впливом) або при значній різноманітності конструкцій об'єктів вимірювання. У цих випадках перспективним до застосування є радіохвильовий метод.

Радіохвильовими називають рівнеміри, принцип дії яких ґрунтується на залежності параметрів коливань електромагнітних хвиль від висоти рівня рідини.

До радіохвильових методів відносять радіолокаційний, радіоінтерференційний, ендовібраційний та резонансний.

Принцип дії радіолокаційних рівнемірів базується на явищі відображення електромагнітних хвиль від межі поділу середовищ, які мають різні електричні та магнітні властивості.

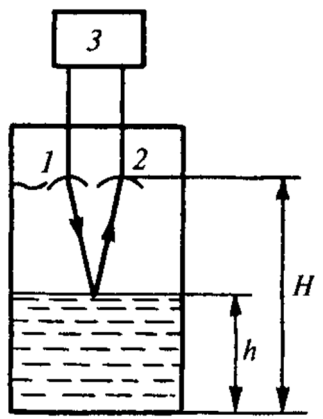


Рисунок 8.8 – Схема радіолокаційного рівнеміра:

1 – випромінювач;
2 – приймач електромагнітної енергії; 3 – перетворювач вимірювання інтервалу часу

Схема рівнеміра (рис. 8.8) складається з випромінювача 1, приймача електромагнітної енергії 2 та перетворювача 3 вимірювання інтервалу часу. Рівень h визначається вимірюванням часового інтервалу між моментом відправлення сигналу випромінювачем 1 та прийманням відображеного сигналу на приймач 2. Ці величини пов'язані співвідношенням

$$\tau = 2 \cdot (H - h) \cdot \sqrt{\varepsilon \cdot \mu} / c, \quad (8.12)$$

де c – швидкість світла у вакуумі; ε та μ – діелектрична та магнітна проникність середовища, у якому поширюються хвилі.

Найчастіше такі рівнеміри застосовуються для вимірювання рівня рідини, яка знаходиться у газовому середовищі, але можливі випадки, коли вимірювання (локація) може відбуватися через рідину, якщо вона не є

електропровідною. Головним недоліком таких рівнемірів є важкість точного вимірювання малих проміжків часу. Вони чутливі до знаходження у зоні випромінювання сторонніх предметів, наприклад, металевих стінок ємностей. Для знешкодження цього недоліку застосовують вузькоспрямовані рупорні антени. Також існують схеми радіохвильових рівнемірів, у яких локація здійснюється через стінку робочої ємності.

У резонансних рівнемірах резонансні коливання збуджуються на відрізках довжиною електричної лінії. Цей відрізок довжиною лінії – первинний перетворювач – або виготовляється у вигляді окремого конструктивного елемента, який розміщується у резервуарі, або його функції можуть виконувати конструктивні елементи технологічної установки (наприклад, при вимірюванні рівня рідких металів).

Як правило, первинний перетворювач являє собою тонкостінну металеву трубу з бічними отворами та розміщеним усередині на одній осі з нею металевим стрижнем. Застосування резонансних рівнемірів при вимірюванні рівня електропровідних рідин ґрунтується на шунтуванні елементів перетворювача, тобто рівень еквівалентний рухомій перемичці між трубою та стрижнем. Зміна висоти рідини приводить до зміни резонансної частоти перетворювача. При збільшенні глибини занурення перетворювача відбувається нелінійне зростання резонансної частоти та навпаки.

8.8 Акустичні рівнеміри

За принципом дії акустичні рівнеміри поділяють на *локаційні, поглинання та резонансні*.

У *локаційних* рівнемірах застосовується ефект відображення ультразвукових коливань від межі поділу «рідина – газ», у зв'язку з чим вони отримали назву ультразвукових. Положення рівня визначається за часом проходження ультразвукових коливань від джерела до приймача після віддзеркалення їх від поверхні поділу.

У рівнемірах *поглинання* положення рівня визначається за ослабленням інтенсивності ультразвуку при проходженні через шар рідини або газу.

У *резонансних* рівнемірах вимірювання рівня виконується через вимірювання частоти власних коливань стовпа газу над рівнем рідини, що залежить від висоти рівня.

Найбільшого поширення набули локаційні рівнеміри. Локація рівня може виконуватися або через газове середовище, або знизу через шар рідини. Недоліком цього типу рівнемірів є виникнення похибки залежно від зміни температури або тиску газу, які впливають на швидкість поширення звуку, а

також сильне поглинання ультразвуку газом, що вимагає більшої потужності джерела, ніж при локації через рідину. На покази цих рівнемірів не впливає зміна характеристик рідини, тому вони можуть застосовуватися для вимірювання рівня неоднорідних рідин та рідин, що кристалізуються та містять бульбашки. Локаційні рівнеміри можуть застосовуватися для вимірювання рівня рідин, що перебувають під високим тиском.

8.9 Термокондуктометричні рівнеміри

Термокондуктометричними називаються рівнеміри, елементом електричної мережі яких є нагріваний струмом резистор із великим температурним коефіцієнтом електроопору, електричний опір якого залежить від рівня рідини. Принцип дії таких рівнемірів базується на відмінності умов теплообміну у рідинах та газах. Чутливий елемент таких рівнемірів являє собою видовжений терморезистор, електричний опір якого визначається його температурою, причому чутливість термоперетворювача збільшується зі зростанням температурного коефіцієнта електроопору матеріалу.

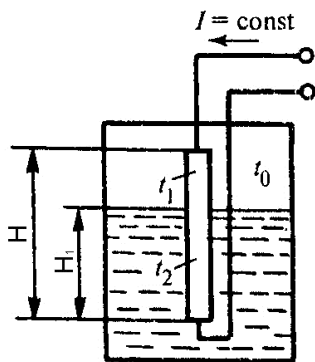


Рисунок 8.9 – Схема термокондуктометричного перетворювача рівня

Термокондуктометричний перетворювач загальною довжиною H розміщується у резервуарі так, щоб одна його частина знаходилася у рідині (ділянка H_1), а інша ділянка ($H - H_1$) – у газовому просторі (рис. 8.9). При зміні рівня рідини змінюється співвідношення цих ділянок. Оскільки у загальному випадку температура рідини та її пари може бути однаковою, відбувається підігрівання перетворювача. Пряме підігрівання здійснюється сталим струмом, який проходить через перетворювач. При непрямому підігріванні перетворювач повинен додатково мати окремий підігрівач.

Принцип дії термокондуктометричного перетворювача полягає у використанні відмінності тепловіддачі від нагрітого терморезистора до рідини та газу, внаслідок чого його ділянки, які знаходяться у рідині та газі, мають різну температуру та, як наслідок, різний опір. Таким чином, сумарний їх опір буде визначатися рівнем.

Основним місцем застосування термокондуктометричних рівнемірів є криогенна техніка, де вони застосовуються для вимірювання рівня зріджених газів.

Для вимірювання рівня рідкого гелію застосовуються рівнеміри, які використовують явище надпровідності. Ефект надпровідності полягає у тому,

що при температурі металу, нижчій за критичну $T_{кр}$, його опір досягає нуля. Тому якщо температура зануреної частини перетворювача буде нижчою за критичну, опір цієї частини буде дорівнювати нулю, а загальний опір буде визначатися лише опором його сухої частини. Чутливі елементи таких перетворювачів виготовляють з ніобій-титанового сплаву. Для зменшення потужності, яка виділяється на перетворювачі, він може живитися сталою напругою імпульсної форми.

Термокондуктометричні перетворювачі, як правило, виготовляють із тонкого дроту із захисним покриттям, який закріплюється на каркасі. При застосуванні перетворювача у криогенній техніці з метою зменшення впливу градієнта температури у криостаті та інтенсивності випаровування терморезистор рекомендується розміщувати всередині термоізолюваної сорочки дьюарівського типу. Як вторинні прилади можуть застосовуватись або прилади, які вимірюють падіння напруги на терморезисторі, або мостові схеми.

Похибки терморезисторних рівнемірів залежать від відхилення розрахункових значень величин, які визначають його статичну характеристику. Висока точність вимірювань забезпечується стабільністю коефіцієнтів електричного і температурного опору, що забезпечується обробленням матеріалу та застосуванням захисного покриття з метою зменшення корозії поверхні, а також зменшення перерізу перетворювача. Вплив зміни температури газової фази може бути зменшений підвищенням температури сухої ділянки перетворювача. Поширеним способом зменшення температурної похибки є застосування компенсаційних терморезисторів, один із яких постійно перебуває у рідині, а інший – у газі. Усі три резистори під'єднують до схеми вторинного приладу.

8.10 Вимірювання рівня сипких матеріалів

Вимірювання рівня сипких матеріалів пов'язане із рядом відмінностей їх властивостей від властивостей рідини: наявність неоднорідності, обмежена рухомість частинок, відсутність горизонтальної площини поділу, здатність до налипання, абразивний вплив, запиленість газового простору тощо. Тому прилади для вимірювання рівня рідин практично не застосовують для вимірювання рівня сипких матеріалів у зв'язку із низькою точністю.

Найпростішими за принципом дії рівнемірами для сипких матеріалів є масові, що ґрунтуються на зважуванні бункера разом із наповнювальним його матеріалом. Як перетворювач у цих рівнемірах може бути використана гідравлічна масдоза, яка слугує опорою однієї з лап бункера. Масдоза являє собою сталевий корпус із поршнем, на який опирається лапа бункера.

Поршень тисне на герметизуючу металеву мембрану. Внутрішня порожнина корпусу (під мембраною) заповнена рідиною та з'єднана з манометром. Тиск рідини у системі масдоза-манометр дорівнює силі ваги бункера із матеріалом, поділений на площу поршня. Манометр градується в одиницях маси або рівня. У масових рівнемірах замість масدوزи можуть застосовуватися більш точні та сучасні магнітопружні перетворювачі. Основний елемент таких перетворювачів – металевий чутливий елемент, магнітна проникність якого змінюється при пружній механічній деформації. Магнітопружні перетворювачі встановлюються на опори бункера та включаються до схеми незрівноваженого мосту, вихідний сигнал якого залежить від ступеня деформації перетворювача, тобто від кількості матеріалу в бункері.

З усіх електричних методів вимірювання рівня найбільш часто застосовується ємнісний метод. Це пояснюється як простотою конструкції ємнісного перетворювача, так і малою чутливістю до неоднорідностей. Як правило, перетворювачі застосовуються одноелектродними у вигляді зонтів або ізольованих тросів, другим електродом є стінка бункера або допоміжний електрод.

Основний недолік таких рівнемірів – руйнування ізоляційного покриття перетворювача, налипання матеріалу, залежність показів від зміни електричних властивостей матеріалу, викликаного, наприклад, зміною його складу або вологості.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Зобразіть принципову схему та поясніть принцип дії рівнеміра з візуальним відліком.
2. Що впливає на виникнення похибки вимірювання рівня рівнеміром з візуальним відліком?
3. Які принцип дії та принципова схема гідростатичного рівнеміра.
4. З якою метою у гідростатичних рівнемірах застосовують двокамерні зрівнювальні посудини?
5. Які принцип дії та принципова схема буйкового рівнеміра з електросиловим перетворювачем?
6. У чому полягає принципова відмінність поплавцевого та буйкового рівнемірів?
7. Які принцип дії та принципова схема буйкового конденсаторного перетворювача рівня для неелектропровідних середовищ?
8. Які переваги й недоліки ємнісних рівнемірів?

9. Які принцип дії та принципова схема індуктивного рівнеміра?
10. Які особливості застосування індуктивних рівнемірів?
11. Які принцип дії та принципова схема радіохвильового рівнеміра?
12. У чому полягає принцип дії локаційних рівнемірів?
13. У чому полягає принцип дії резонансних рівнемірів?
14. Які принцип дії та принципова схема термокондуктометричного перетворювача рівня?
15. Як вимірюють рівень сипких матеріалів?

9 ВИМІРЮВАННЯ СКЛАДУ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ РЕЧОВИН

9.1 ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ

9.1.1 Загальні відомості

Вологість газів, твердих тіл, сипких речовин і рідких середовищ є одним із важливих показників цілого ряду технологічних процесів у металургійній, хімічній, харчовій, текстильній, будівельній та інших галузях промисловості. Крім того, вимірювання витрати відпущеного і отриманого споживачами палива супроводжується контролем його вологості.

Вологість повітря і газів при технічних вимірюваннях може бути охарактеризована такими параметрами:

- абсолютною вологістю, яка визначає кількість водяної пари, яка міститься в одиниці об'єму газу, $кг/м^3$;
- вологовмістом – масою водяної пари, віднесеною до маси сухого газу, $кг/кг$;
- температурою точки роси – температурою, при якій водяна пара, яка міститься у парогазовій суміші (наприклад, вологе повітря), стає насиченою, $^{\circ}C$;
- відносною вологістю, яка визначається відношенням абсолютної вологості до максимально можливої вологості пари при даній температурі, %.

Вологість твердих тіл і сипких речовин може бути охарактеризована такими параметрами:

- вологовмістом – відношенням маси вологи до маси абсолютно сухого тіла;
- вологістю – відношенням маси вологи до маси вологого тіла. Часто ці величини виражаються у відсотках.

Залежно від мети і завдань конкретного технологічного процесу застосовують ті або інші параметри, що характеризують вологість. Наприклад, при вимірюванні незначного вмісту вологи у чистих газах доцільніше користуватися вологовмістом; при транспортуванні газів по трубопроводах необхідно знати температуру точки роси, а дуття в металургійному виробництві краще характеризувати відносною вологістю.

При вимірюванні вологості матеріалів необхідно враховувати форми зв'язку вологи з матеріалом і гігromетричний взаємозв'язок матеріалу і повітря. Вологовмісні матеріали можуть бути колоїдними, капілярно-пористими і колоїдними капілярно-пористими. До колоїдних належать тіла типу желе, тісто, повидло, до капілярно-пористих – керамічні матеріали, пісок тощо. Більшість промислових матеріалів є колоїдними капілярно-пористими тілами. Кількість вологи, яка може бути поглинена матеріалом, залежить від форми, розмірів і розміщення капілярів, а також від форм

зв'язку води з матеріалом. При іонній і молекулярних формах зв'язку води з матеріалом (вода гідратована) її не можна видалити з матеріалу сушінням або віджиманням. При осмотичній або фізико-механічній формах абсорбції зв'язку волога може бути видалена з матеріалу в процесі сушіння. Різні форми зв'язку вологи з матеріалом по-різному впливають на його фізичні характеристики, тому встановлення залежності фізичних властивостей матеріалу від вмісту вологи пов'язане з певними труднощами. Як результат вимірювання вологості твердих тіл і сипких матеріалів часто викликає труднощі і призводить до неоднозначності градувальних характеристик.

9.1.2 Методи вимірювання вологості повітря і газу

Найбільшого поширення у промислових приладах набули такі методи вимірювання вологості газів і повітря: психрометричний, точки роси, сорбційний і оптичний.

Психрометричний метод вимірювання вологості базується на вимірюванні психрометричної різниці температур між «сухим» і «мокрим» термометрами. Мокрий термометр змочується через спеціальний гніт водою. Випаровування, а отже, і охолодження поверхні 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 пара, що міститься у газі, стає насиченою. Ця температура визначається за початком конденсації водяної пари на дзеркальній поверхні, температура якої може встановлюватися в інтервалі температур вимірювання вологоміра.

Сорбційний метод базується на зв'язку фізичних властивостей гігроскопічних речовин з кількістю поглиненої ними вологи, що залежить від вологості аналізованого газу.

Оптичний метод базується на вимірюванні ослаблення інфрачервоного випромінювання за рахунок його поглинання парами води.

Психрометричний метод. У психрометричному методі використовується залежність між парціальним тиском пари у парогазовій суміші і показами сухого й мокрого термометрів:

$$p_{н.м} - p = Ap_{\delta}(t_c - t_m), \quad (9.1)$$

де p – парціальний тиск пари у парогазовій суміші; $p_{н.м}$ – парціальний тиск насиченої пари при температурі мокрого термометра t_m ; p_{δ} – барометричний тиск; A – психрометрична стала; t_c – температура сухого термометра.

Відносна вологість ϕ може бути визначена з (9.1):

$$\varphi = p/p_{н.с} = 100[p_{н.м} - Ap_6(t_c - t_m)]/p_{н.с}, \quad (9.2)$$

де $p_{н.с}$, $p_{н.м}$ – парціальний тиск насиченої пари при температурах t_c і t_m .

У зв'язку з тим, що $p_{н.с}$ і $p_{н.м}$ однозначно визначаються t_c і t_m , то при $A = \text{const}$ можна отримати залежність вигляду

$$\varphi = f(t_c - t_m, t_c). \quad (9.3)$$

За цією залежністю можна скласти психрометричні таблиці. Таблиці можуть бути різними для різних конструкцій мокрого термометра. Психрометрична стала A визначається умовами тепловідведення від термометра через гніт у довкілля (розмірами і формою резервуара або гільзи термометра, теплопровідністю гільзи і тканини гніту, змочуваністю тканини та іншими чинниками), тому практично для кожної нової конструкції A буде відрізнятися від інших. Для забезпечення сталості A для кожної конструкції забезпечують такий режим обдування мокрого термометра (як правило, $w > 3 \text{ м/с}$), при якому $A = \text{const}$. Залежність (9.3) може бути апроксимована родинюю прямих $\varphi = \text{const}$ у координатах t_c , t_m . Вважаючи, що прямі $\varphi = \text{const}$ перетинаються в одній точці із координатами t_a , t_b (рис. 9.1), можна вважати, що

$$\varphi = f(t_m - t_a)/(t_c - t_b), \quad (9.4)$$

Принципова вимірювальна схема психрометра з перетворювачами опору наведена на рис. 9.1.

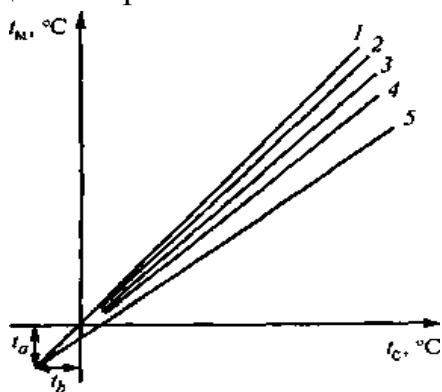


Рисунок 9.1 – Залежність відносної вологості від температур «мокрого» і «сухого» термометрів:

1–5 – $\varphi = 100\%$; 80; 60; 40; 20

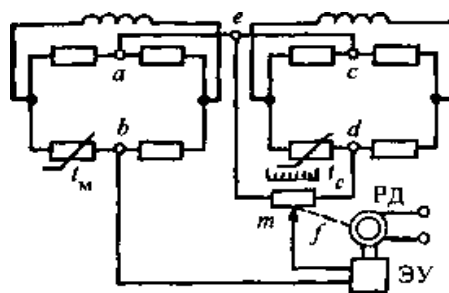


Рисунок 9.2 – Принципова схема психрометра з термоперетворювачами опору

Шкала психрометра градується у відсотках відносної вологості. Можливі різні модифікації цієї схеми, але, як правило, принцип дії залишається незмінним.

Переваги психрометричного методу – досить висока точність і чутливість при температурах вище $0 \text{ }^\circ\text{C}$.

До недоліків методу належить зменшення чутливості і точності при низьких температурах, а також наявність похибки, пов'язаної зі зміною психрометричної сталої A .

Метод точки роси. За температурою точки роси можна визначити абсолютну вологість або вологовміст, а якщо додатково виміряти температуру газу, можна визначити і відносну вологість. Цей метод один з найбільш точних і дозволяє виконувати вимірювання вологості при будь-яких тисках газу, а також як при додатних, так і при від'ємних температурах. Основним чутливим елементом вологомірів, що базуються на вимірюванні температури точки роси, є дзеркальце, яке обдувається аналізованим газом. Дзеркальце необхідно охолоджувати для того, щоб на ньому відбувалася конденсація вологи, яка знаходиться в аналізованому газі. Одночасно фіксується температура, при якій починається випадіння вологи (роси).

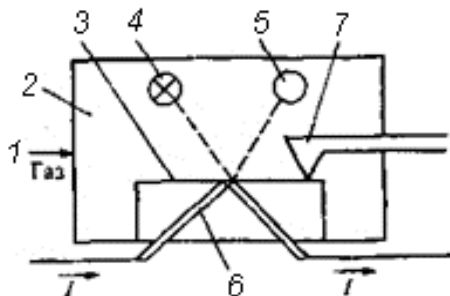


Рисунок 9.3 – Принципова схема вологоміра точки роси:

- 1 – канал; 2 – камера;
- 3 – дзеркальна поверхня;
- 4 – джерело виміру; 5 – оптирон;
- 6 – термобатарея; 7 – термопара

Для технічних вимірювань розроблені автоматичні вологоміри точки роси. Одна зі схем такого вологоміра подана на рис. 9.3.

Газ, очищений від домішок і пилу, каналом 1 надходить до камери 2, де стикається із дзеркальною поверхнею оптичного каналу 3, яким світловий потік від джерела 4 потрапляє на оптирон 5.

Поверхня 3 охолоджується термобатареєю 6, що працює на ефекті Пельтьє. Принцип дії вологоміра полягає у тому, що при проходженні струму через дотичні поверхні різнорідних провідників залежно від напрямку струму поглинається або виділяється тепло. Так, зниження температури на $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ може бути отримане при пропусканні струму у 6 A при напрузі живлення 15 B через термоелектронну батарею розміром $40 \times 40 \times 40\text{ мм}$, що містить 127 елементів. Досягнувши точки роси на поверхні 3, випадає роса, оптирон закривається і струм через термобатарею 6 припиняється. Термопара 7 фіксує температуру випадання роси.

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 вимірюванні вологості агресивних газів температури точки роси можуть

істотно відрізняться від розрахункових. Крім того, агресивні гази викликають корозію поверхні, на якій відбувається конденсація.

Сорбційні вологоміри. У сорбційних вологомірах чутливий елемент повинен знаходитися в гігрометричній рівновазі із вимірюваним газом. У практиці технічних вимірювань набули поширення такі різновиди сорбційних перетворювачів: електролітичні, кулонометричні, п'езосорбційні і деформаційні.

В *електролітичних* гігрометрах вимірювальний перетворювач включає вологочутливий елемент, що містить електроліт. Зміна вологості газу викликає зміну кількості води, що міститься у вологочутливому елементі, що приводить до зміни концентрації електроліту у вологочутливому елементі і відповідної зміни його опору або ємності. Як електроліт найчастіше застосовують хлористий літій. Вимірювальні схеми електролітичних гігрометрів є різними варіантами мостових вимірювальних схем. До недоліків електролітичних гігрометрів треба віднести нестабільність їх градувальних характеристик, а також вплив температури і концентрації розчиненої речовини на їх покази.

У *кулонометричних* перетворювачах вологість газу визначають за кількістю електрики, витраченої на електроліз води, яка поглинається частково гідратованим пентаоксидом фосфору. Вимірювальний перетворювач у цих приладах складається з пластмасового корпусу, у внутрішньому каналі якого розташовано два електроди у вигляді недотичних спіралей. Простір між електродами заповнений частково гідратованим пентаоксидом фосфору, гарним осушувачем. Вода газу, з'єднуючись із гігроскопічною речовиною, утворює розчин фосфорної кислоти з великою питомою провідністю. Під'єднана до електродів стала напруга викликає електроліз поглиненої води. Кількість поглиненої і розкладеної води при сталій витраті газу однакова і визначається концентрацією води в аналізованому газі.

Перевагою кулонометричних гігрометрів є незалежність їх показів від напруги живлення і складу газу. Забруднення сорбенту практично не впливають на покази приладу, метод не вимагає градування на еталонних сумішах і використовується для вимірювання мікроконцентрацій води у газах.

До недоліків методу належить необхідність виключення пари і газів, що мають лужну реакцію (аміак, аміни тощо). Їх наявність виводить із ладу чутливий елемент. На покази істотно впливають пари спиртів, які гідролізуються на пентаоксиді фосфору з утворенням води.

У *п'езосорбційних* гігрометрах використовується залежність частоти власних коливань кварцевого резонатора від маси води, поглиненої

сорбентом, нанесеним на поверхню кварцевої пластини. Зміна маси речовини на кварцевій пластині і частоти власних коливань пов'язані виразом

$$\Delta f = \Delta m f^2 / (N \rho S), \quad (9.5)$$

де ρ, S – густина і площа пластини кварцу; N – частотний коефіцієнт.

Відношення $f^2 / (N \rho S)$ визначається властивостями пластини кварцу, тому рівняння (9.5) набирає вигляду $\Delta f = k \Delta m$. Метрологічні характеристики п'єзосорбційних гігрометрів визначаються матеріалом сорбенту і технологією його нанесення на поверхню кварцевої пластини. Як сорбенти застосовують силікагелі, цеоліти, сульфований полістирол. Це дозволяє використовувати п'єзосорбційний метод для вимірювання мікроконцентрацій вологи у газах.

П'єзосорбційні гігрометри вимагають градування за газовими сумішами з відомою вологістю. Можливі додаткові похибки за рахунок поглинання, окрім вологи інших домішок аналізованого газу. П'єзосорбційні гігрометри застосовуються у хімічній промисловості і при випробуванні матеріалів і виробів у термобарокамерах.

9.1.3 Методи вимірювання вологості твердих тіл і сипких речовин

Методи вимірювання вологості твердих тіл і сипучих речовин умовно можна розділити на дві групи: *прямі методи*, що дозволяють визначати масу вологи або сухої речовини у пробі; *непрямі методи*, що визначають вологість за параметром, функціонально пов'язаним із вологістю. Прямі методи відрізняються високою точністю вимірювання і значною тривалістю (до 10 – 15 год).

Непрямі методи характеризуються високою швидкістю і значно меншою точністю вимірювання. У технічних вимірюваннях застосовуються винятково непрямі методи. З них найбільшого поширення набули електричні методи, такі як кондуктометричний, ємнісний та інші. Більшість промислових матеріалів є капілярно-пористими. У сухому вигляді вони є діелектриками з питомим опором $10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ і більше. При зволоженні капілярно-пористі тіла можуть стати провідниками з питомим опором $10^4 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Залежність електричного опору від вологості (рис. 9.4) для капілярно-пористих тіл має вигляд

$$R = C / W^n, \quad (9.6)$$

де C – стала; W – вологість матеріалу; C і n – емпіричні коефіцієнти, що визначаються для кожного матеріалу індивідуально.

Степенева залежність опору від вологості забезпечує високу чутливість кондуктометричного методу. Проте його застосування обмежене великою кількістю чинників, які можуть вплинути на результат. Це такі, наприклад, як температура, структура матеріалу, щільність насипання, хімічний склад,

наявність електролітів. Тому цей метод рекомендується застосовувати лише у лабораторних умовах.

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

$$C = k\varepsilon, \quad (9.7)$$

де ε – діелектрична проникність матеріалу, яка визначається його вологістю; k – стала, яка визначається геометричними розмірами і формою конденсатора.

Включення ємнісного перетворювача у високочастотний коливальний контур дозволяє використовувати резонансні ланцюги в приладах для вимірювання ємності перетворювача, а за нею і вологості матеріалу. Ємнісні перетворювачі мало чутливі 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 становити (0,2 – 0,5)%. Проте методика відбору проби (заповнення матеріалом простору між обкладаннями конденсатора) може впливати на результати вимірювання. Наприклад, навіть зміна розмірів частинок (шматочків) аналізованого матеріалу істотно впливає на покази вологоміра. У зв'язку із цим застосування ємнісних вологомірів для вимірювання вологості твердих тіл і сипких речовин у технічних вимірюваннях обмежене.

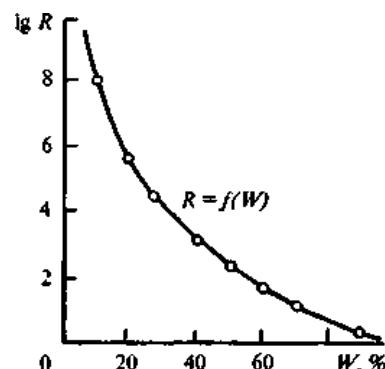


Рисунок 9.4 –
Залежність
електричного опору
від вологості
капілярно-пористих
тіл

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Як може бути охарактеризована вологість газів?
2. Яка особливість вимірювання вологості твердих тіл і як вона може бути охарактеризована?
3. Які методи застосовуються для вимірювання вологості газів?
4. У чому полягає психрометричний метод вимірювання вологості?
5. У чому полягає метод вимірювання точки роси?
6. У чому полягає оптичний метод вимірювання вологості газів?
7. Який принцип дії ємнісного вимірювача вологості газів?
8. Які методи вимірювання вологості твердих тіл, особливості їх застосування?

9.2 АНАЛІЗ СКЛАДУ ГАЗІВ

9.2.1 Загальні відомості

Засоби вимірювань, які застосовуються у різних галузях промисловості, наукових дослідженнях для аналізу складу газів, називаються *газоаналізаторами*. На основі безперервного автоматичного контролю складу газів здійснюється управління хіміко-технологічними процесами, пов'язаними з отриманням 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, що забезпечують безпечне функціонування технологічних об'єктів. До таких приладів належать газоаналізатори, що вимірюють концентрацію водню у системі охолодження турбогенераторів, газів в апаратах із радіоактивним теплоносієм на АЕС тощо.

Останніми роками у зв'язку з посиленням уваги до охорони довкілля розширилося виробництво і використання газоаналізаторів, призначених для контролю вмісту шкідливих домішок у газових викидах промислових підприємств та електричних станцій, у повітрі виробничих приміщень і атмосфері. Так, відповідно до ГОСТ 17.2.3.01-86 для контролю за якістю повітря населених пунктів здійснюється періодичне вимірювання концентрації таких основних забруднювальних речовин, як сірчистий газ, оксид вуглецю, оксид і діоксид азоту, пил.

Для вимірювання концентрації одного з компонентів газової суміші використовується одна або декілька фізико-хімічних властивостей цього газу, що відрізняються від властивостей інших газів. Чим різкіша ця відмінність і чим вона специфічніша, тим вища чутливість методу і простіше здійснюється підготовка проби газу. Різноманітність методів вимірювання, які використовуються у газоаналізаторах, зумовлена великою кількістю аналізованих компонентів газових сумішей і широким діапазоном зміни їх концентрацій.

Переважає більшість промислових автоматичних газоаналізаторів призначена для вимірювання концентрації одного компонента у суміші газів. У цьому випадку суміш газів розглядається як бінарна, в якій визначуваний компонент впливає на вимірювану фізико-хімічну властивість суміші, а інші компоненти, незалежно від їх складу і концентрації, не впливають і вважаються іншим компонентом суміші.

Існують газоаналізатори, призначені для аналізу різних складових багатокомпонентних газових сумішей, у більшості випадків ці прилади використовуються у лабораторній практиці. Газоаналізатори градууються у % за об'ємом, $г/м^3$, $мг/л$. Перша одиниця вимірювання є найзручнішою, оскільки процентний вміст компонентів газової суміші зберігається при зміні температури і тиску. При вимірюванні незначних концентрацій використовується одиниця $млн^{-1}$ (*ppm*), яка становить одну частину на мільйон частин аналізованого газу, або 0,0001 %, і – $млрд^{-1}$ (*ppb*) – одна частина на мільярд. Відтворення одиниць вимірювань концентрації компонентів газових сумішей виконується за допомогою атестованих еталонних газових сумішей.

Існуюча класифікація газоаналізаторів ґрунтується на фізико-хімічних властивостях, покладених в основу вимірювання концентрації компонентів суміші, концентрація яких визначається, і включає такі основні групи приладів: механічні, теплові, магнітні, оптичні, електричні, хроматографічні і мас-спектрометричні.

Газоаналізатори на відміну від засобів вимірювань температури, тиску є установками, що містять, окрім вимірювального перетворювача (приймача), ряд пристроїв, що забезпечують відбирання, підготовку і транспортування проби газу через прилад.

Для газоаналізаторів характерне розділення на дві групи приладів. До першої групи входять вимірювальні прилади, до другої – індикатори, сигналізатори, детектори витікання газів. Прилади другої групи часто є переносними, простішими за конструкцією і мають менше число допоміжних пристроїв.

9.2.2 Об'ємні хімічні газоаналізатори

У механічних газоаналізаторах вимірювання вмісту визначуваних компонентів виконується на основі зміни механічних параметрів стану або відповідних властивостей газової суміші. До інформативних величин у цих приладах належать зміни об'єму або тиску проби газової суміші, її в'язкості, густини, швидкості поширення звуку.

Об'ємні хімічні газоаналізатори є найбільш поширеними приладами механічного типу (волюмометри – від англ. *volume* – об'єм). Про вміст у них визначуваного компонента судять за зміною об'єму газової суміші у результаті вибіркового поглинання, каталітичного окиснення або спалювання визначуваного компонента. Оскільки для вибіркового видалення визначуваних компонентів використовуються хімічні реакції, прилади часто називають об'ємними хімічними газоаналізаторами. Із їх допомогою можна виконати вимірювання концентрації у суміші газів таких компонентів: діоксид вуглецю, сірководень, діоксид сірки (суміш кислоти пари і газів), кисень, оксид вуглецю, водень, насичені і ненасичені вуглеводні, азот.

Для поглинання водню і оксиду вуглецю використовується лужний розчин напівхлористої міді. Кисень поглинається лужним розчином пірогалолу, а неграничні вуглеводні – бромистою водою. Водень і граничні вуглеводні можуть виділятися із суміші спалюванням, а оксид вуглецю – каталітичним окисненням. Похибка методу в основному визначається похибкою вимірювання зміни об'єму, тому початковий і залишковий об'єми проби газу повинні мати однакову температуру і тиск. Переважна більшість газоаналізаторів цього типу належать до лабораторних приладів періодичної дії, в яких відбір проби та інші операції виконуються вручну.

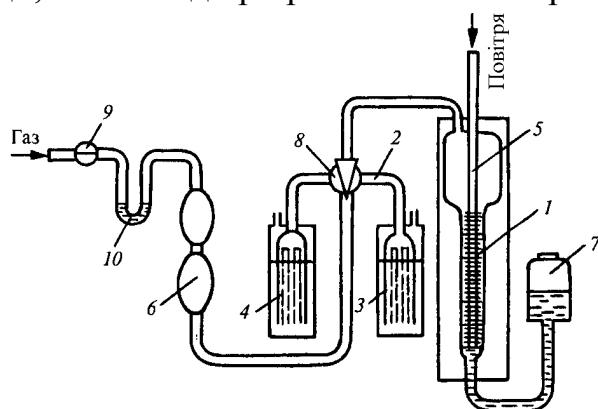


Рисунок 9.5 – Схема газоаналізатора

ГХП-2: 1 – вимірювальна бюретка;
2 – гребінка; 3, 4 – поглинальні посудини;
5 – трубка; 6 – гумова груша; 7 – напірна
посудина; 8, 9 – крани; 10 – фільтр

Принцип дії об'ємних хімічних газоаналізаторів розглянемо на прикладі газоаналізатора ГХП-2 (рис. 9.5), який призначений для вимірювання двох компонентів газової суміші: CO_2 і O_2 . Прилад містить вимірювальну бюретку 1, з'єднану з гребінкою 2, до якої під'єднано дві поглинальні 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 виконанні аналізу спочатку визначають вміст CO_2 , а потім кисню. Усередині мірної бюретки знаходиться трубка 5, з'єднана з атмосферою, яка використовується для контролю тиску проби газу після поглинання визначуваного компонента. Мірна бюретка термостатована. Відбір проби при відкритому крані 9 і прокачування газу через прилад здійснюються гумовою грушею 6. При прокачуванні газу кран 8 знаходиться у положенні, показаному на рисунку, напірна посудина 7 із замикаючою рідиною опущена і газ через трубку 5 виштовхується в атмосферу. При піднятті напірної посудини 7 замикаюча рідина, досягнувши кінця трубки 5, відсікає від атмосфери пробу газу об'ємом 50 см^3 .

У двох інших положеннях крана 8 проба газу у мірній бюретці 1 з'єднується із посудинами 3 і 4. Фільтр 10 слугує для очищення газу. Як замикаюча використовується рідина, що не поглинає компоненти аналізованої газової суміші; часто застосовуються насичені розчини кухонної солі або хлористого кальцію.

Ціна поділки мірної бюретки ГХП-2 становить $0,1 \text{ мл}$. При межевій похибці вимірювання об'єму $\pm 0,1 \text{ мл}$ похибка оцінки залишкового об'єму проби становить $\pm 0,2 \%$. Невисока точність оцінки зміни об'єму не дозволяє використовувати ці газоаналізатори для вимірювання малих концентрацій.

Ширші можливості має газоаналізатор ВТІ, призначений для загального аналізу природних і промислових газів. Із його допомогою здійснюється вимірювання таких компонентів газової суміші: суми кислих газів ($CO_2 + SO_2 + H_2S$); O_2 ; CO ; H_2 , N_2 , суми граничних вуглеводнів (CH_4 і ін.); суми ненасичених вуглеводнів (C_nH_m). Конструкція газоаналізатора ВТІ відрізняється від ГХП-2 конструкцією мірної бюретки і поглинальних посудин, їх кількістю, наявністю печі для спалювання CO , H_2 і CH_4 .

До переваг об'ємного методу вимірювання концентрацій газів належать: можливість вимірювання широкого спектру компонентів газових сумішей у результаті підбирання відповідних поглиначів або хімічних реакцій; можливість аналізу багатоконпонентних газових сумішей; простота конструкції.

Недоліками методу є: низька точність аналізу (не вище $0,1 - 0,2 \%$ від загального об'єму проби); періодичність дії; необхідність частої заміни реактивів; складність створення на цьому принципі автоматичних приладів; громіздкість приладу через велику кількість елементів зі скла.

9.2.3 Теплові газоаналізатори

У теплових газоаналізаторах вимірювання концентрації визначуваного компонента реалізується за рахунок вимірювання теплових властивостей газової суміші, які залежать від концентрації визначуваного компонента. Найбільш поширеними приладами цього типу є газоаналізатори, принцип дії яких базується на вимірюванні теплопровідності суміші (*термокондуктометричні*) і теплоти, що виділяється при реакції каталітичного окиснення визначуваного компонента (*термохімічні*). Представники цих груп приладів, як правило, є автоматичними пристроями, що працюють у складі інформаційно-вимірювальних систем. Теплові газоаналізатори призначені для безперервного аналізу складу бінарних сумішей.

Термокондуктометричні газоаналізатори

Зі зростанням температури теплопровідність газів змінюється по-різному, у зв'язку з чим при температурі 500 °С відносна теплопровідність N₂, H₂, O₂, CO, Ar, He практично не змінюється, тоді як відносна теплопровідність CO₂ зростає до одиниці, а CH₄ – до 2,13. Характер впливу температури на відносний коефіцієнт теплопровідності газів враховується при виборі температурних режимів роботи чутливих елементів газоаналізаторів.

Використання цього принципу вимірювання базується на тому, що між теплопровідністю газової суміші λ , теплопровідністю λ_i і концентрацією c_i n компонентів, що входять до її складу, існує близька до лінійної залежність:

$$\lambda = \lambda_1 c_1 + \lambda_2 c_2 + \dots + \lambda_n c_n = \sum_{i=1}^{i=n} \lambda_i c_i. \quad (9.8)$$

Якщо у числі невизначуваних компонентів міститься газ, зміна концентрації якого впливає на теплопровідність суміші, то цей компонент із газової суміші повинен бути видалений. Так, у димових газах, які містять в основному N₂, O₂, SO₂, CO₂, CO, H₂, водяну пару, при вимірюванні концентрації CO₂ повинні бути видалені SO₂, H₂, водяна пара. Коливання концентрації інших компонентів впливає мало, оскільки вони мають близьку до азоту теплопровідність.

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 залежність

$$Q = 2\pi\lambda(t_n - t_c)/\ln(D/d), \quad (9.9)$$

де Q – кількість теплоти, що віддається провідником; l , d – довжина і

діаметр провідника; D – діаметр камери; λ – теплопровідність суміші газів; t_n, t_c – температури провідника і стінок камери.

При сталості теплоти Q , що віддається провідником, і температури стінок камери, яка залежить від температури навколишнього середовища, теплопровідність газової суміші однозначно визначатиме температуру провідника, а отже, і його опір. Як провідник використовується дріт із металу, який має великий температурний коефіцієнт електричного опору та хімічну стійкість; найчастіше застосовують платину, рідше – вольфрам, нікель, тантал.

Схема двох типів робочих чутливих елементів з платинового дроту наведена на рис. 9.6. У скляному корпусі 1 до платинових струмопідводів 2 діаметром $0,15$ мм підпаяна платинова спіраль 3 діаметром $0,02$ мм, відкрита (рис. 9.6 а) або засклена 4 (рис. 9.6 б). У першому випадку опір чутливого елемента становить 10 Ом, у другому – 40 Ом. Чутливий елемент другого типу захищений від агресивного впливу середовища, але має велику інерційність.

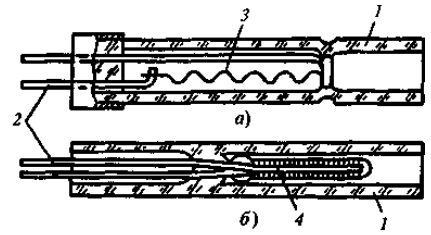


Рисунок 9.6 – Будова робочих чутливих елементів з відкритою (а) і заскленою (б) платиновою спіраллю:
 1 – скляний корпус;
 2 – платиновий струмопідвід;
 $3, 4$ – відкрита і засклена платинові спіралі

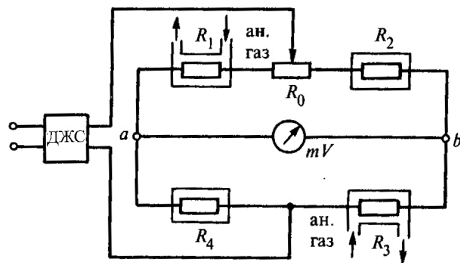


Рисунок 9.7 – Вимірювальна мостова схема газоаналізатора:

ДЖС – джерело живлення стабілізоване;
 mV – мілівольтметр;
 $R_0 - R_4$ – резистори

Для забезпечення максимальної чутливості за теплопровідністю для CO_2 , а також для зменшення впливу тепловіддачі за рахунок випромінювання температура платинової спіралі встановлюється ($80 - 100$) °С. З метою зменшення впливу конвективного теплообміну газ до чутливого елемента подається у результаті дифузійного обміну, що збільшує інерційність теплових газоаналізаторів.

Для вимірювання опору дротяних чутливих елементів використовуються мостові схеми. Одна з найбільш простих і поширених вимірювальних схем газоаналізатора (рис. 9.7) є неврівноваженим мостом, що живиться сталим струмом від батареї або джерела стабілізованого живлення (ІПС). Резистори виконані із платинового дроту і знаходяться у камерах, заповнених аналізованим газом. Резистори R_2 і R_4 знаходяться у герметичних камерах,

заповнених невизначуваними компонентами суміші або повітрям. Конструкція порівняльних чутливих елементів аналогічна конструкції робочих елементів, поданих на рис. 9.6, лише правий кінець скляної трубки у них запаятий.

Якщо показуючий прилад, увімкнений у вимірювальну діагональ моста ab , має безнульову шкалу, то в камерах із резисторами R_2 і R_4 знаходяться невизначувані компоненти з концентрацією визначуваного компонента, яка відповідає нижній межі вимірювання приладу. Змінний резистор, який входить до мосту, слугує для усунення початкового небалансу мосту, коли резистори R_1 – R_4 знаходяться у камерах з однаковим складом газових сумішей.

Термохімічні газоаналізатори. У термохімічних газоаналізаторах концентрація визначуваного компонента вимірюється за кількістю теплоти, що виділилася при реакції каталітичного окиснення. До визначуваних за цим методом газів входять CO , H_2 , O_2 , NH_3 , CH_4 . Термохімічні газоаналізатори використовуються як сигналізатори вибухонебезпечних концентрацій газів, вимірювачі хімічного недопалювання палива, детектори газових хроматографів тощо.

Термохімічні газоаналізатори розділяються на дві групи. У першій групі, що має нижчу чутливість, реакція окиснення відбувається на поверхні нагрітої платинової нитки, що відіграє роль каталізатора. Температура платинової нитки, а отже, і її опір змінюються зі зміною кількості теплоти, що виділилася при окисненні визначуваного компонента. Платинова нитка з опором R_1 включається у плече неврівноваженого моста, схема якого аналогічна до поданого на рис. 9.7. До цього мосту входить резистор R_2 , виконаний із платинового дроту подібно до резистора R_1 , але він знаходиться в камері, заповненій невизначуваними компонентами газової суміші. Резистори R_3 і R_4 мають сталий опір і виконані з манганінового дроту. За наявності визначуваного компонента у газовій суміші і його згорянні опір резистора R_1 зростає і мілівольтметр (потенціометр), включений у вимірювальну діагональ мосту, показує наявність різниці напруги, яка пропорційна концентрації визначуваного компонента. Мілівольтметр градується в одиницях концентрації визначуваного компонента.

Газоаналізатори першої групи в основному використовуються як індикатори і сигналізатори вибухонебезпечних концентрацій газів і виконуються у переносному варіанті, до них належать сигналізатори СГГ передвибухонебезпечних концентрацій у повітрі таких газів, як водень, метан, пропан та ін. Сигналізатори градуються у відсотках нижньої концентраційної межі вибуховості (НКМВ).

У термохімічних газоаналізаторах другої групи реакція окиснення

визначуваного компонента відбувається на поверхні гранульованого каталізатора. Як каталізатор найчастіше використовується гопкаліт (60 % діоксиду марганцю і 40 % оксиду міді). Наявність розвиненої поверхні каталізатора забезпечує можливість вимірювання концентрацій визначуваного компонента до десятої відсотка. Кількість теплоти, що виділилася при спалюванні, вимірюється платиновим терморезистором або батареєю термопар.

9.2.4 Магнітні газоаналізатори

У магнітних газоаналізаторах, що належать до аналізаторів бінарних сумішей, концентрація визначуваного компонента вимірюється за зміною магнітних властивостей газової суміші. Газу за їх магнітною сприйнятливостю поділяються на парамагнітні, які втягуються у магнітне поле, і діамагнітні, які виштовхуються з нього. Найбільшу магнітну сприйнятливостю має кисень, який відносять до парамагнітних газів. Магнітна сприйнятливостю кисню лінійно залежить від тиску і зменшується зі зростанням температури пропорційно $1/T^2$.

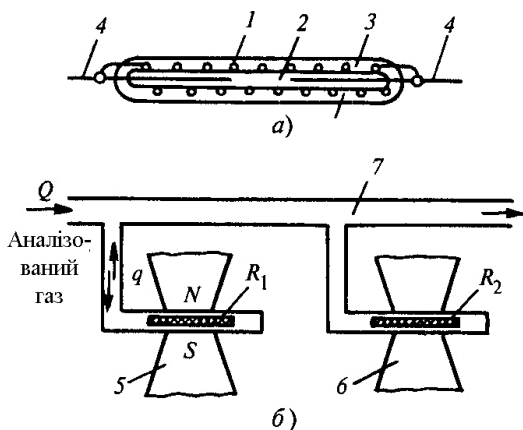


Рисунок 9.8 – Схема чутливого елемента киснеміра (а) і перетворювача із зовнішньою магнітною конвекцією (б):

- 1 – платиновий дріт; 2 – скляний капіляр; 3 – скляне покриття;
- 4 – струмоввід; 5 – сталлий магніт;
- 6 – немагнітний мідний блок;
- 7 – труба

спіралі підпаяні до струмовиводів 4. Зовнішній діаметр чутливого елемента становить (0,5 – 0,6) мм, опір резистора 40 Ом. Кисневмісний газ, що проходить по трубці 7, втягується у магнітне поле, при цьому він

Існує декілька методів вимірювання магнітної сприйнятливості суміші газів, найбільш поширений із них пов'язаний із використанням явища термомагнітної конвекції. Остання є рухом кисневмісного газу в неоднорідному магнітному і тепловому полях. Газоаналізатори, що базуються на цьому ефекті, виконуються з одномостовою або двомостовою вимірювальними схемами.

На рис. 9.8 подана схема чутливого елемента, який застосовується у газоаналізаторах типу МН, ГТМ (рис. 9.8 а), і розміщення його між полюсами магніту (рис. 9.8 б). Чутливий елемент – платиновий дріт 1 діаметром 0,02 мм, намотаний на скляний капіляр 2 і зашкленний із зовнішнього боку 3. Кінці

нагрівається від резистора R_1 , і його магнітна сприйнятливість знижується. Холодний газ виштовхує нагрітий, створюючи потік магнітної конвекції q , що охолоджує резистор R_2 .

Резистор R_2 для забезпечення однакових умов тепловіддачі розміщений усередині немагнітного мідного блоку b , що має ту саму конфігурацію, що і сталій магніт 5 . На рис. 9.8 b напрями теплової і магнітної конвекції збігаються, при розміщенні кришки з лініями підведення газу 7 під магнітом напрями конвективних теплових потоків стають зустрічними.

У газоаналізаторах МН використовується двомостова вимірювальна схема, наведена на рис. 9.9. У первинному перетворювачі (приймачі) розміщено два мости, які живляться від вторинних обмоток $1, 2$ силового трансформатора Tr . Міст I є робочим, його резистори R_1, R_2 , що є платиновими чутливими елементами із зовнішнім теплообміном, омиваються аналізованим газом. Резистор R_1 знаходиться у неоднорідному магнітному полі, R_2 – між полюсами хибного магніту (мідного блоку). Резистори R_3, R_4 є сталими і виконані з манганінового дроту.

За наявності кисню у суміші газів міст I працює у нерівноважному режимі, і напруга у вимірювальній діагоналі U_{ab} залежить від концентрації кисню. Для перевірки початкової точки шкали вторинного приладу приймач забезпечується металевим шунтом. При його опусканні знімається магнітне поле, резистори R_1 і R_2 потрапляють в однакові умови, і міст I повинен бути зрівноваженим. До схеми мосту внесений не показаний на схемі змінний резистор початкового балансування, аналогічний резистору R_0 , що входить до мосту, зображеного на рис. 9.9.

Міст II є порівняльним мостом. Його плечі R_5 і R_6 , виконані з платинового дроту, омиваються повітрям, причому R_6 , як і R_2 , знаходиться між полюсами хибного магніту. Резистори R_7 і R_8 виконані подібно R_3 і R_4 із манганінового дроту. Оскільки концентрація кисню у повітрі є стабільною, міст II розвиває сталий сигнал небалансу U_{bd} . Коливання U_{bc} , зумовлені лише відхиленнями напруги живлення, температури і тиску доквілля.

Для вимірювання сигналу робочого мосту використовується

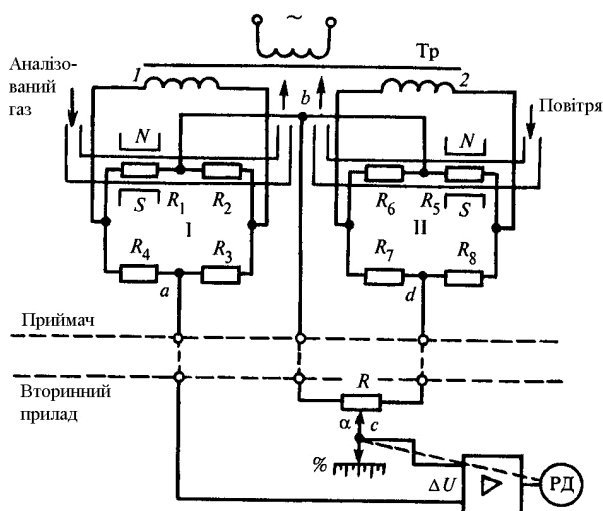


Рисунок 9.9 – Схема автоматичного магнітного газоаналізатора типу МН: $1, 2$ – вторинні обмотки силового трансформатора Tr ; $РД$ – реохорд

компенсаційний метод, причому сигналом компенсації є частка напруги небалансу зрівнювального мосту U_{bd} , що знімається з реохорда, $U_{bc} = U_{bd}$, де змінюється від 0 до 1. Компенсація сигналу робочого мосту здійснюється автоматично, як вторинний прилад використовується автоматичний зрівноважений міст із деякими змінами у вимірювальній схемі. У газоаналізаторах із двомостовою вимірювальною схемою вплив коливань напруги живлення, температури довкілля на покази приладу менше, ніж у приладах із одномостовою вимірювальною схемою. Це пояснюється одночасним впливом перелічених чинників на сигнали робочого і порівняльного мостів.

Киснеміри типу МН мають при нульовій нижній межі вимірювання верхню від 1 до 100 %, при цьому межа зведеної похибки залежить від діапазону вимірювань і знаходиться у межах від ± 2 до ± 10 % нормувального значення. Остання цифра відповідає мінімальному діапазону вимірювання приладу. Киснеміри МН можуть мати безнульову шкалу з межами вимірювання (50 – 100) % O_2 , (80 – 100) % O_2 . Час встановлення вихідного сигналу знаходиться у межах (0,5 – 1,5) хв.

Завдяки різкій відмінності магнітної сприйнятливості кисню від сприйнятливості інших газів не вимагається попереднього видалення невизначуваних компонентів. Проте для захисту чутливих елементів установка газоаналізатора повинна включати фільтр для очищення проби від сірчистого газу. Інші допоміжні елементи установки газоаналізатора є типовими.

9.2.5 Оптичні газоаналізатори

В оптичних газоаналізаторах концентрація визначуваного компонента вимірюється за зміною оптичних властивостей газової суміші, до яких належать показники заломлення, спектрального поглинання і випромінювання, спектральна густина тощо. Найбільш поширеними є чотири групи оптичних газоаналізаторів: інфрачервоного і ультрафіолетового поглинання; фотоколориметричні; люмінесцентні; ослаблення видимого випромінювання. Оптичні газоаналізатори мають велику роздільну здатність, завдяки чому вони застосовуються для аналізу мікроконцентрацій вибухонебезпечних і токсичних домішок у промислових газах, при контролі повітря в атмосфері і виробничих приміщеннях. Із перелічених типів газоаналізаторів найбільш поширеними є недисперсійні інфрачервоні фотометри.

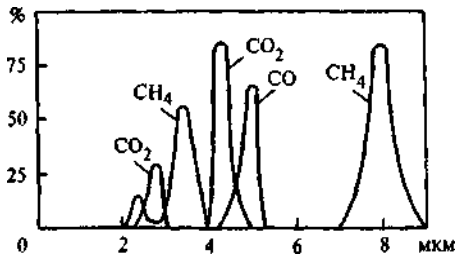


Рисунок 9.10 – Спектри поглинання CO, CO₂, CH₄ в інфрачервоній області

Газоаналізатори інфрачервоного і ультрафіолетового поглинання. Кожен газ характеризується певним спектром поглинання. Гази, що містять у своєму складі два і більше різнорідних атомів, такі як CO, CO₂, CH₄, C₂H₂, мають розрізнені спектри поглинання в інфрачервоній області. Одноатомні гази характеризуються лінійними спектрами поглинання, які знаходяться в ультрафіолетовій області.

Для використання цього методу вимірювання необхідно, щоб визначуваний компонент мав спектр поглинання, який відрізняється від спектрів поглинання інших компонентів аналізованої суміші. Спектри поглинання CO, CO₂, CH₄, NH₃, які знаходяться в інфрачервоної області, подані на рис. 9.10. Спектри CO₂ і CO, CO₂ і CH₄ частково перекриваються.

Схема одного з варіантів приймача інфрачервоного випромінювання подана на рис. 9.11. Джерелом 1 створюється стале випромінювання, яке за допомогою диска, що обертається, з отворами (обтюратора) 2 і світлофільтра 3 перетворюється в пульсуюче монохроматичне випромінювання. Аналізований компонент, що знаходиться у камері 4, поглинає випромінювання, при цьому у камері виникають пульсації температури, а отже, і тиску, показані на тому самому рисунку.

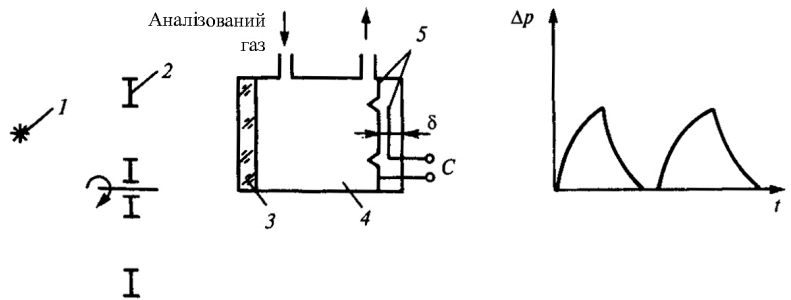


Рисунок 9.11 – Принципова схема оптико-акустичного променеприймача:

- 1 – джерело; 2 – диск з отворами;
- 3 – світлофільтр; 4 – камера;
- 5 – чутливий елемент

Пульсації тиску у камері сприймаються мікрофонним чутливим елементом 5, який є конденсатором, утвореним рухомою мембраною і нерухомою пластиною. Під дією тиску мембрана переміщається, викликаючи завдяки своїм коливанням зміну зазору 5, що, у свою чергу, призводить до зміни ємності конденсатора С. Такі перетворювачі входять до складу аналізаторів недисперсійного інфрачервоного випромінювання.

Більшість газів і парів здатні поглинати ультрафіолетове випромінювання, проте обмежена їх кількість має спектри поглинання,

відмінні від інших газів. Газоаналізатори, дія яких базується на поглинанні певними компонентами ультрафіолетового випромінювання, застосовуються для вимірювання наявності у повітрі токсичної пари ртуті, хлору, карбонілу нікелю. У приладах як джерело ультрафіолетового випромінювання використовуються ртутні лампи. Схеми можуть бути як одноканальними, так і двоканальними. Як приймачі випромінювання на виході з робочих і фільтрувальних камер застосовуються фоторезистори, вакуумні фотоелементи і фотопомножувачі.

Фотоколориметричні газоаналізатори. У фотоколориметричних (від *colour* (англ.) – колір) газоаналізаторах концентрація визначуваного компонента відповідно до закону Ламберта-Вера вимірюється за зміною оптичної густини індикаторного розчину, забарвлення якого вибірково змінюється за наявності визначуваного компонента.

Фотоколориметричний метод характеризується універсальністю, оскільки один і той самий прилад із різними індикаторними розчинами може використовуватися для аналізу будь-яких компонентів газової суміші. Він відрізняється також високою вибірковістю залежно від специфічності реакції, що проходить між аналізованим компонентом та індикаторним розчином. Можливість накопичення визначуваного компонента в індикаторному розчині забезпечує високу чутливість методу. Прилади, дія яких ґрунтується на цьому принципі, застосовуються для контролю стану повітряного басейну, вони вимірюють концентрацію у повітрі таких шкідливих домішок, як NO, NO₂, SO₂, Cl₂, NH₃, H₂S. Прилади мають верхню межу вимірювання від 0,5 до 50 мкг/л залежно від аналізованого компонента.

До оптичних методів аналізу належать методи, які використовують різні види люмінесценції. Люмінесценція – це холодне свічення, що виникає під дією світла (фотолюмінесценція, флюоресценція), електричного поля (електролюмінесценція), хімічної реакції (хемілюмінесценція). Остання застосовується у газоаналізаторах для вимірювання концентрації оксиду і діоксиду азоту в газових сумішах.

Для вимірювання концентрації SO₂ використовується явище флюоресценції молекул під впливом ультрафіолетового випромінювання. Автоматизована система контролю забруднення атмосфери АСКЗА включає прилади для вимірювання концентрації CO, CO₂, NO, NO₂, SO₂, дія яких базується на явищах хемілюмінесценції і флюоресценції.

Ослаблення світлового потоку за рахунок його поглинання і розсіювання зваженими частинками, що знаходяться у газі, застосовується для вимірювання вмісту золи у димових газах котлоагрегатів, для контролю запилення повітря у виробничих приміщеннях і вмісту у ньому частинок

вологи. У цих приладах виконується просвічування шару або потоку газу, при цьому може вимірюватися як ослаблений частинками прямий потік, так і відбитий, останнє використовується рідше. Джерелом світла є, як правило, лампи розжарювання, а випромінювання сприймається фотоелементами, фоторезисторами або фотопомножувачами. Вимірювач задимленості газового потоку ІЗА виконує пряме просвічування потоку і може вимірювати задимленість у газоходах шириною від 1 до 10 м. Межі вимірювання густини становлять $(0 - 2) \text{ кг/м}^3$ при межі зведеної похибки $\pm 2 \%$.

9.2.6 Електричні газоаналізатори

В електричних газоаналізаторах концентрація того або іншого компонента визначається за зміною електричних властивостей газової суміші або рідини, з якою прореагував визначуваний компонент. До найбільш поширених електричних газоаналізаторів належать електрохімічні, які застосовуються для вимірювання мікроконцентрацій токсичних газів і кисню (цирконієві), що містяться в повітрі і димових газах, визначення концентрації забруднювальних домішок при виробництві чистих газів.

До електрохімічних газоаналізаторів належать пристрої, в яких вихідний сигнал визначається електрохімічними явищами, що відбуваються в електродних системах, занурених в аналізований газ або розчин, що контактує з ним. Електрохімічні методи в основному використовуються для аналізу рідин. Для аналізу газів найчастіше використовуються амперометричні, кулонометричні й електрохімічні аналізатори.

Амперометричні (вольтамперометричні) газоаналізатори. Якщо у розчин електроліту занурено два електроди, до яких прикладена різниця напруги від зовнішнього або внутрішнього джерела ЕРС, то у зовнішньому ланцюзі виникне струм, зумовлений рухом іонів у розчині. При цьому біля поверхні електродів збиратимуться іони протилежного знака, створюючи усередині розчину різницю напруги U , що протинаправлена напрузі E . Струм у ланцюзі $I = (E-U)/R$, де R – опір розчину; U – різниця внутрішніх потенціалів анода і катода. Прилади називаються гальванічними, якщо напруга E , що виникає у ланцюзі, створюється внутрішнім джерелом.

В амперометричних газоаналізаторах використовується фоновий розчин електроліту, в якому при відповідному матеріалі електродів і величині діючої напруги відбувається поляризація одного з електродів, і струм у ланцюзі за відсутності визначуваного газу практично дорівнюватиме нулю.

За наявності аналізованого газу у ланцюзі виникає струм, який визначається кількістю введених у фоновий розчин молекул газу, здатних

окиснюватися або відновлюватися на поляризованому електроді, змінюючи його потенціал. Порівняльний електрод має поверхню, яка у сотні разів перевищує поверхню вимірювального електрода, завдяки чому його потенціал не залежить від струму, що проходить у ланцюзі.

Якщо як вимірювальний електрод використовується ртуть, то прилади називаються полярографічними аналізаторами, або *полярографами*.

При вимірюваннях концентрації кисню у чистих газах як поляризований електрод використовується катод, фоновим електролітом якого є розчин кислоти. Підведення аналізованого газу здійснюється так, щоб між концентраціями кисню у досліджуваному газі і електроліті встановлювалася рівновага. Кисень, який є активним деполіаризатором, відновлюється на катоді до перекису водню, викликаючи проходження поляризаційного струму.

При аналізі вмісту SO_2 у технічних газах для виключення впливу кисню як поляризований електрод використовується анод, на якому SO_2 окиснюється з утворенням сірчаної кислоти.

Останніми роками завдяки створенню електролітичних комірок, що реагують на різні гази, амперометричні газоаналізатори набули широкого поширення для аналізу димових газів на електростанціях, промислових підприємствах, у двигунах внутрішнього згорання.

Принцип дії *кулонометричних газоаналізаторів* базується на вимірюванні кількості електрики, витраченої при електролізі. Згідно із законом Фарадея для виділення при електролізі кількості речовини G необхідно через розчин пропускати струм I упродовж часу τ , тобто

$$G = M \cdot I \cdot \tau / (96492 n), \quad (9.10)$$

де M – молекулярна маса окисненої або відновленої речовини; n – кількість електронів, що беруть участь в електродному процесі.

Речовина, що виділилася при електролізі, зв'язується без залишку з аналізованим компонентом газової суміші, завдяки чому мірою концентрації останнього є струм I . Останній регулюється так, щоб забезпечувалася нейтралізація розчину.

Кулонометричні газоаналізатори завдяки використанню компенсаційного методу вимірювання забезпечують високу точність вимірювань, їх покази не залежать від вологості газу, його тиску і температури, параметрів довкілля.

Сьогодні випускаються газоаналізатори, що використовують твердотілі чутливі елементи. На основі мікроелектронної технології розроблені польові транзистори, в яких металевий затвор замінений на речовину, чутливу до визначуваного компонента. Залежно від його концентрації змінюється провідність вхід-вихід польового транзистора. Використання твердотільних

чутливих елементів дозволяє здійснити випуск малогабаритних комбінованих приладів, призначених для вимірювання концентрацій CO, CO₂, NO, NO₂, O₂ у димових газах.

Цирконієві киснеміри. Значного поширення набули електрохімічні киснеміри із використанням діоксиду цирконію. Їх перетворювачем є дві камери, розділені між собою мембраною з діоксиду цирконію. При температурі (550 – 570) °C на мембрані виникає різниця потенціалів, що залежить від вмісту кисню у кожній з камер. Напруга знімається з платинових електродів, що знаходяться на обох поверхнях мембрани. В одну камеру подається аналізований газ, а в іншу – повітря. Перетворювач виконується у вигляді зонда.

Розглянуті газоаналізатори призначені для визначення складу димових газів ТЕС, доменних печей і конвертерів, відпрацьованих газів двигунів внутрішнього згорання, колошникових газів тощо. За допомогою цих систем контролюється вихід горючих і токсичних газів на теплових електростанціях і промислових об'єктах.

9.2.7 Хроматографічні газоаналізатори

Хроматографічні газоаналізатори призначені для аналізу багатокомпонентних газових сумішей, складу рідин і твердих тіл. *Хроматографи* – це прилади періодичної дії, складніші за будовою від розглянутих вище газоаналізаторів.

Процес вимірювання у цих приладах розділяється на дві стадії: хроматографічне розділення газової суміші на окремі компоненти і ідентифікація (детектування) компонентів, що включає якісний і кількісний їх аналіз. Хроматографічне розділення суміші на окремі компоненти, відкрите у 1903 р. М. С. Цвітом, здійснюється за рахунок різної швидкості руху газів уздовж поверхні з сорбенту, яка зумовлена характером зовнішніх та внутрішніх міжмолекулярних взаємодій.

Сьогодні за можливістю розділення й аналізу багатокомпонентних сумішей хроматографія не має конкурентів. Хроматографію можна використовувати для аналізу складу низькокиплячих газів, сумішей летких і термічно стійких твердих і рідких речовин, температура кипіння яких досягає 500 °C і вище. До переваг цього методу відносять також високу чутливість (яка досягається при використанні іонізаційних детекторів ($10^{-11} - 10^{-12}$) г/см³), малий об'єм відбіраної проби, порівняно високу точність і коротку тривалість аналізу.

Існують три різновиди хроматографічного методу вимірювання, які відрізняються способом переміщення аналізованої суміші: проявний,

фронтальний і витискувальний. Перший метод є найбільш поширеним. У його рамках розрізняють такі різновиди, зумовлені процесом розділення суміші на компоненти: газоадсорбційний, газорідинний і капілярний. Останній є різновидом газорідинного способу розділення.

Принципові схеми хроматографа і розділення суміші газів у колонці наведені на рис. 9.12. Із балона 1 газ-носії надходить у хроматограф. Для підтримання у процесі роботи сталої швидкості газу-носія використовується регулювальник 2, що містить редуктор, манометр і вимірник витрати газу.

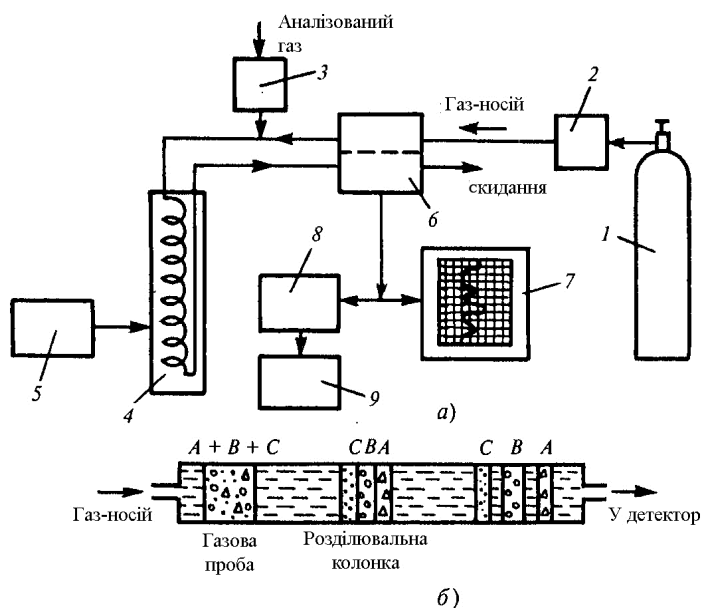


Рисунок 9.12 – Принципова схема газового хроматографа:

- 1 – балон; 2 – регулювальник; 3 – дозатор;
- 4 – роздільна колонка; 5 – терморегулятор;
- 6 – детектор; 7 – реєструвальний прилад; 8, 9 – мікропроцесорний і цифродруквальний пристрої

якої може бути виконаний різними методами, у тому числі розглянутими вище, що і реалізуються в детекторі 6. Оскільки у процесі вимірювання властивості газу-носія можуть змінюватися, при пропусканні останнього через детектор фіксуються зміни його властивостей, викликані наявністю компонента аналізованої суміші.

Для покращання розділення компонентів температурний режим колонки може змінюватися за допомогою терморегулятора 5 із програмним керуванням. Вихідний сигнал детектора 6 подається на реєструвальний прилад 7, мікропроцесорний 8 і цифродруквальний 9 пристрої. На діаграмі самописного приладу 7 вихід кожного з компонентів супроводжується піком, площа якого залежить від концентрації цього газу. Графік, що фіксує вихід компонентів, називають *хроматограмою*.

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 найменш сорбовані газу. Тому у пробі суміші газів (рис. 9.12 б), що містить три компоненти А, В і С, першим виноситься найменш сорбований газ А, а останнім – добре сорбований С. Після розділення кожен компонент із газом-носієм утворює бінарну суміш, аналіз

Хроматограма (рис. 9.13) є носієм як якісної інформації про вид компонентів суміші, так і кількісною – про їх концентрацію. Значення останньої визначається площею піка або його висотою. Оскільки розділення газів здійснюється за рахунок їх різних сорбційних властивостей, то час виходу того або іншого компонента при сталій швидкості газу-носія визначає вид газу. Ця характеристика називається часом утримування t_R . Вона чисельно дорівнює інтервалу часу від моменту введення проби газу до моменту, відповідного максимуму піка. Стійкішою характеристикою, не залежною від коливань об'ємної швидкості газу-носія v , є утримуваний об'єм газу-носія $V_R = t_R v$.

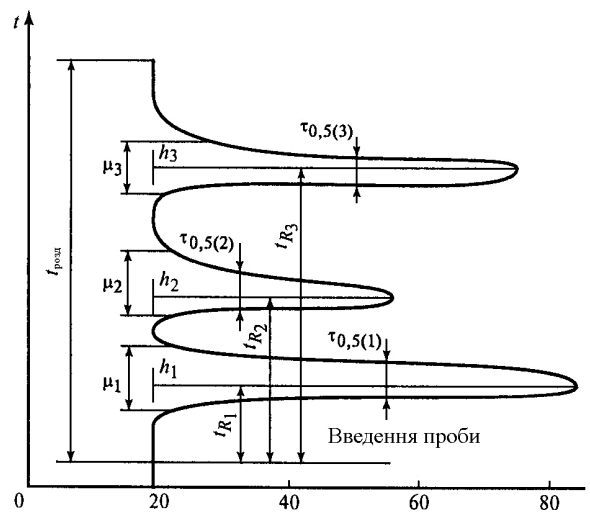


Рисунок 9.13 – Хроматограма розділення трикомпонентної суміші

Хроматографічне розділення – складний процес, складовими якого є сорбція, десорбція, дифузія. Остання, супроводжуючи процес розділення, викликає розмиття піків і погіршує якість розділення.

Особливість хроматографічного методу аналізу – вплив на результати вимірювання великої кількості взаємозв'язаних параметрів:

- 1) що характеризують роботу роздільної колонки (довжина, діаметр, форма), матеріал колонки, природа сорбенту, його пористість, зернистість, характер набивання, товщина рідкої плівки, температурний режим колонки;
- 2) пов'язаних із газом-носієм: природа і наявність домішок, швидкість і тиск;
- 3) пов'язаних із роботою дозатора: об'єм проби, його стабільність, спосіб введення проби;
- 4) пов'язаних із роботою детектора: чутливість, інерційність, лінійність градувальної характеристики, стабільність;
- 5) зумовлених способом реєстрації вихідного сигналу детектора і методом оброблення хроматограми: похибка, інерційність, чутливість вторинного приладу, швидкість руху діаграмного паперу, похибка розрахунку якісних і кількісних показників хроматографічного розділення.

9.2.8 Експлуатація і перевірка газоаналізаторів

Якість і надійність роботи промислових газоаналізаторів значно залежать від способу відбирання проби і дотримання вимог до характеристик газу, який надходить до приймача газоаналізатора. Ці вимоги належать до

температури, тиску, витрати і вологості газу, наявності в ньому механічних, агресивних та інших домішок.

Відбирана проба газу повинна бути показною, тобто за своїм складом такою, що відповідає усередненому складу газів у відповідних перерізах технологічних об'єктів. У зв'язку з цим відбирання проби із трубопроводів повинне виконуватися у перерізах зі сталим потоком, віддалених від місцевих опорів. Не рекомендується виконувати відбирання із нижніх точок трубопроводу, в яких можуть збиратися механічні домішки і волога. Якщо гази містять частинки золи, вугільний та інший пил, то для відбирання проби використовуються керамічні фільтри, які вводять до вимірюваного середовища. Поблизу місць відбирання не повинно бути введення технологічних потоків, що створюють просторовий градієнт концентрацій, а також пристроїв, через які можливе підсмоктування повітря або інших газів.

Так, при аналізі за допомогою термомагнітного газоаналізатора топкових газів на вміст O_2 , що характеризує надлишок повітря, що подається в топку, відбирання проби виконується з труби, яка шунтує конвективні поверхні нагрівання. Гази у трубу надходять після пароперегрівника, а повертаються у газохід після повітропідігрівника. У цьому випадку підсмоктування повітря, яке має місце у конвективних поверхнях нагрівання, не впливає на склад аналізованого газу. Вимірювання зазначеного параметра спрощується при використанні цирконієвого електрохімічного киснеміра, який вводиться у вигляді зонда у газохід котла після пароперегрівника.

Для підготовки проби газу та її транспортування через газоаналізатор застосовуються допоміжні пристрої, що розділяються на газовідбірні, редуційні, охолоджувальні, очисні, просмоктуючі та ін. Набір цих пристроїв, що входять до складу газоаналізатора, залежить від типу останнього, складу і параметрів аналізованого газу. Як приклад, на рис. 9.14 подана схема установки приймача термомагнітного киснеміра.

Найбільш поширеним пристроєм, який слугує для відбирання проби, є керамічний фільтр *1*. Він вводиться у потік газу, що має температуру до $500\text{ }^{\circ}\text{C}$, вміст пилу до 20 г/м^3 , і може забезпечити витрату газу через установку до $0,8\text{ л/хв}$. При використанні водяного охолодження фільтра температура газів у точці відбирання може досягати $1700\text{ }^{\circ}\text{C}$. Нижня межа температури газів у точках відбирання визначається можливістю утворення при конденсації рідких частинок, що забивають пори фільтра. Для захисту від механічного стирання частинками золи керамічний фільтр *1* закривається сталевим щитком.

Нахил трубки для відведення газу забезпечує відтік конденсату, а наявність на її кінці пробки – можливість періодичного продування фільтра,

що виконується стиснутим повітрям при закритому крані.

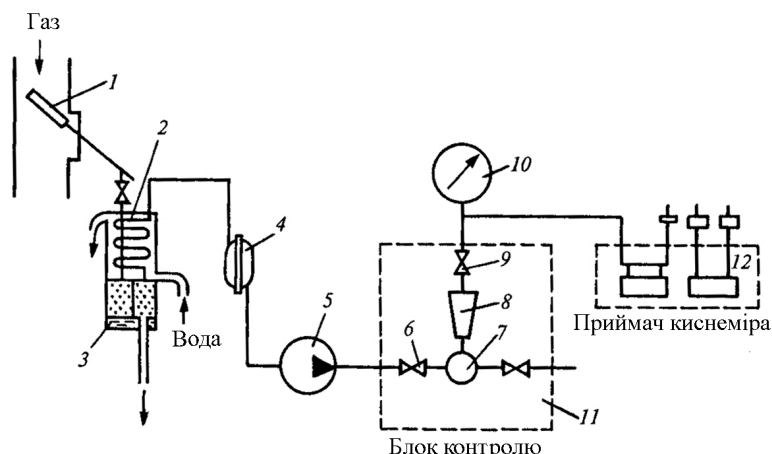


Рисунок 9.14 – Схема установки приймача киснеміра:

- 1 – керамічний фільтр; 2 – холодильник; 3 – конденсат; 4 – фільтр тонкого очищення;
5 – електронасос; 6, 9 – вентиль; 7 – контрольний фільтр;
8 – ротаметр; 10 – напоромір; 11 – блок контролю; 12 – киснемір

При підвищених температурах газів газоаналізатор забезпечується холодильником 2, що забезпечує також зниження вологості аналізованого газу. Конструкція холодильника залежить від температури і складу газу. При температурі газів $(400 - 600) ^\circ\text{C}$ використовуються прямоканальні холодильники, в яких охолоджувальна вода зовні омиває трубку, по якій рухається газ. У змійовикових холодильниках трубка зігнута спіраллю. У нижній частині холодильника є порожнина для збирання конденсату 3, який зливається у дренаж із використанням гідрозатвора. У холодильнику 2, показаному на рис. 9.14, застосовується комбінований охолоджувач, нижня його частина заповнена залізними стружками та слугує для збирання конденсату і видалення сірчистого газу.

Установки газоаналізаторів, як правило, мають декілька фільтрів, призначених для очищення газу від механічних частинок, краплинок вологи і невизначуваних компонентів. Таким чином, установка, наведена на рис. 9.14, окрім керамічного фільтра 1 для видалення дрібних механічних частинок включає тканинний фільтр тонкого очищення 4 і контрольний фільтр 7.

Перелічені допоміжні елементи мають типову конструкцію і входять до складу блоків регулювання і фільтрації типу Б, модифікації яких розрізняються набором фільтрів. Витрата газу через блок регулювання і фільтрації досягає 8 л/хв.

Для газоаналізаторів, що працюють у системах автоматичного регулювання, важливою характеристикою є запізнювання показів. Для того щоб у газоаналізатора покази нової концентрації встановилися у межах основної похибки, необхідна у середньому дво- або п'ятикратна зміна

внутрішнього об'єму установки від точки відбирання тиску до приймача киснеміра 12. У зв'язку із цим останні разом із допоміжними пристроями розміщують поблизу технологічних об'єктів. Для того щоб зменшити запізнення показів, підвищують швидкість руху аналізованого газу у лініях за рахунок байпасування приймача газоаналізатора. Скорочення довжини газових ліній і зменшення запізнення може бути отримане також за рахунок відбирання газу із петель, що шунтують ділянки технологічних об'єктів.

Перевірка показів газоаналізаторів реалізується за допомогою зразкових газових сумішей, наповнених у балони, що додаються до газоаналізаторів.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Чим викликана суворя послідовність визначення компонентів газової суміші у хімічних газоаналізаторах?
2. Чому об'ємні хімічні аналізатори не використовуються для вимірювання малих концентрацій визначуваного компонента?
3. Чим викликана необхідність видалення водню у газоаналізаторах за теплопровідністю при вимірюванні концентрації CO_2 ?
4. Чому у вимірювальних схемах аналогових теплових і магнітних газоаналізаторів застосовують двомостові з'єднання, які відсутні в аналогічних мікропроцесорних приладах?
5. Що таке термомагнітна конвекція?
6. Які параметри довкілля впливають на покази магнітного газоаналізатора і чому?
7. Яке призначення фільтрових камер в оптичному газоаналізаторі на CO_2 ?
8. Який принцип дії амперометричних газоаналізаторів?
9. Які характеристики газової суміші визначаються за часом утримування і висотою піка хроматограми?
10. Які гази-носії використовуються у хроматографах?
11. Які детектори застосовуються у газових хроматографах?
12. Які елементи включають установки промислових газоаналізаторів за теплопровідністю і термомагнітні?

9.3 АНАЛІЗ СКЛАДУ РІДИН

9.3.1 Методи аналізу складу рідин

Реалізація технологічних процесів у хімічній, газо- і нафтохімічній промисловості, енергетиці у багатьох випадках ґрунтується на результатах аналізу складу рідин. Одним із важливих моментів роботи охорони довкілля є

контроль за станом природних і штучних водоймищ, аналіз скидних вод промислових підприємств і населених пунктів, що здійснюються також із використанням аналізаторів складу рідин. До найбільш поширених методів аналізу рідин, що застосовуються у промислових аналізаторах, належать різновиди електрохімічного, оптичного і теплового методів, наведені у табл. 9.1.

У табл. 9.1 відсутні такі методи, як хроматографічний, титрометричний, мас-спектрометричний. Перший широко застосовується для аналізу складу газу. Титрометричний і мас-спектрометричний методи в основному використовуються лише у лабораторній практиці.

Із перелічених у табл. 9.1 методів найбільшу роздільну здатність мають полум'я-фотометричний, колориметричний, амперометричний і кулонометричний, які застосовуються для вимірювання мікроконцентрацій розчинених речовин. Подібно до газоаналізаторів прилади для аналізу складу рідин є установками, що містять, окрім первинних і вимірювальних перетворювачів, допоміжні пристрої для підготовки проби і її транспортування.

Таблиця 9.1 – Методи аналізу розчинів

Метод	Вимірювана величина
Електрохімічний	
Кондуктометричний	Загальна електрична провідність, концентрація дисоціюючої речовини у розчині, кондуктометричне титрування
Потенціометричний	Концентрація конкретних іонів (іонометрія), окиснювально-відновний потенціал (редоксометрія), титрування потенціометра
Амперометричний Кулонометричний	Концентрація певної речовини у розчині або розплаві
Оптичний	
Колориметричний Полум'я-фотометричний	Концентрація певної речовини у розчині або розплаві
Турбідиметричний Нефелометричний	Концентрація зважених частинок у суспензіях і емульсіях
Тепловий	
Термокондуктометричний	Вимірювання концентрації розчинених газів

9.3.2 Електрохімічні методи аналізу розчинів

Кондуктометричний метод аналізу розчинів. Водними розчинами електролітів є провідники другого роду, перенесення струму в яких здійснюється за рахунок руху іонів. Останні утворюються при дисоціації речовин, що знаходяться у розчині. Електропровідність характеризує

сумарну концентрацію іонів, що знаходяться у розчині, у зв'язку з чим прилади для її вимірювання градууються в одиницях питомої електропровідності ae : $См/см$ (сименс на сантиметр) і $мкСм/см$, в одиницях умовного солевмісту ($мг/кг NaCl$) або концентрації ($\% H_2SO_4$).

Для вимірювання концентрації розчинів за їх електропровідністю використовуються електродні і безелектродні методи, останні застосовуються в основному для вимірювання концентрацій кислот та лугів.

Електродні кондуктометри. У загальному випадку первинним перетворювачем електродних кондуктометрів є дві занурені у рідину пластини (електроди). Опір розчину R між ними пов'язаний із питомою електропровідністю залежністю

$$R_x = l/(e \cdot S) = \kappa/e, \quad (9.11)$$

де l , S – відстань між електродами та їх площа; e – питома електропровідність розчину.

Коефіцієнт κ , що має розмірність $см^{-1}$, називають сталою первинного перетворювача (давача).

Якщо відома стала первинного перетворювача, можна легко здійснити перехід від вимірюваного звичайними методами опору R_x до величини питомої електропровідності розчину. Стала перетворювача визначається за допомогою градуювання при вимірюванні концентрації контрольних розчинів із відомою електропровідністю.

Вимірювальні схеми, що використовуються для визначення опору первинного перетворювача електропровідності, живляться змінним струмом. При використанні постійного струму відбувається поляризація електродів. Біля їх поверхні збираються іони протилежного знаку і продукти електролізу (пухирці газів), викликаючи утворення внутрішньої протиЕРС і збільшення опору розчину. Електродні ефекти за інших рівних умов залежать від матеріалу електродів і стану їх поверхні. Платинові електроди мають мінімальний поляризаційний опір, тому їх застосовують у лабораторних кондуктометрах при вимірюваннях підвищеної точності.

Електроди промислових кондуктометрів виготовляють із нержавіючої сталі.

При живленні первинних перетворювачів змінним струмом вплив поляризації електродів на результат вимірювання зменшується зі зростанням частоти струму. Перетворювачі промислових кондуктометрів живляться змінним струмом частотою $50 Гц$, на лабораторні кондуктометри, що включають мости повної провідності, подається змінна напруга частотою $(1 - 2) кГц$ і вище від звукових генераторів.

При живленні електродних перетворювачів змінним струмом між електродами, окрім активної складової опору, виникає і реактивна (ємнісна),

яка залежить від діелектричної проникності розчину. Комплексний характер опору перетворювача повинен бути врахований при вимірюванні за допомогою введення комплексного опору в одне з прилеглих до плеча R_x плечей мосту, яке використовується для вимірювання опору розчину. Електродні перетворювачі для вимірювання електропровідності у промислових умовах поділяють на *магістральні*, *занурювальні* і *проточні*. Магістральні перетворювачі вводяться безпосередньо у трубопровід, яким рухається аналізований розчин. Занурювальні перетворювачі опускаються у резервуар з контрольованою рідиною. Через проточний перетворювач проходить проба аналізованого розчину, яка пройшла у більшості випадків попередню підготовку. Усередині перетворювача, як правило, знаходиться терморезистор, за допомогою якого здійснюється компенсація впливу температури.

Схема проточного електродного перетворювача мікропроцесорного кондуктометра КАЦ-037 (фірми НВО «Техноприлад») наведена на рис. 9.15. Виконаний із нержавіючої сталі корпус *1* є одним із електродів, інший електрод *2* відокремлений від першого ізолюючою прокладкою *3*. Стала електродного перетворювача змінюється за рахунок зміни висоти прокладки *3* і перерізу каналів *4*, що підводять аналізований розчин. Усередині електрода *2* знаходиться кремнієвий терморезистор *5*, один із його виводів і електрод *1* заземлені.

Схема електродного перетворювача переносного кондуктометра КПЦ-026, що випускається тим самим НВО, наведена на рис. 9.16. У корпусі з оргскла *1* знаходяться три електроди. Комірку зі сталюю $0,004 \text{ см}^{-1}$ утворюють електроди *2*, *3* (виводи I, II), вона призначена для вимірювання глибоко знесолених розчинів. Електроди *2*, *4* (виводи II, III) утворюють комірку зі сталюю 4 см^{-1} , яка використовується для вимірювання електропровідності концентрованих розчинів. Для введення температурної компенсації застосовується кремнієвий терморезистор *5*. Цей перетворювач може використовуватися як у проточному, так і в занурюваному варіантах. Нанесена на корпусі перетворювача лінія 0-0 відповідає глибині занурення перетворювача у розчин при вимірюванні електропровідності електродами *2* і *4*. У цьому випадку у розчин занурюється

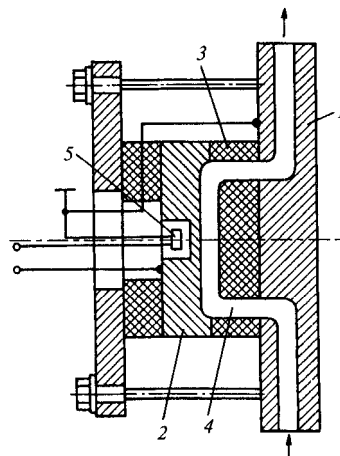


Рисунок 9.15 – Схема проточного електродного перетворювача кондуктометра:
1 – корпус; *2* – електрод;
3 – прокладки; *4* – канал;
5 – терморезистор

верхня частина перетворювача, що захищає електроди 2, 3 від засолення.

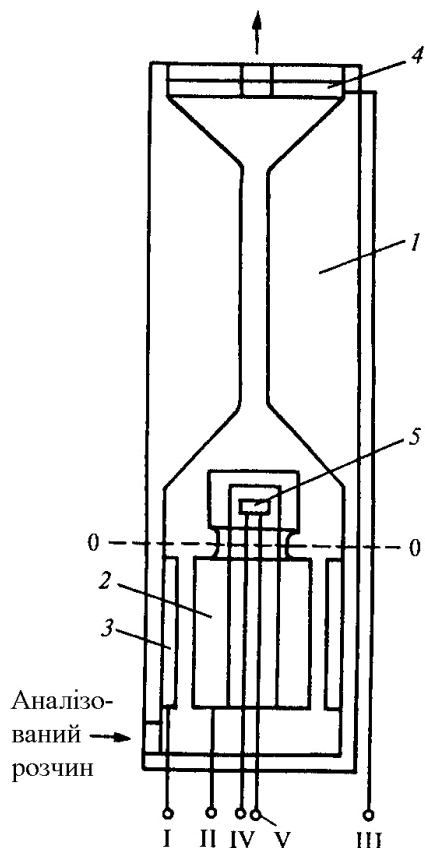


Рисунок 9.16 – Схема електродного перетворювача переносного кондуктометра:

- 1 – корпус із оргскла;
- 2 – 4 – електроди;
- 5 – терморезистор

Для зниження впливу поляризації випускаються перетворювачі із чотирма електродами, до двох із яких підводиться напруга, а між двома іншими вимірюється опір розчину.

Найбільш істотними недоліками електродних кондуктометрів є поляризація і забруднення електродів продуктами електрохімічних реакцій, що відбуваються на їх поверхні, а також речовинами, що знаходяться у розчинах. Останнє викликає необхідність їх періодичного механічного або хімічного очищення і відмивання.

Безелектродні кондуктометри.

Безелектродні перетворювачі містять первинні перетворювачі, що не мають безпосереднього контакту з вимірюваним середовищем і вільні від таких недоліків, як поляризація електродів і їх забруднення. Розрізняють два різновиди безелектродних кондуктометрів: високочастотні і низькочастотні.

Високочастотні кондуктометри працюють на частотах більше 1 кГц , вимірювання концентрації аналізованого розчину виконується за допомогою контролю реактивного опору розчину, який залежить від концентрації. Первинні перетворювачі високочастотних безелектродних кондуктометрів залежно від вигляду вимірюваного реактивного опору поділяють на ємнісні й індуктивні. Схеми перетворювачів обох видів подані на рис. 9.17. Оскільки між концентрацією розчину і вихідними величинами перетворювачів C і L існує складна залежність, на яку впливають, окрім природи розчину, геометрія і матеріал перетворювача, частота струму та інші, їх градувальні характеристики визначаються експериментально для конкретного перетворювача і розчину.

Як вимірювальні перетворювачі високочастотних кондуктометрів використовуються мостові й резонансні схеми, що живляться від генераторів високої частоти. У останніх вимірюється частота власних коливань резонансного контуру, яка залежить від індуктивного або ємнісного опору

первинного перетворювача.

У низькочастотних безелектродних кондуктометрах аналізований розчин електроліту утворює виток провідника, який є вторинною обмоткою трансформатора збудження і первинною обмоткою вимірювального трансформатора. Опір рідинного витка визначається геометрією перетворювача і електропровідністю рідини. Струм у вторинній обмотці вимірювального трансформатора пропорційний напрузі збудження і провідності контрольованого розчину.

Перевірка кондуктометрів. При випуску, ремонті й експлуатації кондуктометрів необхідно виконувати перевірку правильності їх показів. Повірка вимірювального перетворювача без електродного первинного перетворювача може виконуватися за допомогою магазину зразкових опорів. Перевірка показів усього комплекту виконується або за методом безпосереднього звіряння показів кондуктометра, що перевіряється, зі зразковим при вимірюванні електропровідності контрольних (зразкових) розчинів, або за методом прямого вимірювання кондуктометром питомої електропровідності стандартних розчинів, що мають електропровідність, близьку до 20, 50, 80 % діапазону вимірювання. Контрольні розчини для вимірювання питомої електричної провідності готують ваговим методом або розбавленням. Для їх приготування використовують такі речовини: водні розчини сірчаної кислоти або хлористого калію, розчин хлористого калію в етиленгліколі.

Потенціометричний метод аналізу. У практиці аналізу розчинів значне місце займають потенціометричні аналізатори, призначені для вибіркового вимірювання активної концентрації визначуваних іонів, у зв'язку із чим їх називають *іономірами*. Потенціометричний метод вимірювання базується на законі Нернста, який був відкритий для металевих електродів, а пізніше поширений на електроди з інших речовин. Суть явища полягає в тому, що при зануренні металевого електрода у розчин на його поверхні виникає потенціал, який залежить від активної концентрації іонів цього металу у розчині. Виникнення потенціалу зумовлене переходом іонів металу у розчин. У стані рівноваги поверхневий потенціал забезпечує вирівнювання швидкостей анодного і катодного процесів, пов'язаних із переходом іонів металу у розчин і з розчину в електрод. Вимірювання поверхневого

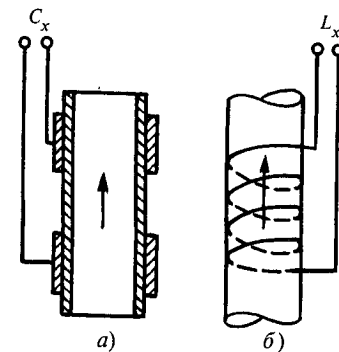


Рисунок 9.17 –
Первинні перетворювачі безелектродних кондуктометрів:
а) ємнісні; б) індуктивні

потенціалу електрода дозволяє судити про концентрацію відповідних іонів у розчині.

Рівняння Нернста, що встановлює зв'язок між рівноважним потенціалом E на поверхні електрода і активною концентрацією відповідних іонів у розчині a , має вигляд

$$E = E_0 + R \cdot T \cdot \ln(a) / (n \cdot F), \quad (9.12)$$

де E_0 – нормальний потенціал; R – питома газова стала; T – абсолютна температура; n – заряд іонів; F – число Фарадея.

Для вимірювання рівноважного поверхневого потенціалу E необхідно замкнути електричний ланцюг, вводячи у розчин інший електрод, який називають *допоміжним*, або *електродом порівняння*. Потенціал цього електрода у процесі вимірювання повинен залишатися сталим. Для характеристики потенціалоутворювальних властивостей різних речовин величини рівноважних потенціалів визначаються щодо допоміжного платинового водневого електрода, взятого як нормальний. Цей електрод є платиновою пластиною, зануреною у розчин з активною концентрацією іонів водню, яка дорівнює одиниці, при тиску водневого газу 0,1 МПа і температурі 298 К. Рівноважні потенціали електродів E_0 , визначені при їх зануренні у відповідні нормальні розчини щодо нормального водневого електрода, є вимірними за так званою водневою шкалою і вважаються *нормальними*. Нормальні потенціали для деяких видів речовин подані у табл. 9.2.

Таблиця 9.2 – Нормальні електродні потенціали, визначені за водневою шкалою

Електрод	Потенціал, В	Електрод	Потенціал, В
Li ⁺ /Li	– 3,045	Cu ²⁺ /Cu	+ 0,337
K ⁺ /K	– 2,925	Ag ⁺ /Ag	+ 0,799
Ca ²⁺ /Ca	– 2,866	Hg ²⁺ /Hg	+ 0,845
Na ⁺ /Na	– 2,714	Pt ²⁺ /Pt	+ 0,910
Al ³⁺ /Al	– 1,662	Cl [–] /Cl ₂ , Pt	+ 1,3595
Fe ²⁺ /Fe	– 0,4402	Au ³⁺ /Au	+ 1,498

У табл. 9.2 знак «мінус» означає, що за потенціалом речовина знаходиться у ряді активностей перед воднем. У графі «електрод» зазначені потенціалоутворювальні іони, за рисою – матеріал робочого електрода.

У цей час сфера застосування потенціометричних методів вимірювання розширюється завдяки створенню іоноселективних електродів, що мають специфічні функції щодо таких катіонів і аніонів, як Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Pb²⁺, Cl[–], Br[–] та ін. Цей метод використовується також для вимірювання окиснювально-відновного потенціалу, що характеризує відношення

активностей окисненої і відновленої форм іонів у розчині. Допоміжний електрод у цьому випадку є нейтральним, а на робочому електроді розвивається потенціал, при якому встановлюється динамічна рівновага між швидкостями переходу електронів від відновленої форми іонів до електрода і від електрода до окисненої форми іонів.

Прилади, призначені для вимірювання окиснювально-відновного потенціалу, називають *редоксметричними аналізаторами*.

Активна концентрація іонів у розчинах, як правило, виражається в одиницях десяткового логарифма. Так, $pH = -\lg a_{H^+}$; $pNa = -\lg a_{Na^+}$, у зв'язку із цим вимірювальні прилади отримали назву *pH-метрів*, *pNa-метрів* тощо. Найширше потенціометричні прилади застосовуються для вимірювання активної концентрації іонів водню. Їх використання здійснюється у двох напрямках, пов'язаних із вимірюванням лужних або кислотних функцій розчину і визначенням моменту нейтралізації розчинів при їх титруванні.

При розчиненні у воді кислот підвищується концентрація іонів водню, а pH зменшується. При розчиненні лугу концентрація іонів водню зменшується, а pH зростає. Таким чином, відхилення числа pH у водних розчинах від 7 у той або інший бік характеризує міру їх кислотних або лужних властивостей. Якщо температура чистої води підвищується до 100 °С, то вона набуває кислих властивостей, при цьому число pH зменшується до 6,12. Вода із нульовою температурою має лужні властивості і $pH = 7,97$. Для водних розчинів діапазон зміни pH становить 0 – 14, для аміачних $pH = 0 – 32,7$, а для мурашиної кислоти $pH = 0 – 6,13$.

Робочі і допоміжні електроди потенціометричних аналізаторів. Для отримання поверхневого стрибка потенціалу, який залежить від активної концентрації відповідних іонів у розчині, можуть використовуватися електроди трьох типів. Електроди першого типу є металами, або металами із сорбованим на поверхні газом, наприклад, як водневий електрод. Електроди другого типу є системами, що включають металевий контактний електрод, його погано розчинну сіль і розчин, що містить аніони цієї солі, які визначають потенціал електрода, наприклад, $Ag/AgCl/HCl$. До третього типу належать електроди спеціального призначення, такі, наприклад, як електроди із рідинними мембранами. Електроди з чистих металів у розчинах швидко покриваються шаром окисної плівки й іншими хімічними сполуками, що приводить до зміни характеристик електрода і втрати специфічних функцій.

Як зразковий електрод для вимірювання числа pH розчинів використовуються водневі електроди (рис. 9.18). Електрод є платиновою пластинкою, покритою шаром платинової черні, на поверхні якої добре

сорбується водень. Платинова пластинка занурюється у розчин, через який пропускається під тиском водень.

Необхідність подачі в електрод водню, отруєння платини рядом хімічних речовин, які наявні у розчинах, зумовили їх використання лише як зразкові, що застосовуються в лабораторній практиці.

Для вимірювання числа pH у лабораторних і промислових умовах використовуються скляні робочі електроди, значному поширенню яких сприяла простота їх конструкції, високі метрологічні характеристики і широкий діапазон аналізованих середовищ. У скляних електродах водневій функції мають чутливу тонкостінну мембрану, виконану з літєвого або натрієвого скла. Згідно з однією з найбільш поширених теорій водневій функції мембрани зумовлені заміщенням іонів лужних металів, що знаходяться усередині силікатних комірок скла, рухливішими іонами водню. Заміщення відбувається до настання рівноважного стану. Мембрани з літєвого скла набули більшого поширення унаслідок їх меншої сприйнятливості катіонів лужних металів у розчині, які порівняно з літєм мають більші розміри іонів.

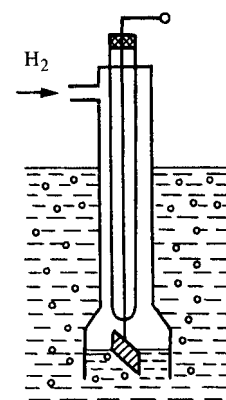


Рисунок 9.18 –
Схема
водневого
електрода

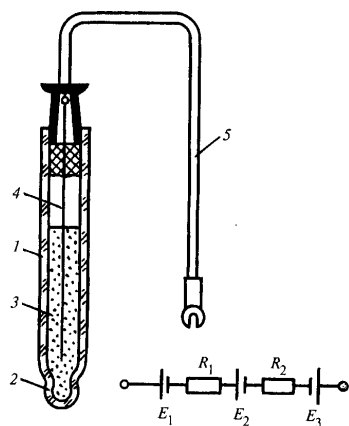


Рисунок 9.19 – Схема
робочого скляного
електрода:

- 1 – відкалібрована трубка;
- 2 – мембрана з літєвого скла;
- 3 – стала концентрація розчину;
- 4 – контактний електрод;
- 5 – вивідний провідник

Принципова схема робочого скляного електрода і його еквівалентна електрична схема наведені на рис. 9.19. Електрод виконаний із відкаліброваної товстостінної скляної трубки 1, до кінця якої припаяна чутлива мембрана з літєвого скла 2. На зовнішній поверхні мембрани при зануренні її у розчин розвивається потенціал E_3 , який залежить від активної концентрації іонів водню. Скляний електрод заповнений розчином кислоти сталої концентрації 3, який замикає електричний ланцюг між мембраною і контактним електродом 4, з'єднаним із вивідним провідником 5. Для забезпечення сталості потенціалу E_1 , що виникає на поверхні контактного електрода 4, використовується другий тип електрода, що включає метал Ag , його погано розчинну сіль $AgCl$ і розчин, що містить аніони солі HCl . Оскільки концентрація розчину

усередині скляного електрода стала, то потенціал E залежить лише від температури розчину.

На внутрішній поверхні чутливої мембрани 2 розвивається потенціал E_2 , який при сталій концентрації розчину 3, так само, як і E_1 , залежить лише від температури. Чутлива мембрана має асиметрію, яка проявляється у вигляді різниці потенціалів на зовнішній і внутрішній поверхнях при однакових активних концентраціях іонів водню у розчинах усередині і поза електродом.

У вимірювальній практиці використовуються хлорсрібні, бромсрібні і каломельні скляні електроди. У перших двох електродах як контактний використовується срібний електрод, покритий шаром погано розчинної солі хлористого або бромистого срібла AgCl , AgBr , при цьому електроди заповнені відповідно розчинами HCl або HBr . Усередині робочого скляного каломельного електрода знаходяться ртуть, її погано розчинна сіль Hg_2Cl_2 (каломель) і розчин KCl . Контактний електрод вводиться всередину ртуті. Використання у каломельному електроді токсичної ртуті обмежує сферу його застосування.

9.3.3 Оптичні методи аналізу складу рідин

В оптичних аналізаторах рідин використовується зв'язок між параметрами оптичного випромінювання і складом аналізованої рідини. Для аналізу складу рідин найчастіше використовуються такі різновиди оптичного методу: колориметричний, полум'я-фотометричний, турбідиметричний та нефелометричний.

Колориметричні аналізатори. У колориметричних аналізаторах концентрація речовини вимірюється за поглинанням випромінювання аналізованим розчином у видимій частині спектра. Оскільки для вимірювання випромінювання використовуються різні види фотоефекту, аналізатори називаються *фотоколориметричними*, або *фотоколориметрами*.

У більшості випадків фотометрований забарвлений розчин отримують у результаті допоміжної хімічної реакції, яка забезпечує вибірккову зміну забарвлення розчину та її інтенсивності залежно від концентрації визначуваного компонента, при цьому у розчині не повинно утворюватися зважених частинок.

В оптичний канал між джерелом випромінювання і фотоелементом забарвлений розчин вводиться кюветою, яка виконана зі скла і має малі втрати світлового потоку за рахунок поглинання і віддзеркалення. Для дійсних розчинів ослаблення випромінювання на виході кювети визначається законом Ламберта-Вера.

При проведенні колориметричного аналізу розрізняють чутливість фотометричної реакції і чутливість методу в цілому. Перша залежить від вибору реактиву і умов реакції, друга визначається засобами і способом вимірювання оптичної густини, умовами приготування реактивів, наявністю сторонніх домішок. Повнота переходу визначуваної речовини у забарвлений комплекс залежить від pH розчину, тому його контроль часто здійснюється при приготуванні робочого розчину. У вітчизняних і зарубіжних фотоколориметрах, що випускаються сьогодні, використовуються різні варіанти одно- і двоканальних оптичних систем.

Автоматичні фотоколориметричні прилади є складними пристроями періодичної дії. Вони мають значну кількість електричних клапанів та мікронасосів, які спрацьовують за командою керуючого програмного пристрою. Проте завдяки високій роздільній здатності і універсальності вони отримують все більш значне поширення для вибіркового вимірювання мікроконцентрацій різних речовин, що знаходяться в розчинах.

До фотоколориметричних приладів належать автоматичні *кремнеміри, жорсткоміри, фосфатоміри, вимірювачі розчиненого у воді кисню, хлору та інших речовин.*

Схема автоматичного кремнеміра ІКА111, що випускається НВО «Техноприлад» і призначається для вимірювання концентрації іонів SiO_3^{2-} , подана на рис. 9.20. Ці прилади використовуються на теплових і атомних електричних станціях для контролю якості хімічно знесоленої води. Кремнемір має три блоки: гідравлічний 1, фотометричний із двоканальною оптичною системою 2 і не показаний на схемі мікропроцесорний блок (МБ) обробки сигналів і керування.

Кремнемір є приладом періодичної дії, в якому двічі на годину виконується вимірювання кремневістості аналізованого розчину і 1 раз на чотири години виконується операція контролю початкової і кінцевої точок діапазону вимірювання. Для виконання цієї операції застосовуються чиста вода і калібрувальний розчин, які знаходяться відповідно у посудинах 5, 6. Аналізована вода надходить із посудини сталого рівня 4. У посудинах 7–9 знаходяться молібдат амонію, сірчана кислота і відновник. З усіх посудин розчини подаються у змішувач 3 насосами $D_1–D_6$. У змішувачі 3 при перемішуванні молібдату амонію з сірчаною кислотою утворюється реагент, що змінює своє забарвлення та її інтенсивність за наявності іонів SiO_3^{2-} і відновника. Наявність мішалки у змішувачі 3 забезпечує однорідність розчину і прискорює реакцію, для завершення якої необхідно 25–30 хвилин.

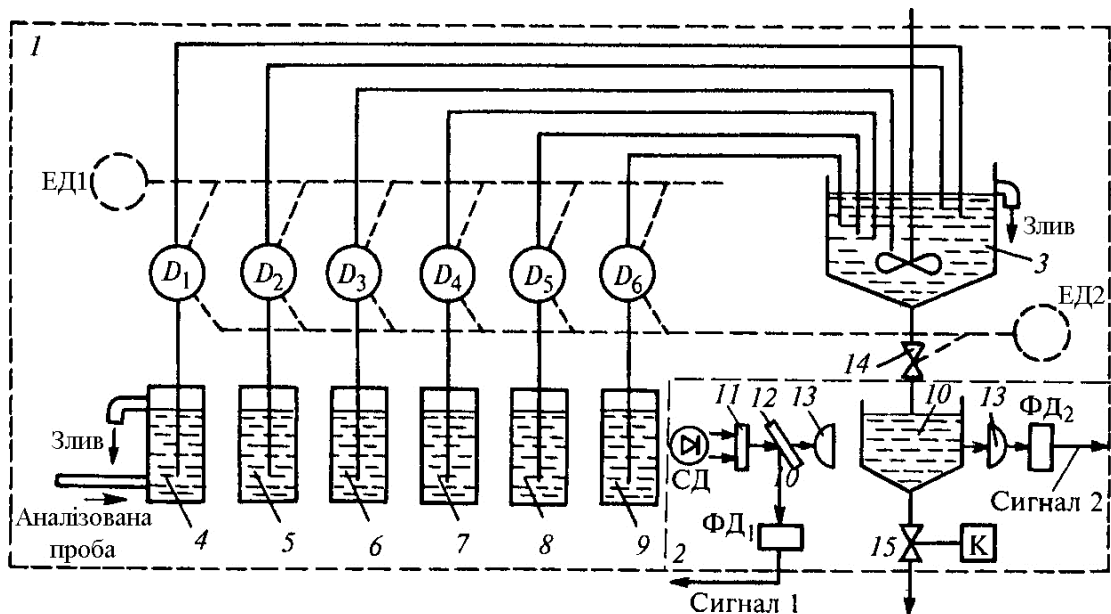


Рисунок 9.20 – Схема автоматичного кремнеміра:

1, 2 – гідравлічний і фотометричний із двоканальною оптичною системою блоки;
 3 – змішувач; 4 – посудина сталого рівня; 5, 6 – посудини з чистою водою і калібрувальним розчином; 7 – 9 – посудини з молібдатом амонію, сірчаною кислотою і відновником; 10 – вимірювальна кювета; 11 – світлофільтр; 12 – світлороздільна пластина; 13 – лінзи; 14 – клапан; 15 – електричний клапан; ФД₁, ФД₂ – фотодіоди; СД – світлодіод; D₁ – D₆ – насоси; ЕД₁, ЕД₂ – електричні двигуни

Для керування насосами і клапаном 14 використовуються два електродвигуни: ЕД₁ приводить насоси в дію, а ЕД₂ керує послідовністю їх під'єднання. Обома двигунами керує мікропроцесорний блок МБ.

Оптична система приладу 2 включає вимірювальну кювету 10, джерело світла – світлодіод СД, світлофільтр 11, світлороздільну пластину 12, лінзи 13, світлоприймачі-фотодіоди ФД₁, ФД₂, що формують опорний 1 і вимірювальний 2 сигнали. За допомогою опорного сигналу компенсується вплив нестабільності джерела світлового сигналу. Електричний клапан 15 виконує періодичне зливання розчину з кювети 10. Сигнали 1, 2 надходять до мікропроцесорного блоку. Елементи оптичного і гідравлічного каналів термостатовані.

При коректуванні початкової точки діапазону вимірювання у змішувач 3 зливається молібдат амонію і сірчана кислота, вони ретельно перемішуються упродовж декількох хвилин, після чого до них додається доза чистої води, а потім відновник. Після перемішування розчин зливається у вимірювальну кювету 10. При корекції кінцевої точки діапазону вимірювання виконується та сама послідовність операцій, але використовується лише калібрувальний розчин. Завдяки проведенню цих операцій коректується вплив забрудненості вимірювальної кювети і зміни характеристик оптичної системи і джерела світла. Відмінність операції вимірювання від розглянутих полягає лише у

використанні аналізованого розчину.

До фотоколориметричних приладів належить жорсткомір СОЖ-121, призначений для вимірювання мікроконцентрацій іонів кальцію і магнію. Як допоміжна реакція використовується реакція між іонами Ca^{2+} і Mg^{2+} із хромом темносинім за наявності боратного буферного розчину. У результаті реакції проба набуває червоного забарвлення. Оскільки використовувані у приладі реактиви характеризуються високою чистотою, відсутня необхідність введення корекції на коливання оптичної густини реагенту. У жорсткомірі використовується двоканальна оптична система, як променеприймачі застосовуються фотодіоди. Діапазон вимірювання жорсткоміра становить (2 – 100) *мкг-екв/кг*. На розглянутому принципі дії працюють фосфатовимірювачі ІФА 112 і COPRA фірми SWAN.

До найбільш чутливих аналізаторів рідин належать *полум'я-фотометричні прилади*. Їх принцип дії базується на здатності збуджених атомів випромінювати в певній частині спектра. Оскільки спектр випромінювання залежить від будови атомів або молекул, метод має високу специфічність і чутливість.

Чутливість методу значною мірою залежить від температури полум'я, що визначає ступінь збудження атомів. Як вимірювальні елементи використовуються фотопомножувачі, фотодіоди. Цей метод має велику чутливість щодо атомів лужних металів, яка перевищує чутливість інших хімічних методів.

9.3.4 Вимірювання концентрації газів, розчинених у воді і парі

Завдання вимірювання концентрації розчинених у воді газів трапляється як у промисловості, наприклад під час контролю теплоносія на теплових і атомних електростанціях, так і під час аналізу стану води у водоймищах і відстійниках.

Вимірювання розчиненого у воді кисню. Залежно від концентрації розчиненого у воді кисню для його вимірювання використовується декілька методів. Для аналізу мікроконцентрацій розчиненого кисню застосовуються амперометричні, кондуктометричні і колориметричні методи. При концентраціях, які становлять *мг/л*, використовується термокондуктометричний метод.

Амперометричні киснеміри (рис. 9.21) належать до електрохімічних аналізаторів, принцип дії яких базується на вимірюванні сили струму, що проходить через поляризовану електродну систему за наявності деполаризатора – кисню. Метод використовується також під час аналізу складу газів.

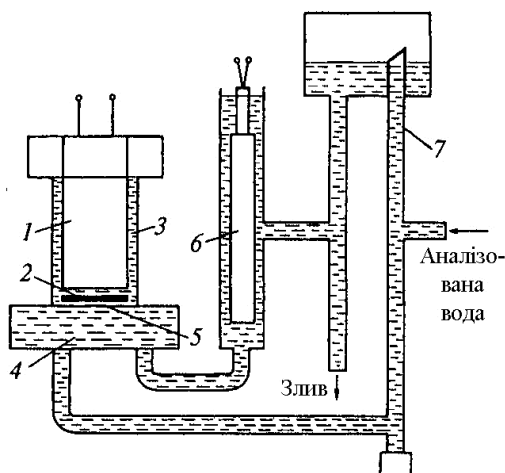


Рисунок 9.21 – Схема мембранного амперометричного киснеміра:

- 1, 2 – цинковий і вугільний електроди; 3 – буферний розчин; 4 – аналізована вода; 5 – мембрана; 6 – мідний опір; 7 – напірна трубка

Напруга E у ланцюзі, що містить занурені у розчин електроди, може створюватися за рахунок зовнішнього або внутрішнього джерела, останнім може бути гальванічна пара електродів. У киснемірах це джерело використовується найчастіше. Поляризованим електродом у приладах є твердий катод, на якому відбувається відновлення кисню. Як матеріал катода використовуються золото, срібло, паладій, платина. Для збереження сталості характеристик приладу електроди не повинні забруднюватися продуктами електролізу. Для захисту електродів від аналізованого середовища і забезпечення малого опору електроліту між електродами розміщують фоновий

електроліт, індиферентний щодо електродів.

У промислових киснемірах застосовуються відкриті електродні системи або закриті полімерною мембраною. У першому випадку кисень з аналізованої води передається фоновому електроліту за допомогою газопередавальної системи. У другому випадку аналізована вода омиває захищену мембраною електродну систему. Як фоновий електроліт використовується лужний буферний розчин із $pH = 8 - 10$. У таких середовищах швидкість відновлення кисню на катоді на три порядки вища, ніж у кислому електроліті.

Вимірювання розчиненого у воді водню. Концентрація водню у свіжій парі на виході з пароперегрівачів характеризує інтенсивність проходження процесу корозії поверхонь нагрівання. У зв'язку із цим автоматичні воднеміри набули значного поширення на теплових електричних станціях. Воднемір схожий за конструкцією на киснемір. Відмінність полягає в матеріалі електродів і типові буферного розчину.

9.3.5 Експлуатація аналізаторів складу рідин та їх допоміжних пристроїв

Аналізатори складу рідин серед усіх існуючих первинних приладів, вимагають правильного вибору точок відбору проб, жорсткого дотримання умов транспортування і підготовки проби, кваліфікованого і своєчасного проведення технічного обслуговування, передбаченого документацією на

аналізатори і допоміжні пристрої.

Первинні перетворювачі розглянутих аналізаторів рідин при відповідних параметрах середовища за температурою і тиском можуть вводитися безпосередньо у технологічні об'єкти. До них належать магістральні і занурювальні перетворювачі кондуктометрів, *pH*-метрів. Хоча при цьому відсутні перешкоди, викликані транспортуванням і підготовкою проби, проте і в цьому випадку можливе отримання неточних результатів вимірювання. Вони виникають через неоднорідність складу рідини по висоті резервуара або перерізу трубопроводу. Останнє найімовірніше при ламінарному русі потоку, ніж при турбулентному. Наявність температурного градієнта по довжині і висоті резервуара, розміщення перетворювачів поблизу точок введення потоків також може бути причиною відхилень показів від дійсних значень вимірюваних величин. Усе зазначене поширюється на правила установки відбірних пристроїв, за допомогою яких аналізована рідина виводиться із трубопроводу або резервуара. Оскільки параметри і склад рідин, що відбираються, можуть бути найрізноманітнішими, набір існуючих допоміжних пристроїв забезпечує зниження температури і тиску, очищення проби від механічних домішок, створення сталої витрати.

Відбірні пристрої. Для відбору проби гомогенного середовища, яке рухається у трубопроводі, застосовується трубчастий зонд, схема якого для відбирання проби перегрітої пари наведена на рис. 9.22 *а*. Трубка із скосом 45° назустріч потоку має глибину занурення до 20 мм. Зі збільшенням глибини занурення зростають механічні зусилля, що діють із боку потоку на зонд.

За необхідності усереднення проби по перерізу трубопроводу використовуються щілинні зонди (рис. 9.22 *б*). Відбирання здійснюється за допомогою отворів у трубці, їх загальний переріз становить половину перерізу трубки зонда. Для відбирання показної проби швидкості руху середовища у зонді і у трубопроводі повинні бути однаковими. Під час аналізу складу насиченої пари відбирання необхідно виконувати у такому перерізі трубок, де не виявляється ефект сепарації вологи стінками. Ця вимога пояснюється тим, що концентрації домішок у паровій і рідкій фазах різні і необхідно відбирати усереднену пробу.

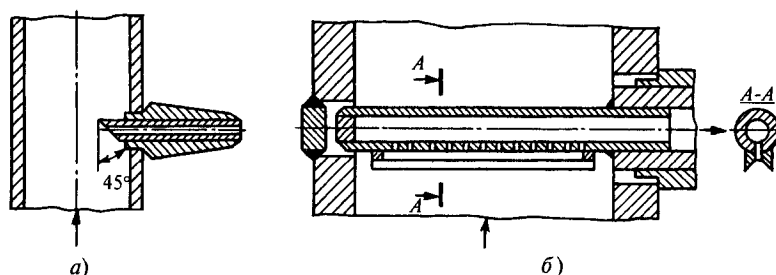


Рисунок 9.22 – Схема трубчастого (*а*) і щілинного (*б*) зондів

Перерізами для відбирання вибираються ділянки трубопроводів на виході із барабанів парогенераторів, сепараторів або перерізи із високими швидкостями руху пари, де ефект сепарації вологи стінками не спостерігається. Для отримання штучної високої швидкості руху пари у місці розташування зонда використовуються труби Вентурі. Зонд встановлюється після звуженої частини труби, де вологість пари вирівнюється за перерізом у результаті відривання плівки вологи від стінок трубопроводу і подрібнення краплин. Швидкість проби у зондах для насиченої пари також повинна збігатися зі швидкістю руху пари у трубопроводі.

Для первинного відділення від аналізованої рідини механічних домішок використовуються сітчасті фільтри, які встановлюють перед відбірною трубкою. Для періодичного очищення сітки передбачається можливість пропускання через неї зустрічно спрямованого потоку. Лінії, через які проба з відбірного пристрою надходить до допоміжних пристроїв і в аналізатор, не повинні мати горизонтальних ділянок, щоб у них не збирався шлам, газу. Мінімальний кут нахилу трубок у бік продувального вентиля або відстійника повинен бути не менше 10° .

Матеріал ліній визначається складом аналізованої речовини. Так, проходження процесів корозії у лініях може зменшити концентрацію кисню в пробі порівняно із первинною водою. У подібних випадках лінії виготовляють із корозійно стійких матеріалів. Для ліній аналізаторів рідин в основному використовуються безшовні жорсткотягнуті і холоднокатані труби із сталі 10 або безшовні з нежавіючої сталі із зовнішнім діаметром (14 – 16) мм.

При аналізі концентрації розчинених у воді або конденсаті газів має бути унеможливлений контакт проби з атмосферою. Наявність контакту може призвести до похибок в оцінюванні pH і електропровідності за рахунок десорбції CO_2 і NH_3 у повітря.

Пристрої для підготовки проби. Для зниження тиску проби використовують набори дросельних шайб, трубки з малим внутрішнім діаметром – ламінарні дроселі, регулювальні вентиля. При аналізі пари на вміст кремнієвої кислоти холодильники повинні розміщуватися перед дроселем, оскільки при зниженні тиску спостерігається виділення кремнієвої кислоти, і в аналізаторі надходить збіднена проба. Таким чином, результати аналізу можуть залежати від взаємного розміщення допоміжних пристроїв, що необхідно враховувати при їх компонуванні.

Для зниження температури проби використовуються змійовикові протиструминні холодильники з витратою охолоджувальної води до

300 л/год. До пристроїв підготовки проби можуть входити сепаратори для видалення розчинених газів і різного роду фільтри для видалення механічних домішок. Так, при вимірюванні питомої електропровідності конденсату, що містить розчинений аміак і гідразин, використовують передвключений *H*-катіоновий фільтр. У кондуктометричних киснемірах застосовується передвключений фільтр змішаної дії.

При відбиранні проб рідин або пари, які перебувають під тиском, утворювачів витрати не вимагається, оскільки середовища рухаються самопливом, і виконується лише стабілізація їх витрати унаслідок використання посудин із перетіканням, які називають напірними.

В аналізаторах рідин використовуються різні утворювачі витрати: діафрагмові, ротаційні, перистальтичні та інші. Візуальний контроль за сталістю витрати, як правило, здійснюється ротаметрами.

На технологічних об'єктах застосовуються два способи розміщення аналізаторів. В одному випадку аналізатори розміщуються на мінімальній відстані від точок відбирання проб, що забезпечує мале запізнювання і зменшення похибок, зумовлених передачею проби по довгих лініях. При цьому прилади знаходяться у різних точках технологічних об'єктів, на них впливають змінні зовнішні чинники, їх обслуговування є більш трудомістким.

В іншому випадку, враховуючи складність аналізаторів та їх високі вимоги до умов і рівня експлуатації, прилади розміщують у спеціальному приміщенні із регульованим мікрокліматом. При цьому використовуються проточні первинні перетворювачі й автоматизовані системи підготовки проби. Це підвищує надійність і якість роботи приладів, спрощує їх обслуговування, хоча первинні витрати на установку приладів зростають. На електростанціях прилади хімічного контролю пароводяного тракту енергоблоків, як правило, розміщені в окремому приміщенні. Наявність у мікропроцесорних аналізаторах інтерфейсів типу RS-232 і 118 – 485 дозволяє створювати системи хімічного контролю, інтегровані в локальні мережі електростанцій.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Чим зумовлений вплив температури на покази кондуктометрів?
2. Яким струмом живиться первинний перетворювач кондуктометрів і чому?
3. Які первинні перетворювачі кондуктометрів ви знаєте?
4. Чи можна за допомогою кондуктометра виміряти концентрацію іонів жорсткості у воді водоймища?

5. Чим зумовлена чутливість робочого скляного електрода до концентрації іонів водню у розчині?
6. Які вимоги до характеристик допоміжного електрода?
7. Поясніть наявність ізопотенційної точки у градувальних характеристиках електродної системи *pH*-метра.
8. Які особливості вторинних приладів, що вимірюють сигнал електродної системи *pH*-метра?
9. Яке призначення іономірів?
10. Принцип дії автоматичного колориметра.
11. Яким чином у фотоколориметрах враховується вплив забруднення вимірювальної кювети?
12. У чому суть амперометричного методу вимірювання розчинених у воді кисню і водню?

10 ВИМІРЮВАННЯ ГУСТИНИ

10.1 Загальні відомості

Вимірювання густини здійснюється з метою управління хіміко-технологічними процесами і виконання операцій обліку кількості сировини, палива, реагентів і готової продукції.

Густиною ρ речовини називають фізичну величину, яка визначається відношенням маси m речовини до займаного нею об'єму V , $\left[\frac{\text{од.маси}}{\text{од.об'єму}} \right]$:

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (10.1)$$

Питомим об'ємом v речовини називають фізичну величину, яка визначається відношенням об'єму речовини V до її маси m , $\left[\frac{\text{од.об'єму}}{\text{од.маси}} \right]$:

$$v = \frac{V}{m}. \quad (10.2)$$

Питомий об'єм і густина взаємозв'язані співвідношенням

$$v = \frac{1}{\rho}. \quad (10.3)$$

Питомою вагою γ речовини називають фізичну величину, яка визначається відношенням ваги P речовини до займаного нею об'єму V , $\left[\frac{\text{од.сили}}{\text{од.об'єму}} \right]$:

$$\gamma = \frac{P}{V}. \quad (10.4)$$

Питома вага і густина зв'язані співвідношенням

$$\gamma = \rho \cdot g = \frac{m \cdot g}{V}, \quad (10.5)$$

де g – прискорення вільного падіння.

У Міжнародній системі одиниць вимірювань СІ матимемо: $\rho = \left[\text{кг} / \text{м}^3 \right]$;
 $v = \left[\text{м}^3 / \text{кг} \right]$; $\gamma = \left[\text{Н} / \text{м}^3 \right]$.

Відносна густина рідкої речовини є відношенням її густини, узятої при нормальній температурі 20°C , до густини дистильованої води при температурі 4°C і позначається як ρ_4^{20} .

Відносна густина газу виражає відношення його густини до густини сухого газу, узятото за нормальних технічних умов (температура $T_n = 293,15\text{K}$ ($t_n = 20\text{ }^\circ\text{C}$), тиск $p_n = 760\text{мм рт. ст.} = 101325\text{Па}$).

Густина рідин і газів зменшується зі збільшенням температури. Густина газів збільшується зі збільшенням тиску, густина рідини практично не залежить від тиску. Винятком є вода, в якій густина при нагріванні від 0 до 4 $^\circ\text{C}$ збільшується.

При фазових перетвореннях речовини густина змінюється стрибкоподібно, причому при переході з рідкого стану у твердий густина, як правило, зростає; аномалія спостерігається лише у воді і чавуну, густина яких зменшується при переході у твердий стан.

Залежність густини ρ_t рідин і твердих тіл від температури t виражається рівнянням

$$\rho_t = \rho_0 \cdot [1 - \beta \cdot (t - t_0)], \quad (10.6)$$

де ρ_0 – густина при температурі t_0 ; β – середній коефіцієнт об'ємного теплового розширення в інтервалі від t до t_0 .

Як правило, величини ρ_0 і β є довідковими даними і наводяться у таблицях теплофізичних властивостей даних рідин.

У пострадянських країнах при складанні довідкових таблиць густину речовини прийнято зазначати при нормальній температурі 20 $^\circ\text{C}$. Як виняток, нормальною температурою морської води вважається 17,5 $^\circ\text{C}$, а кісткового клею 75 $^\circ\text{C}$.

Для перерахунку густини ρ_t рідини, яку вимірюють при деякій температурі t [$^\circ\text{C}$], на густину ρ_{20} при нормальній температурі застосовують формулу

$$\rho_{20} = \rho_t - \alpha \cdot (20 - t), \quad (10.7)$$

де α – стала для даної рідини величина, яка дорівнює тангенсу кута нахилу до осі температур прямої лінії, що виражає залежність густини рідини від температури.

Величина α , що виражається у $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$, є середньою температурною поправкою до значень густини, що показує, на скільки зміниться густина даної рідини при зміні температури на 1 $^\circ\text{C}$. Із деяким наближенням можна записати взаємозв'язок коефіцієнта об'ємного теплового розширення і коефіцієнта α :

$$\alpha = \beta \cdot \rho_0. \quad (10.8)$$

Залежність густини газу від абсолютної температури T і абсолютного

тиску p характеризується такими рівняннями:

– для сухого газу

$$\rho = \rho_n \cdot \frac{p \cdot T_n}{z \cdot p_n \cdot T}; \quad (10.9)$$

– для вологого газу

$$\rho = \rho_n \cdot \frac{(p - \varphi \cdot p_s) \cdot T_n}{z \cdot p_n \cdot T} + \varphi \cdot \rho_s, \quad (10.10)$$

де ρ_n – густина сухого газу за нормальних умов ($T_n = 293,15 \text{ K}$; $p_n = 760 \text{ мм рт. ст.} = 101325 \text{ Па}$);

z – коефіцієнт стиснення, що характеризує відхилення даного реального газу від рівняння стану ідеального газу; для найбільш поширених у природі газів, які прийнято вважати ідеальними (O_2 , N_2 , CO_2 , Ar , H_2 , CO , повітря та ін.) при тисках до 10 МПа беруть $z = 1$;

φ – відносна вологість газу при тиску p і абсолютній температурі T (у частках одиниці);

p_s – тиск сухої насиченої водяної пари при температурі T ;

ρ_s – густина водяної пари при тиску p і абсолютній температурі T .

Для газів як нормуючу величину також використовують *нормальні фізичні умови*: температура $T_{н.ф} = 273,15 \text{ K}$; тиск $p_{н.ф} = 101325 \text{ Па}$ про що обов'язково вказують у записі до величини витрати.

Якщо відома хімічна формула газу і він вважається сухим, його густину при абсолютному тиску p і абсолютній температурі T можна розраховувати за рівнянням стану

$$\rho = \frac{p}{z \cdot R \cdot T}, \quad (10.11)$$

де R – газова стала, $R = \mu R / \mu$.

Тут μR – універсальна газова стала $\mu R = 8314 \text{ кДж} / (\text{кмоль} \cdot \text{K})$; μ – молярна маса газу, $\text{кг} / \text{кмоль}$.

Густина суміші сухих газів може бути знайдена за формулою

$$\rho = r_1 \cdot \rho_1 + r_2 \cdot \rho_2 + \dots + r_i \cdot \rho_i, \quad (10.12)$$

якщо склад суміші заданий за об'ємом, або

$$\rho = \frac{1}{\frac{g_1}{\rho_1} + \frac{g_2}{\rho_2} + \dots + \frac{g_i}{\rho_i}}, \quad (10.13)$$

якщо склад суміші заданий за масою;

тут r_i і g_i – відповідно об'ємна і масова концентрації даного компонента

в суміші (у частках одиниці);

ρ_i – густина (парціальна) компонента при тиску і температурі суміші.

Засоби вимірювань густини називають *густиномірами*, або *денсиметрами* (денситометрами) (від лат. *densus* – густий, щільний і від грецьк. *metréo* – вимірюю).

10.2 Засоби ручного вимірювання густини

10.2.1 Ареометри

Для ручного вимірювання густини рідини застосовують прилад, який має назву *ареометр*. Розрізняють *ареометри сталого об'єму* та *ареометр сталої маси*. За допомогою першого типу можна виміряти густину твердого тіла. Ареометр сталого об'єму занурюється в рідину завжди на однакову глибину, у той самий час як глибина занурення ареометра сталої маси визначається густиною досліджуваної рідини.

Ареометр сталого об'єму складається з пустотілого продовгуватого металевого або скляного корпусу циліндричної форми, який доверху переходить у тонкий стрижень, на кінці якого знаходиться тарілка (чашка) для закладування гирок. Для стійкості корпус має баласт. На стрижні нанесена мітка, до якої повинен занурюватися ареометр при визначеній густині рідини та масі гирок. Густина досліджуваної рідини визначають за загальною масою гирок, накладених у ареометр з метою його занурення до визначеної мітки.

Ареометри сталої маси за своїм призначенням діляться на такі групи:

- 1) для вимірювання густини рідин (називаються *денсиметрами*); шкали денсиметрів градуйовані в одиницях густини;
- 2) для вимірювання концентрації розчинів; шкали цих ареометрів градуйовані у відсотках за об'ємом або масою.

Денсиметри поділяють на:

- 1) денсиметри загального призначення, які слугують для вимірювання густини різних рідин, легших або важчих за воду (водні розчини кислот, лугів, солей тощо);
- 2) нафтоденсиметри (для вимірювання густини нафтопродуктів);
- 3) лактоденсиметри (для вимірювання густини молока та сироватки);
- 4) денсиметри для морської води (для вимірювання солоності);
- 5) урометри (для вимірювання густини сечі);
- 6) акумуляторні денсиметри (для вимірювання густини розчину електроліту в акумуляторах);
- 7) денсиметри АК (для рідин типу кислот).

До ареометрів для вимірювання концентрації розчинів відносять:

а) спиртометри – для вимірювання міцності (концентрації) водно-спиртових розчинів, яка визначається процентним (за об'ємом) вмістом безводного спирту у розчині;

б) цукрометри – для визначення процентного (за масою) вмісту сухих речовин у цукрових розчинах;

в) клейоміри – для визначення концентрації клейових розчинів, виражених процентним (за масою) вмістом кісткового клею у воді;

г) гідрометри – для визначення процентного (за об'ємом) вмісту етиленгліколю у його водному розчині.

Ареометри сталого маси бувають скляними та металевими. У більшості випадків застосовують скляні ареометри, які забезпечують більшу точність вимірювання, оскільки скло має найкращу змочуваність рідинами. Виняток становлять ареометри для вимірювання густин рідких та розплавлених металів, які мають високу температуру. Для цього застосовують ареометри, виготовлені зі сталі з емальованим покриттям або із вольфрамового сплаву. Спиртометри також можуть бути металевими.

Ареометр являє собою симетричне щодо поздовжньої осі подовжене тіло, яке складається із пустотілого корпусу циліндричної (рис. 10.1 а) веретеноподібної (рис. 10.1 б) форми та припаяного до нього у верхній частині стрижня. Стрижень виконаний у вигляді тонкостінної циліндричної трубки круглого перерізу із запаяним кінцем. У зразкових денсиметрів та у спиртометрів із ціною поділки шкали 0,1 % допускається конусність стрижня не більше 0,0005, а в інших спиртометрів, лактоденсиметрів та цукрометрів – не більше 0,001.

Нижня частина ареометра заповнена баластом, який нерухомо закріплений за допомогою в'язкої речовини (смоли, сургучу), яка розм'якає при температурі не нижче 70 °С (для клейомірів – не нижче 87 °С). Баласт призначається для заниження центра ваги ареометра, щоб останній при зануренні у рідину плавав строго у вертикальному положенні та знаходився при цьому у стійкій рівновазі. Баластом, як правило, є дрібна кулька,

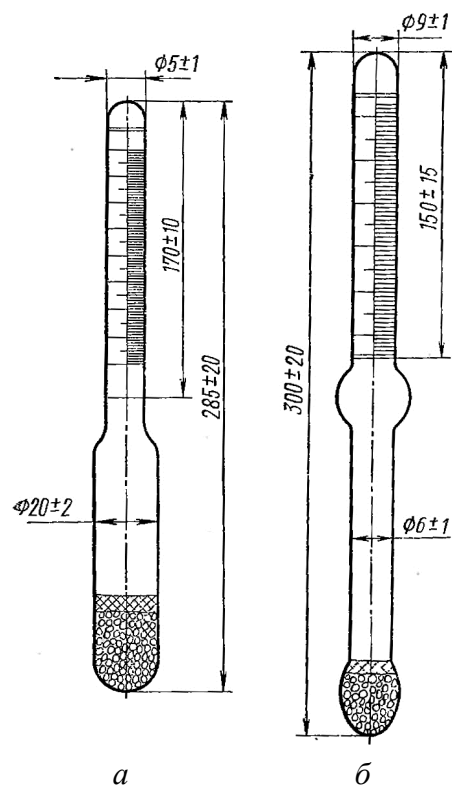


Рисунок 10.1 – Ареометри загального призначення:
а) тип II; б) тип III

металева висічка або ртуть, які повинні бути сухими і чистими. Існують також ареометри з відокремленою баластовою камерою, з'єднаною з нижньою частиною корпусу. Прикладом такого виконання може бути ареометр для вимірювання солоності морської води (рис. 10.2).

До внутрішньої поверхні стрижня ареометра міцно приклеєна прозорим клеєм паперова смужка, як правило, білого кольору із нанесеною на неї шкалою, яка відповідає його призначенню.

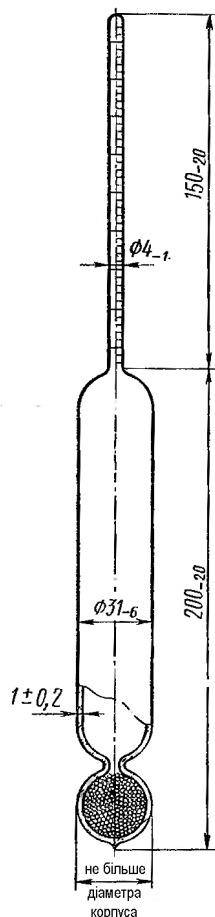


Рисунок 10.2 – Денсиметр для морської води

Денсиметри загального призначення виготовляють у чотирьох виконаннях, серед яких виділяють виконання I – для визначення густини рідин у малих кількостях; виконання II – для визначення густини рідин, важчих від води; виконання III та IV можуть застосовуватися для визначення густини рідин, як легших (IIIа), так і важчих за воду (IIIб, IIIв, IVа, IVб).

Ціна поділки шкали денсиметра встановлюється такими числовими значеннями, взятими з ряду:

а) для денсиметрів – 0,0001; 0,0002; 0,0005; 0,002; 0,005; 0,01; 0,02 г/см³ (або одиниць відносної густини);

б) для ареометрів для визначення концентрації – 0,1; 0,2; 0,5 і 1,0 %.

Ширина штрихів шкали не перевищує 0,2 мм (у зразкових ареометрів та у спиртометрів із ціною поділки шкали 0,1 % – не більше 0,1 мм). Довжина основних штрихів (тобто штрихів, позначених цифрами) становить не менше 1/4 довжини кола у поперечному перерізі стрижня, довжина найменших штрихів – не менше 1/8 довжини кола (для зразкових ареометрів – відповідно 1/2 та 1/4 довжини кола).

Відстань між сусідніми штрихами, як правило, не менша 0,75 мм. У денсиметрів для морської води, акумуляторних денсиметрів, урометрів, спиртометрів, клейомірів та гідрометрів ця відстань становить не менше 1 мм, у цукромірів – не менше 1,2 мм, у лактоденсиметрів – не менше 1,5 мм, у денсиметрів для визначення густини малих кількостей рідини – не менше 0,5 мм.

Деякі типи робочих ареометрів (нафтоденсиметри, лактоденсиметри, цукроміри, клейоміри, спиртометри, гігрометри) виготовляють із вбудованим термометром (рис. 10.3), який дозволяє одночасно з густиною (концентрацією) вимірювати температуру рідини. Рідина, що заповнює резервуар термометра (ртуть, толуол), слугує також частиною баласту ареометра. Резервуар термометра може знаходитися як під основним

баластом ареометра, так і над ним.

Паперова смуга з нанесеною на неї термометричною шкалою міститься або всередині корпусу ареометра (у нафтоденсиметрів, спиртометрів, цукрометрів та гідрометрів), або у верхній (розширеній) частині стрижня (у лактоденсиметрів та клейомірів), оскільки вони призначені для непрозорих рідин.

В основу принципу дії ареометра покладено *закон Архімеда*, згідно з яким при зануренні у рідину на ареометр починає впливати виштовхувальна сила, яка дорівнює вазі витісненої ареометром рідини. Зі збільшеннями глибини занурення ареометра збільшується вага рідини в об'ємі зануреної частини ареометра, тобто зростає виштовхувальна сила. У момент, коли виштовхувальна сила дорівнює вазі всього ареометра, настає рівновага.

Глибина занурення, при якій ареометр переходить у стан рівноваги і починає плавати, залежить від густини рідини: чим більша густина, тим меншою повинна бути глибина занурення ареометра, щоб вага рідини в об'ємі зануреної частини стала такою, що дорівнює вазі ареометра; навпаки, чим меншою є густина рідини, тим більшою буде глибина занурення ареометра.

Таким чином, числові позначення густини на шкалі ареометра повинні знаходитися у зростаючому порядку зверху донизу, тобто штрихи, що відповідають меншій густині, повинні міститися у верхній частині шкали та навпаки. Це саме стосується і ареометрів для вимірювання концентрації розчинів, густина яких прямо пропорційна концентрації; у цих ареометрів (цукрометрів, клеєметрів, гідрометрів) зазначені на шкалі позначення концентрації зростають зверху донизу. Густина водно-спиртових розчинів збільшується зі зростанням міцності розчину, тому на шкалі спиртометра числа зростають знизу догори.

Шкала ареометра нерівномірна: поділки шкали, тобто відстань між двома сусідніми штрихами, поступово збільшуються знизу догори, до кінця стрижня.

Значний вплив на точність вимірювань ареометром чинить наявність *меніска*, який визначається змочуваністю рідиною поверхні ареометра. Більшість рідин добре змочують тверді поверхні, тобто у них сили поверхневого натягу, що відповідають за прилипання рідини до твердої поверхні, перевищують сили тяжіння, що намагаються опустити рідину до її горизонтального рівня. У цьому випадку утворюється вигнутий меніск, який призводить до підняття рівня рідини біля стінок ареометра, що впливає на завищення отриманих результатів. До змочуваних рідин належать,

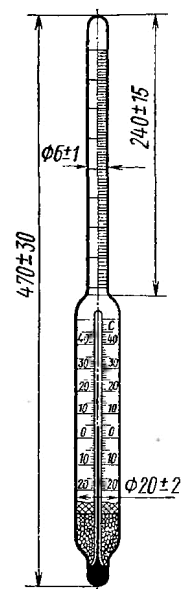


Рисунок 10.3 – Денсиметр із термометром

наприклад, такі найбільш поширені рідини, як вода, спирти, їх розчини, молоко, кислоти, луги тощо. Найбільш характерним прикладом незмочуваної рідини є ртуть. Нафта є прикладом змінних властивостей змочуваності залежно від її складу, особливо за наявності у ній асфальтенів та інших багатовуглецевих вуглеводнів, які призводять до зменшення змочуваності нафти. Леткі низьковуглецеві вуглеводні є змочуваними речовинами. За відсутності змочуваності утворюється випуклий меніск, який приводить до заниження результатів вимірювання. Для звичайності треба додати, що на змочуваність впливають не лише власні якості рідини, але й матеріал поверхні, наявність на ній покриттів або наявність у складі змочуючої рідини поверхнево-активних речовин, що сприяють покращанню змочуваності. Наявність жирного покриття, навпаки, призводить до суттєвого зменшення змочуваності. Щодо впливу матеріалу на змочуваність як приклад можна навести ртуть, яка, як зазначалося раніше, є у більшості випадків незмочуваною, але при контакті із золотом та цинком ртуть поводить себе як змочувана рідина.

Розглянемо вплив меніска на покази ареометра. Як приклад візьмемо вигнутий меніск, оскільки цей випадок є найбільш поширеним.

Меніск являє собою деяку кількість рідини, яка піднімається вздовж стрижня ареометра та утримується балансом сил поверхневого натягу й тяжіння. Загальну масу m меніска знайдемо із рівняння рівноваги

$$m \cdot g = \pi \cdot d \cdot \sigma, \quad (10.14)$$

$$\text{звідки } m = \pi \cdot d \cdot \sigma / g,$$

де d – зовнішній діаметр стрижня ареометра; σ – коефіцієнт поверхневого натягу рідини; g – прискорення вільного падіння.

Ареометр перебуває у рівновазі з рідиною, якщо його вага дорівнює вазі витісненої ним рідини; відповідно вага рідини в об'ємі тієї частини стрижня, яка занурилася під дією меніска, дорівнює вазі меніска. Якщо позначити додаткову зміну показів ареометра за рахунок наявності меніска через h_0 , то, виконавши ряд математичних перетворень, отримаємо

$$h_0 = \frac{4 \cdot \sigma}{d \cdot \rho \cdot g} = \frac{4 \cdot a}{d}, \quad (10.15)$$

де ρ – густина досліджуваної рідини; a – капілярна стала рідини, $a = \sigma / (\rho \cdot g)$.

Отриманою величиною h_0 , вираженою в одиницях густини за шкалою ареометра, можна оцінювати похибку вимірювання густини за рахунок наявності меніска.

Часто ареометри градууються для рідин із капілярною сталою a_1 , а

застосовуються для інших рідин із капілярною сталою a_2 . Очевидно, що навіть якщо ці рідини будуть мати однакову густину, то величини менісків, а отже, і покази ареометра будуть відрізнятися.

Абсолютна похибка, що враховує наявність меніска при визначенні густини ареометром, може бути отримана з рівнянь рівноваги ареометра, записаних для цих двох рідин. Після математичних перетворень та взаємного розв'язання системи цих рівнянь матимемо

$$\Delta_{\kappa} = \frac{\pi \cdot d \cdot \rho^2 \cdot (a_2 - a_1)}{M}, \quad (10.16)$$

де M – маса сухого ареометра, зваженого в повітрі; ρ – покази ареометра при вимірюванні густини рідини з капілярною сталою a_2 ; d – діаметр стрижня біля штриха, який відповідає показам ареометра ρ .

Отримана величина похибки може бути як додатною, так і від'ємною. Знак «мінус» свідчить про завищення отриманого в результаті вимірювання ареометром результату, тобто дійсна густина досліджуваної рідини буде меншою, і навпаки.

Крім капілярності (наявності меніска), на покази ареометра також буде впливати наявність різниці температур $\Delta t = t_0 - t$ між нормованим (тим, при якому відбувалося градування шкали ареометра) t_0 та дійсним t значеннями.

Поправка на зміну температури враховує зміну показів ареометра, яка виникає за рахунок зміни його об'єму внаслідок теплового розширення або стиснення залежно від величини робочої температури t щодо нормованої t_0 .

Поправка на вплив температури може бути розрахована за формулою

$$\Delta'_t = \beta \cdot (t_0 - t) \cdot \rho, \quad (10.17)$$

де β – коефіцієнт об'ємного розширення скла, $\beta = 2,5 \cdot 10^{-5} K^{-1}$.

Нормальною температурою для всіх ареометрів, окрім ареометрів для морської води та клейомірів, вважається $t_0 = 20^\circ C$. Відповідно для ареометрів морської води $t_0 = 17,5^\circ C$, клейомірів – $t_0 = 75^\circ C$.

10.2.2 Гідростатичне зважування

Цей метод належить до вагових методів визначення густини середовища, як і *пикнометричний*.

Принцип визначення густини твердого тіла методом гідростатичного зважування полягає у послідовному зважуванні тіла спочатку у повітрі, а потім у рідині, густина якої відома. Після цього визначають густину тіла ρ_t

при деякій температурі t за формулою

$$\rho_t = \frac{m_1}{m_2 - m_1} \cdot (\rho - D) + D, \quad (10.18)$$

де ρ – густина допоміжної рідини (наприклад, дистильованої води);

D – середня густина повітря під час зважувань;

m_1 – маса тіла, зваженого у повітрі;

m_2 – маса тіла, зваженого у допоміжній рідині.

При визначенні густини рідини цим методом в ній зважують будь-яке тіло, маса і об'єм якого відомі. Як правило, як таке тіло використовують циліндричний скляний поплавець, що має зверху гачок (петлю) для підчеплювання його до вагів. Поплавець виготовляють із термометричного скла з відомим коефіцієнтом теплового розширення. Всередині поплавця, у нижній його частині, знаходиться баласт.

Гідростатичне зважування залежно від необхідної точності виконують на технічних (класу 1), аналітичних або зразкових вагах.

При гідростатичному зважуванні необхідно уникати коливань температури усіх контактуючих середовищ, можливих вібрацій від іншого суміжного обладнання.

Гідростатичне зважування найчастіше виконують із застосуванням *гідростатичних вагів* або *вагів Мора – Вестфаля* (рис. 10.4). Цей пристрій є простим за конструкцією, зручним у використанні, а також дозволяє швидко отримувати результат. Для вимірювання необхідна незначна кількість рідини.

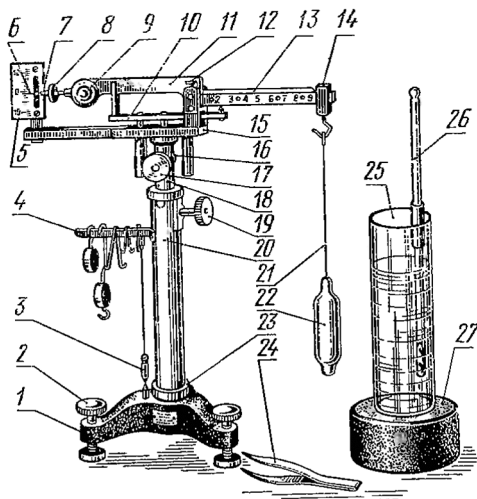


Рисунок 10.4 – Гідростатичні ваги

Гідростатичними вагами можна безпосередньо вимірювати густина рідин, в'язкість яких при температурі вимірювання не перевищує $10^{-3} \text{ м}^2 / \text{с}$, а також густини твердих тіл.

Ваги складаються з опорної частини, коромисла, поплавця та набору гир-контейнерів.

В опорній частині вагів є стійка 20, основа 1 якої має одну нерухому 23 і дві гвинтові 2 ніжки для встановлення вагів у правильне положення за виском 3.

Усередині стійки знаходиться висувний стрижень 18, який фіксується у необхідному положенні рукояткою 19. Стрижень несе на собі вилку 15, в якій закріплені опорна подушка коромисла і нерухомий показчик рівноваги у вигляді дзеркальної шкали 5 з нулем посередині.

Коромисло *11* являє собою нерівноплечий важіль, який опирається призмою *12* на подушку у вилці. На правому кінці коромисла закріплена вантажоприймальна призма, до якої підвішена сережка *14* з гачком. До гачка на константановому дроті *21* діаметром *0,1 мм* та довжиною *100 мм* підвішений скляний поплавець *22*. На лівому кінці коромисла знаходиться нерухома противага *9*, що зрівноважує у повітрі коромисло з поплавцем, рухомий покажчик рівноваги – стрілка *6* і нарізним наконечником *7* із гайкою *8* для регулювання рівноважного стану коромисла щодо «нульової» поділки вагів.

У праву частину коромисла закладено полотно *13*, на якому нанесена шкала із *10* однакових поділок. Початок шкали збігається із робочим ребром опорної призми коромисла, а кінець – із робочим ребром вантажоприймальної призми, до якої підвішена сережка. Проміжні відмітки шкали утворені перпендикулярними надрізами, пронумерованими у послідовному порядку цифрами від *1* до *9*; на ці надрізи навішують гирі-рейтери, щознімають із заглиблень на полиці *4*, прикріпленій до стійки.

До набору гир-рейтерів входять п'ять гир – дві великі і три малі. Маса кожної великої гирі умовно взята такою, що дорівнює одиниці, маса інших гир відповідно дорівнює *0,1; 0,01; 0,001*.

Ваги оснащені ізолювальним пристроєм у вигляді скоби *10* на штоці, який пересувається у вертикальному напрямку всередині стрижня *18* за допомогою рукоятки *17* та фіксується ексцентриком *16*.

До вагів додаються скляний стакан *25* об'ємом *100 см³* для досліджуваної рідини; термометр *26* у спеціальній гільзі, прикріплений до верхнього краю хімічного стакана; підставка *27* під стакан; пінцет *24* для навішування гир і запас дроту.

Принцип дії гідростатичних вагів базується на законі Архімеда. Поплавець, підвішений у сережці коромисла і такий, що зрівноважує його у повітрі, при зануренні у рідину втрачає деяку частину власної ваги, що дорівнює вазі рідини в об'ємі поплавця. При цьому порушується рівновага коромисла. Для відновлення рівноваги на коромисло підвішують відповідні гирі-рейтери.

Зрівноважуючи коромисло при зануренні поплавця спочатку у дистильовану воду, густина якої відома, а потім у досліджувану рідину, можна визначити густину цієї рідини.

Під час виконання вимірювань на поверхнях поплавця і дроту не повинно бути пухирців повітря. Поплавець не повинен торкатися дна та стінок стакана.

10.2.3 Пікнометри

Пікнометричний метод визначення густини рідини базується на зважуванні рідини, що займає у пікнометрі відомий об'єм, знайдений ваговим способом.

Порівняно із гідростатичним зважуванням пікнометричний метод має ряд переваг:

1) висока точність вимірювання (до 10^{-5} г/см^3) зумовлена тим, що зважування виконують високоточними вагами без застосування будь-яких додаткових засобів, що зменшують чутливість вагів;

2) мала площа вільної поверхні рідини у пікнометрі практично виключає випаровування рідини та поглинання вологи з повітря;

3) метод допускається застосовувати для вимірювання густини як легких, так і в'язких речовин;

4) при вимірюванні необхідна незначна кількість рідини ($(1-100) \text{ см}^3$);

5) операції термостатування рідини у пікнометрі та подальше зважування виконуються роздільно, що дозволяє зменшити похибку вимірювання.

У зв'язку із цим пікнометричний метод знайшов широке застосування при виконанні точних вимірювань у наукових дослідженнях.

Існує багато різновидів пікнометрів, а їх застосування визначається типом визначуваного середовища, а також допустимою похибкою вимірювання. Чим більшою є місткість пікнометра, тим меншою буде похибка зважування, але одночасно збільшиться похибка, пов'язана із нерівномірністю розподілу температури по об'єму рідини. Найкращі результати отримують з об'ємом пікнометра $(25-100) \text{ см}^3$.

Найбільшого поширення набули скляні колбоподібні пікнометри кулеподібної та циліндричної форми, які закриваються або глухим притертим корком (рис. 10.5 а і в), або притертим корком із капілярним отвором (рис. 10.5 б).

Пікнометри з міткою, нанесеною на вставній горловині, застосовують для визначення густини твердих тіл та в'язких рідин (рис. 10.5 в). Мітка на горловині пікнометра відповідає його номінальній ємності; до цієї мітки і заповнюють пікнометр. Пікнометри з міткою, які застосовуються для рідин (рис. 10.5 а), можуть мати номінальну місткість 1; 2; 3; 5; 10; 50 і 100 см^3 , для твердих тіл (рис. 10.5 в) – 10; 25 і 50 см^3 .

Верхня частина горловини (під корком) пікнометра з міткою виконується розширеною. В утворену розширену порожнину заходить частина рідини у тому випадку, коли об'єм її збільшується у результаті

підвищення температури після заповнення пікнометра до мітки.

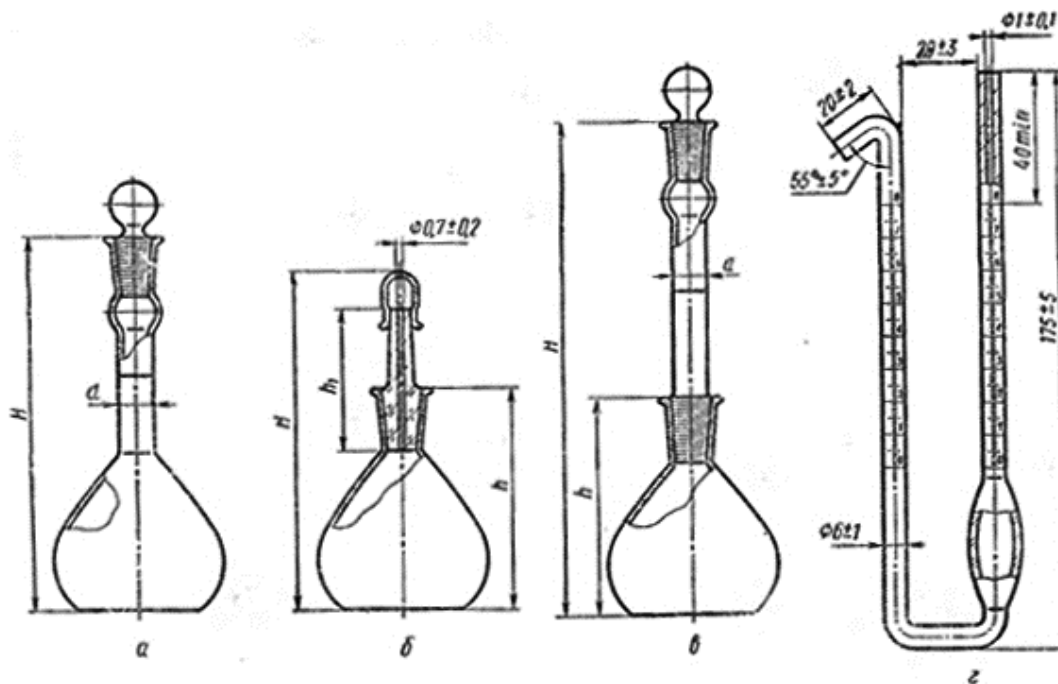


Рисунок 10.5 – Скляні пікнометри:
а), б), в) колбоподібні та кулеподібні; г) U-подібний

Пікнометр із капілярним отвором забезпечує більш точні результати вимірювань. Діаметр отвору $(0,7 \pm 0,2) \text{ мм}$. Місткість такого пікнометра визначається верхньою межею капілярного отвору.

При вимірюванні густини дуже легких рідин застосовують U-подібний капілярний пікнометр, зображений на рис. 10.5 г. Цей пікнометр являє собою трубку із капілярним отвором діаметром від 0,9 до 1,0 мм. У правому коліні пікнометра наявне розширення. Кінчик лівого коліна відігнутий. На обох колінах нанесена рівномірна шкала із 80 поділками із кроком 1 мм. Номінальна місткість U-подібного пікнометра визначається за нижньою його частиною між нульовими відмітками і становить 0,5; 1 і 3 см^3 .

Для дуже малих об'ємів рідини (близько 1 см^3) гарні результати отримують за допомогою піпеткоподібного пікнометра (пікнометра Оствальда-Шпренгеля), який являє собою U-подібну трубку із відтягнутими і відігнутими під прямим кутом кінцями. Обидва кінці закриті притертими ковпачками. Пікнометр заповнюють рідиною до отвору на одному кінці та до мітки – на іншому.

Для вимірювання густини газів застосовують кулеподібні пікнометри місткістю 100 та 200 см^3 (ГОСТ 22524-77. Пікнометри скляні. Технічні умови).

Методика визначення густини рідини за допомогою пікнометра полягає у виконанні трьох вимірювань ваги: 1) порожнього пікнометра разом із корком; 2) пікнометра, заповненого дистильованою водою до заданого рівня;

3) пікнометра, заповненого досліджуваною рідиною до того самого рівня). Перші два зважування дозволяють визначити місткість пікнометра, а перше і третє – масу досліджуваної рідини у об'ємі пікнометра. За отриманими даними визначають густину рідини.

Густина рідини ρ_t при температурі t , визначена за допомогою пікнометричного методу, може бути знайдена з формули:

$$\rho_t = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \cdot (\rho - D) + D, \quad (10.19)$$

де ρ – густина допоміжної рідини (наприклад, дистильованої води);

D – середня густина повітря під час зважувань;

m_1 – маса чистого пікнометра, зваженого у повітрі;

m_2 – маса пікнометра з допоміжною рідиною (наприклад, дистильована вода);

m_3 – маса пікнометра з досліджуваною рідиною.

При визначенні густини твердого тіла пікнометричним методом також виконують три зважування: 1) досліджуваного тіла у повітрі; 2) пікнометра, заповненого дистильованою водою або будь-якою іншою допоміжною рідиною з відомою густиною; 3) пікнометра, заповненого тією самою рідиною із зануреним у неї досліджуваним тілом, причому в обох випадках рідину наливають до однакового рівня.

Густина твердого тіла ρ_t при температурі t , визначена за допомогою пікнометричного методу, може бути знайдена з формули

$$\rho_t = \frac{M \cdot \rho - (m_2 - m_1) \cdot D}{M - (m_2 - m_1)}, \quad (10.20)$$

де M – маса тіла, зваженого у повітрі;

ρ – густина допоміжної рідини (наприклад, дистильованої води);

D – середня густина повітря під час зважувань;

m_1 – маса пікнометра з допоміжною рідиною;

m_2 – маса пікнометра з рідиною та зануреним у неї тілом.

При вимірюваннях густини пікнометричним методом необхідно, щоб температури допоміжної рідини, пікнометра, визначуваного тіла та оточуючого повітря були однаковими і сталими.

При використанні пікнометрів точність вимірювання значною мірою залежить від чистоти поверхні скла всередині та зовні приладу. Тому перед вимірюваннями пікнометр ретельно промивають спочатку хромовою сумішшю, потім дистильованою водою і лише після цього – ректифікованим етиловим спиртом. Якщо пікнометр забруднений мастилом, його спочатку промивають розчинником (наприклад, уайт-спіритом, бензином тощо), а

лише потім зазначеними рідинами. Після промивання пікнометри просушують.

При вимірюванні густини твердих тіл, розміри яких більші від внутрішнього діаметра горловини пікнометра, та при неможливості їх подрібнення як пікнометр застосовують циліндричний скляний стакан із притертою до його країв плоскою скляною кришкою. Стакан заповнюють відповідною допоміжною рідиною так, щоб при насуванні кришки на площину країв стакана рідина «зрізалася» і під кришкою не залишалося повітряних бульбашок. Після цього відповідно до методики виконання вимірювання виконується вимірювання маси стакана з допоміжною рідиною, маси твердого тіла у повітрі. Для цього необхідно занурити тіло у рідину та повторно виконати вимірювання маси стакана з рідиною й тілом.

10.3 Засоби автоматичного вимірювання густини

Для автоматичного вимірювання густини застосовуються густиноміри вагові, поплавцеві, гідроаеростатичні, гідрогазодинамічні, радіоізотопні, акустичні, вібраційні та ін.

Вагові, або пікнометричні, густиноміри. Принцип дії цих механічних густиномірів полягає у безперервному зважуванні сталого об'єму аналізованої речовини у деякій ємності або трубопроводі, тобто густина визначається через питому вагу. Найбільш поширений густиномір рідин, схема якого показана на рис. 10.6 а.

Чутливим елементом густиноміра є U-подібна трубка 7 з нержавіючої сталі, з'єднана через тягу 3 із важелем 4. Кінці трубки 7 через сильфони 2 з'єднані із нерухомими патрубками 7, через які подається аналізована рідина. Наявність сильфонів 2 дозволяє трубці 7 обертатися довкола осі $\theta - \theta$. При збільшенні густини рідини збільшується маса трубки з рідиною, що через важіль 4 передається до механоелектричного або механо пневматичного перетворювача 5, побудованого за принципом компенсації сил, вихідний сигнал $S_{\text{вих}}$ якого пропорційний зміні густини аналізованої рідини. Противага 6, закріплена на важелі 4, слугує для зрівноваження моменту сил, що створюється трубкою 7 з рідиною при вибраній нижній межі вимірювання густини. Пристрій 8 слугує для автоматичного введення поправки до сигналу густиноміра залежно від температури аналізованої рідини, яку цей пристрій безперервно вимірює.

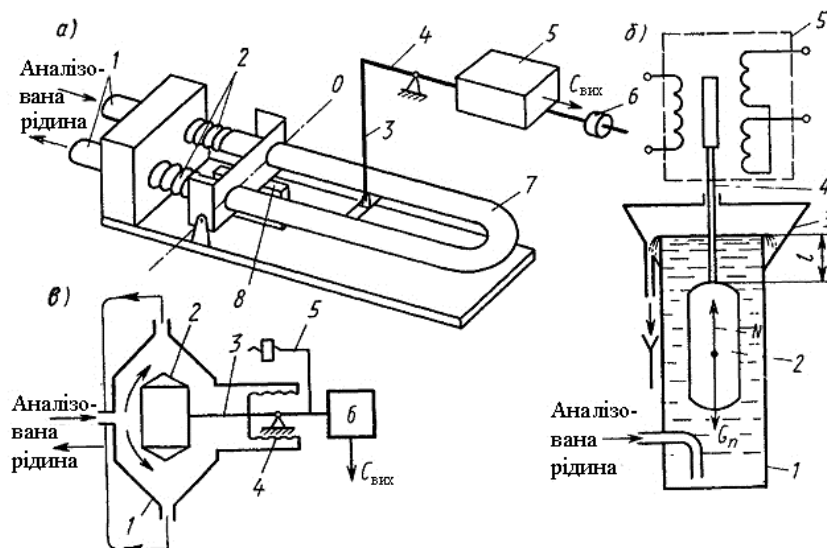


Рисунок 10.6 – Схеми вагових і поплавцевих густиномірів рідин

Густиноміри цієї конструкції дозволяють вимірювати густину в інтервалі $(0,5 - 2,5) \text{ г/см}^3$. При цьому може бути встановлений діапазон вимірювань $(0,05 - 0,3) \text{ г/см}^3$ у будь-якій частині зазначеного інтервалу. Максимальна температура аналізованої рідини $100 \text{ }^\circ\text{C}$, клас точності $1 - 1,5$.

Поплавцеві, або ареометричні, густиноміри. Принцип дії цих механічних густиномірів базується на безперервному вимірюванні виштовхуючої (підймальні) сили, що діє на поплавок, частково або повністю занурений в аналізовану речовину.

На рис. 10.6 б показана схема поплавцевого густиноміра рідин із частково зануреним поплавцем 2, який розміщений у ємності 1. Через цю ємність безперервно прокачується аналізована рідина. За рахунок переливання в ємності підтримується сталий рівень. Аналізована рідина відводиться з густиноміра через збірник 3. При зміні густини рідини змінюється ступінь занурення поплавця 2 в ємності. Досягнення положення рівноваги сил N і G_n забезпечується зміною довжини l стрижня 4, зануреного у рідину. Переміщення поплавця 2 перетворюється в електричний сигнал за допомогою диференціального трансформатора 5.

Вага поплавця 2 зі стрижнем 4 (у повітрі) G_n і виштовхувальна сила N , що діє на поплавець, описуються виразами:

$$G_n = m \cdot g ; \quad (10.21)$$

$$N = (V + l \cdot S) \cdot \rho \cdot g , \quad (10.22)$$

де m – маса поплавця і стрижня; V – об'єм поплавця; l – довжина ділянки стрижня, зануреного в рідину; S – площа поперечного перерізу стрижня.

При рівності сил G_n і N з урахуванням дії на стрижень на поверхні розділення фаз сил поверхневого натягу матимемо

$$l = (m - V \cdot \rho + A) / (S \cdot \rho), \quad (10.23)$$

де A – стала для даної рідини величина, що враховує поверхневий натяг.

Довжина l , а отже, і сигнал диференціального трансформатора 5 однозначно пов'язані з густиною рідини. Масу m підбирають залежно від діапазону вимірювань.

Густиноміри з частково зануреним поплавцем мають високу чутливість, що дозволяє здійснювати вимірювання густини у вузькому діапазоні (усього $(0,005 - 0,01) \text{ г/см}^3$) із похибкою $\pm (1,5 - 3) \%$ від діапазону вимірювання.

На рис. 10.6 в показана схема поплавцевого густиноміра рідин із повністю зануреним поплавцем 2. Останній розміщений у камері 7, через яку прокачується аналізована рідина. Зміна виштовхувальної сили, що діє на поплавець, за інших сталих умов пропорційна зміні густини рідини. Поплавець закріплений на важелі 3, герметичність виведення якого з камери 1 забезпечується сільфоном 4. Момент на важелі 3, який створюється виштовхувальною силою при значенні густини, яке відповідає нижній межі вимірювання, врівноважується моментом, який створюється противагою 5. Зміна виштовхувальної сили перетвориться перетворювачем сили 6 в уніфікований пневматичний або електричний сигнал $C_{\text{вих}}$.

Густиноміри цієї конструкції дозволяють вимірювати густину від 0,5 до $1,2 \text{ г/см}^3$. Діапазон вимірювань може бути встановлений від 0,05 до $0,2 \text{ г/см}^3$ у будь-якій частині зазначеного інтервалу. Температура аналізованої рідини може становити $(-5 - +110) \text{ }^\circ\text{C}$. Клас точності 1.

Гідро- і аеростатичні густиноміри. Принцип дії цих механічних густиномірів базується на залежності тиску стовпа аналізованої рідини або газу від густини цих середовищ:

$$p = \rho \cdot g \cdot H, \quad (10.24)$$

де H – висота стовпа рідини або газу.

На рис. 10.7 а подано схему гідростатичного густиноміра рідини. Аналізована рідина безперервно прокачується через камеру 1, в якій на опорній платі 9 розміщені вимірювальні сільфони 2 і 4. Відстань між цими сільфонами по висоті становить H , тому на сільфон 2 діє більший гідростатичний тиск, ніж на сільфон 4. Зазначені сільфони і сільфон 2 заповнені допоміжною рідиною. Сільфон 3 слугує для температурної компенсації і, по суті, є рідинним манометричним термометром. Різниця сил на сільфонах 2 і 4, що виникає за рахунок різниці гідростатичних тисків на них, створює на вимірювальному важелі 8 обертальний момент, який через

важіль 7 передається у перетворювач сили 5 у вигляді уніфікованого електричного або пневматичного сигналу. Мембрана 6 забезпечує герметичне виведення важеля 7.

Основні технічні характеристики: діапазон вимірювань від (0 – 0,05) до (0 – 0,5) г/см³; максимальна температура рідини 200 °С; клас точності 1.

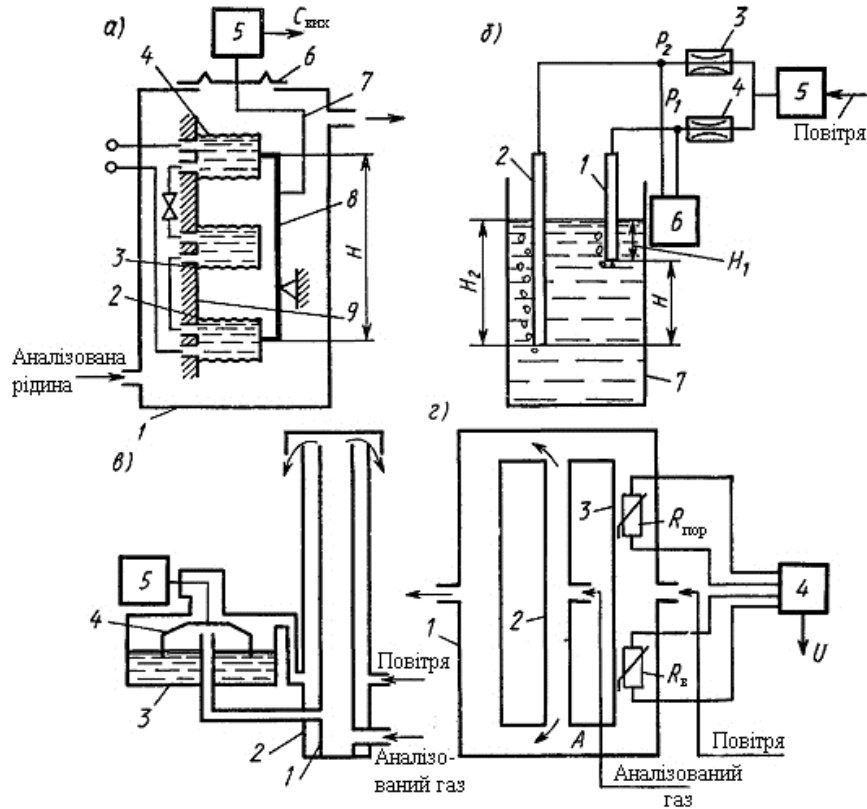


Рисунок 10.7 – Схеми гідро- і газостатичних густинимірів рідин і газів

Схема гідростатичного густиниміра, принцип дії якого базується на вимірюванні гідростатичного тиску шляхом продування стиснутого газу, показана на рис. 10.7 б. Такі густиниміри використовуються у хіміко-технологічних процесах для вимірювання густини безпосередньо у технологічних апаратах. В апараті 7 встановлені трубки 1 і 2 з різною глибиною занурення. Газ (як правило, повітря) від регулювальника витрати 5 надходить до пневматичних дроселів 3 і 4, а потім до трубки 2 і 7. Через відкриті торці трубок газ барботує через рідину. Тиск газу у трубках 1 і 2 визначається гідростатичним тиском стовпа рідин висотою H_1 і H_2 . Різниця тисків у трубках вимірюється дифманометром 6 із пневматичним або електричним вихідним сигналом. Цей перепад визначається виразом

$$\Delta p = p_2 - p_1 = \rho \cdot g \cdot H_2 - \rho \cdot g \cdot H_1 = \rho \cdot g \cdot (H_2 - H_1) = \rho \cdot g \cdot H . \quad (10.25)$$

Наявність двох трубок дозволяє виключити вплив на результат вимірювання можливих змін рівня рідини в апараті.

Схема значно поширеного аеростатичного густиниміра газів показана на

рис. 10.7 в. У цьому густинімірі аналізований газ і повітря прокачуються при сталих тисках відповідно через вертикальні трубки 7 і 2, внутрішні порожнини яких утворюють стовпи аналізованого газу і повітря однакової висоти. Різниця аеростатичних тисків цих стовпів вимірюється за допомогою високочутливого дзвонового дифманометра 3, що працює за принципом зрівноваження за рахунок зміни виштовхувальної сили. Переміщення дзвона 4 дифманометра за допомогою перетворювача 5 перетворюється в уніфікований електричний або пневматичний сигнал.

Густинімір забезпечує вимірювання густини від 0 до 3 кг/м³ із діапазоном вимірювання від 0,2 до 1 кг/м³ і з похибкою ± 0,01 кг/м³.

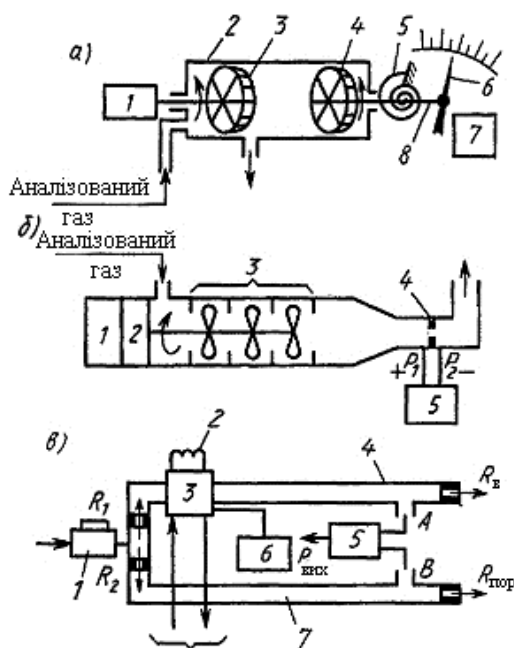


Рисунок 10.8 – Схеми газодинамічних густинімірів газів

3, яка приводиться в рух синхронним двигуном 1, підводиться кінетична енергія. Потік газу надходить до турбіни 4 і створює на ній за рахунок своєї кінетичної енергії обертальний момент, який визначається за формулою

$$M = k \cdot \rho \cdot \omega^2 \text{ або } \Delta p = p_1 - p_2 = k \cdot \rho, \quad (10.26)$$

де k – сталий коефіцієнт; ω – частота обертання турбіни 3.

Під дією цього моменту турбіна 4 обертається, а момент, що виникає на ній, зрівноважується моментом, що створюється на осі 8 плоскої пружини 5. Кут повороту осі 8 і стрілки 6 за шкалою пропорційний густині газу. За допомогою перетворювача 7 кут повороту перетвориться в уніфікований сигнал. Клас точності цього густиніміра 0,5 – 1,5 (залежно від діапазону вимірювання).

В основу принципу дії густинімірів (рис. 10.8 б, в) покладений ефект

Гідро- і газо(аеро)динамічні густиніміри.

Принцип дії цих механічних густинімірів базується на наданні потоку аналізованої речовини додаткової кінетичної енергії і на вимірюванні параметрів, що характеризують ефекти, які виникають при цьому впливі. В основному ці густиніміри застосовуються для вимірювання малої за значенням густини газів.

На рис. 10.8 показані спрощені схеми газодинамічних густинімірів газів. У густинімірі (рис. 10.8 а) потоку аналізованого газу, який проходить через камеру 2, турбіною

виходу газу через діафрагму. У густинімірі, зображеному на рис. 10.8 б, аналізований газ прокачується зі сталою об'ємною витратою \dot{V} , що створюється триступеневим вентилятором 3, через діафрагму 4 діаметром (0,5 – 1) мм. Вентилятор приводиться в обертальний рух через магнітну муфту 2 синхронним двигуном або пневматичною турбіною 1.

Перепад тисків (50 – 500 Па), що виникає на діафрагмі 4, вимірюється дифманометром 5 з уніфікованим сигналом. Його також можна визначити за формулою

$$\Delta p = p_1 - p_2 = 0,5 \cdot [\dot{V} / (\alpha \cdot z \cdot F_0)]^2 \cdot \rho, \quad (10.27)$$

де α – коефіцієнт витрати діафрагми; z – коефіцієнт стискуваності газу; F_0 – площа прохідного перерізу діафрагми.

Усі ці величини є або відомими, або можуть бути визначені, знаючи витрату середовища та його термічні параметри T і p .

Густинімір здатний вимірювати густину газу у нормальних і робочих умовах. Клас його точності 1.

Вібраційні густиніміри. Принцип дії цих механічних густинімірів базується на залежності параметрів пружних коливань (вібрація), що повідомляються камері із аналізованою речовиною або тілу, розміщеному в ній, від густини цієї речовини. Як правило, як параметр пружних коливань використовується частота власних коливань резонатора, що знаходиться в режимі автоколивань. Резонатори вібраційних густинімірів виконують у вигляді трубки, пластини, стрижня, струни, камертона тощо. Частота n власних коливань резонатора, заповненого або такого, що знаходиться у аналізованому середовищі, може бути описана виразом

$$n = n_0 \cdot \sqrt{1 / (1 + k \cdot \rho)}, \quad (10.28)$$

де n_0 – частота коливань резонатора при початковому значенні густини аналізованого середовища; k – стала, що залежить від конструкції резонатора.

Конструктивно розрізняють проточні та занурювальні вібраційні густиніміри. У перших аналізована речовина проходить через внутрішню порожнину резонатора, а у других резонатор розміщується у потоці аналізованої речовини.

На рис. 10.9 а показана схема проточного вібраційного густиноміра рідини. Аналізована рідина надходить паралельно у трубки 1 і 2 (резонатор), встановлені у сифонах 6 і скріплені перемичками 5. Сифони 6 розміщені на опорах 5. Зазначені трубки, котушка 3, що сприймає коливання трубок резонатора, котушка збудження 4 й електронний підсилювач 10 становлять електромеханічний генератор, частота коливань якого визначається густиною аналізованої рідини. Вихідний сигнал підсилювача 10 у вигляді частоти вводиться в обчислювальний пристрій 9, до якого під'єднані платинові термометри опору 7 і 11, що дозволяють коригувати сигнал густиноміра залежно від значення середньої температури рідини у ньому.

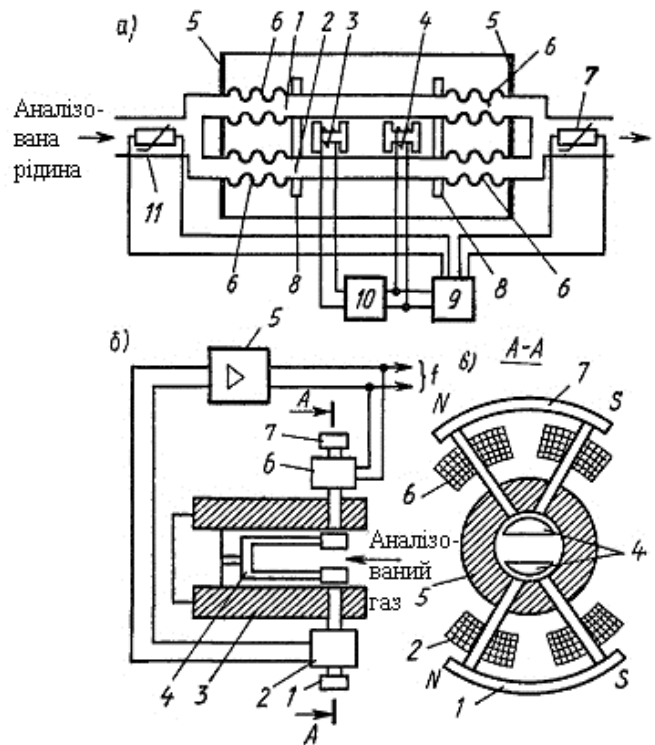


Рисунок 10.9 – Схеми вібраційних густиномірів рідин і газів

Діапазон вимірювань цього густиноміра $(690 - 1050) \text{ кг/м}^3$, температура рідини $(10 - 100) \text{ }^\circ\text{C}$; абсолютна похибка вимірювання $\pm 1,5 \text{ кг/м}^3$.

На рис. 10.9 б показана схема занурювального камертонного вібраційного густиноміра газів. Тут електромеханічний генератор складається зі сприймаючих котушок 2 із магнітом 1, котушок збудження 6 із магнітом 7, камертона 4, розміщеного в корпусі 3, та електронного підсилювача 5. Частота коливань системи на виході з підсилювача 5 порівнюється із частотою кварцевого генератора, а різниця частот цих коливань, що визначають густину газу, вимірюється частотоміром. Клас точності густиноміра 1. Він може бути використаний для вимірювання густини газу у робочих умовах.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

11. Що таке густина: визначення, фізичний зміст, пов'язані величини, їх взаємозв'язок, одиниці вимірювання?
2. Методи обчислення густини рідин.

3. Методи обчислення густини газів.
4. Методи обчислення густини сумішей.
5. Що таке ареометр? Класифікація ареометрів.
6. Що таке денсиметр? Класифікація денсиметрів. У чому полягає різниця денсиметра та ареометра?
7. Поясніть різницю між ареометрами сталої маси та сталого об'єму.
8. Конструкція і принцип дії ареометра.
9. Поясніть вплив меніска на покази ареометра. Що таке капілярна похибка, принцип розрахунку, коли нею можна нехтувати?
10. Поясніть вплив температури на покази ареометра. Що таке температурна похибка, принцип розрахунку, коли нею можна нехтувати?
11. Розкажіть про метод гідростатичного зважування.
12. Що являють собою ваги Мора-Вестфаля?
13. Пікнометричний метод визначення густини.
14. Які переваги пікнометричного методу визначення густини порівняно із гідростатичним зважуванням.
15. Опишіть конструкції пікнометрів.
16. Конструкція і принцип дії пікнометричних густиномірів.
17. Конструкція і принцип дії ареометричних густиномірів.
18. Конструкція і принцип дії гідро- та аеростатичних густиномірів.
19. Конструкція і принцип дії гідро- і газо(аеро)динамічних густиномірів.
20. Конструкція і принцип дії вібраційних густиномірів.

11 ВИМІРЮВАННЯ В'ЯЗКОСТІ

11.1 Загальні положення

В'язкість (внутрішнє тертя) – властивість рухливих середовищ (рідин та газів) чинити опір переміщенню однієї їх частини щодо іншої. Основний закон в'язкісного тертя може бути описаний формулою Ньютона:

$$F = \mu \cdot S \cdot \frac{dw}{dn}, \quad (11.1)$$

де F – тангенціальна (дотична) сила, що викликає рух шарів рідини (газу) один щодо одного; S – площа шару, яким відбувається переміщення; dw/dn – градієнт швидкості w руху шарів рідини один щодо одного по нормалі n .

Коефіцієнт пропорційності μ називають *динамічною в'язкістю*. Величину, обернену до динамічної в'язкості $\varphi = 1/\mu$, називають *текучістю*. Також часто застосовується параметр, який називають *коефіцієнтом кінематичної в'язкості* ν . Цей коефіцієнт пов'язаний із коефіцієнтом динамічної в'язкості залежністю

$$\nu = \mu / \rho, \quad (11.2)$$

де ρ – густина середовища.

Одиниці вимірювання динамічної в'язкості у системі СІ $\mu = [\text{Па} \cdot \text{с}]$, кінематичної в'язкості $\nu = [\text{м}^2 / \text{с}]$.

В'язкість рідин зі зростанням температури зменшується, а газів – збільшується. При тисках до 20 МПа його вплив на динамічну в'язкість середовища можна не враховувати. В'язкість у загальному випадку не має адитивної властивості.

Засоби вимірювань в'язкості називають *віскозиметрами*. Розрізняють автоматичні віскозиметри різних типів, наприклад, *капілярні*, *ротаційні*, *вібраційні*, *віскозиметри із плаваючим тілом* та інші.

11.2 Принципи вимірювання в'язкості

Капілярні віскозиметри (віскозиметри витікання). У принцип дії цих механічних віскозиметрів покладено закономірність витікання рідини через капіляр, яка може бути описана законом Пуазейля:

$$\dot{V} = \frac{\pi \cdot d^4}{128 \cdot \mu \cdot l} \cdot (p_1 - p_2), \quad (11.3)$$

де \dot{V} – об’ємна витрата рідини; d і l – внутрішній діаметр та довжина капіляра; p_1 і p_2 – тиск рідини до та після капіляра щодо руху потоку.

При сталій об’ємній втраті рідини будемо мати вираз

$$p_1 - p_2 = k \cdot \mu, \quad (11.4)$$

де $k = 128 \cdot \dot{V} \cdot l / (\pi \cdot d^4)$ – сталий коефіцієнт для заданої витрати рідини.

На рис. 11.1 а показана схема капілярного віскозиметра, в якій для створення сталої об’ємної витрати аналізованої рідини застосовується шестеренний насос 1, який приводиться в рух синхронним електродвигуном 2. Із насоса аналізована рідина надходить до змійовика 3, де нагрівається до температури мастила, яке заповнює термостат 6, а потім – до капіляра 4, розміри якого обирають залежно від діапазону вимірюваних значень в’язкості. Перепад тисків на капілярі вимірюється дифманометром 5 із пневматичним або електричним уніфікованим вихідним сигналом, величина якого пропорційна динамічній в’язкості аналізованої рідини. Температура у термостаті підтримується сталою і дорівнює 50 або 100 °С. Діапазони вимірювань від $(0-2) \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ до $(0-1000) \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$. Класи точності віскозиметра 1,5 – 2,5 залежно від діапазону вимірювань.

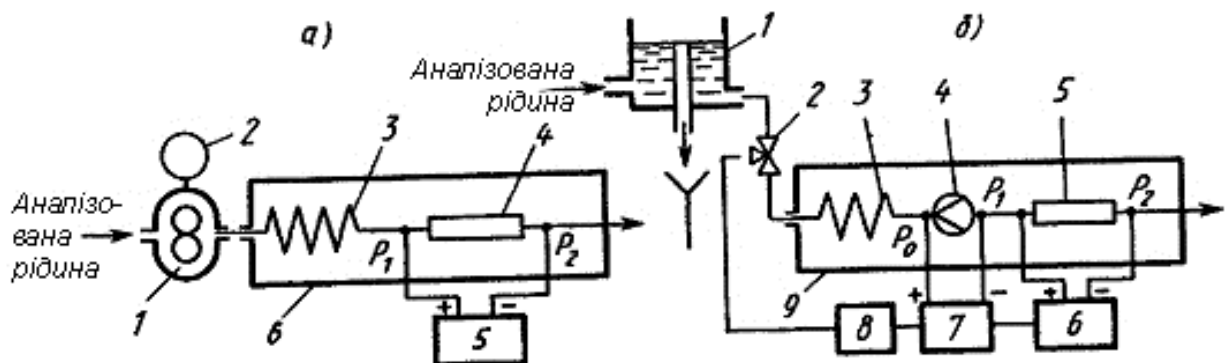


Рисунок 11.1 – Схеми капілярних віскозиметрів

У віскозиметрі, зображеному на рис. 11.1 б, стабілізація об’ємної витрати аналізованої рідини здійснюється пневматичною системою автоматичного регулювання, що складається з діафрагми 4, дифманометра 7, пневматичного регулятора 8 та виконавчого механізму 2. Аналізована рідина подається із напірної ємності 1 із переливною трубкою. Можливість стабілізації витрати рідини таким способом базується на тому, що перепад тисків на діафрагмі $(p_0 - p_1)$ практично не залежить від динамічної в’язкості, а густина аналізованої рідини змінюється у незначних межах. При таких умовах підтримання сталої перепаду тисків $(p_0 - p_1)$ забезпечує сталість об’ємної витрати аналізованої рідини. Змійовик 3, діафрагма 4 та капіляр 5

знаходяться у водяному термостаті 9, де підтримується температура 100 °С за рахунок подачі у нього насиченої водяної пари при атмосферному тиску. Перепад тисків ($p_1 - p_2$) на капілярній трубці вимірюється дифманометром 6 із пневматичним вихідним сигналом. Клас точності віскозиметра 2,5.

Віскозиметри із плаваючим тілом (кулькові віскозиметри). Принцип дії цих механічних віскозиметрів базується на зміні швидкості (або часу) руху тіла (кульки) під дією сил тяжіння й тертя в аналізованій рідині.

Цей рух описується законом Стокса:

$$w = \frac{g \cdot (\rho_k - \rho) \cdot d^2}{18 \cdot \mu}, \quad (11.5)$$

де w – швидкість руху кульки; ρ_k – густина матеріалу кульки; ρ – густина рідини в якій рухається кулька, $\rho_k > \rho$; d – діаметр кульки.

Якщо вважати, що густина аналізованої рідини змінюється мало та, що вона набагато менша за густину матеріалу кульки, то вираз можна переписати у вигляді

$$w = \frac{k_1}{\mu}, \quad (11.6)$$

де $k_1 = g \cdot (\rho_k - \rho) \cdot d^2 / 18$ – сталий коефіцієнт.

Як правило, вимірювання швидкості w зводиться до вимірювання проміжку часу τ , за який кулька, падаючи зі сталою швидкістю, пройде деякий сталий відрізок шляху l між двома заданими відмітками. У цьому випадку матимемо

$$\tau = \frac{l}{w} = \frac{l \cdot \mu}{k_1} = k \cdot \mu, \quad (11.7)$$

де $k = l / k_1$ – сталий коефіцієнт.

На рис. 11.2 показано схему кулькового віскозиметра циклічної дії. Аналізована рідина з апарата 7 або трубопроводу перекачується насосом 6 по трубці 1 із немагнітного матеріалу знизу вгору і при власному русі підіймає кульку 4 від нижньої 11 до верхньої 5 обмежувальної сітки. При вимкненні двигуна 8 насоса (періодичне ввімкнення та вимкнення якого здійснюється за допомогою

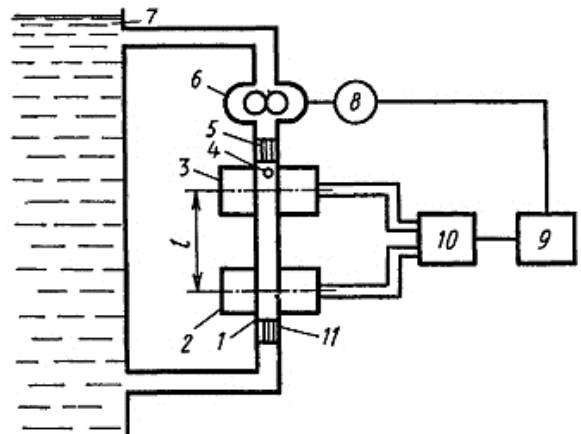


Рисунок 11.2 – Схема кулькового віскозиметра

блока керування 9) кулька падає в аналізовану рідину. За допомогою диференційних трансформаторів 2 і 3 формуються електричні імпульси у моменти часу, коли кулька проходить дві обрані відмітки, які знаходяться на відстані l одна від одної. За допомогою вимірювача часових інтервалів 10 вимірюється проміжок часу між зазначеними імпульсами, величина якого визначає динамічну в'язкість рідини. Клас точності віскозиметра 2.

Ротаційні віскозиметри. Принцип дії цих механічних віскозиметрів базується на вимірюванні обертального моменту, який виникає на осі ротора (циліндра, диска та ін.), зануреного у вимірюване середовище, при взаємному їх переміщенні. Зазначений обертальний момент у загальному випадку може бути визначений із рівняння

$$M = k \cdot \omega \cdot \mu, \quad (11.8)$$

де k – сталий коефіцієнт, що залежить від конструкції ротора; ω – кутова швидкість обертання ротора.

Отже, при сталій частоті обертання ротора коефіцієнт динамічної в'язкості середовища μ визначає величину обертального моменту M .

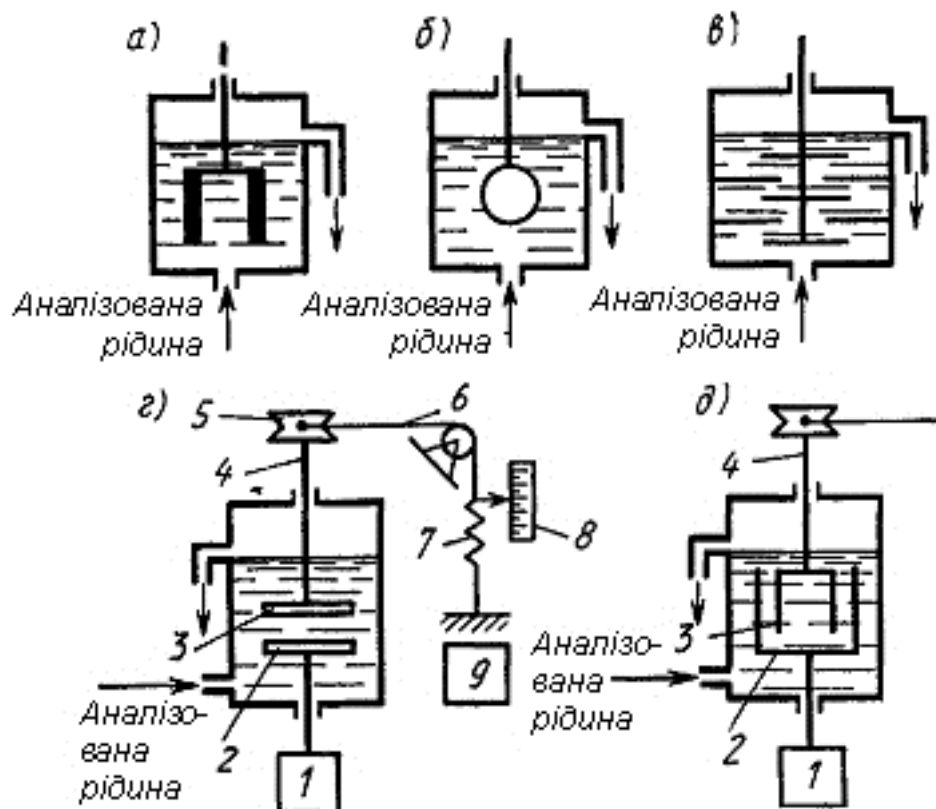


Рисунок 11.3 – Схеми ротаційних віскозиметрів

На рис. 11.3 зображені найбільш поширені типи ротаційних віскозиметрів. Віскозиметри, зображені на рис. 11.3 а – в, поєднує спільний

принцип дії, відповідно до якого в'язкість визначається за моментом сил тертя, що виникає при обертанні тіла, зануреного в аналізоване середовище. Таким тілом може бути циліндр (рис. 11.3 а), куля (рис. 11.3 б) або диски, насаджені на спільний вал і розміщені між нерухомими шайбами (рис. 11.3 в). У віскозиметрах момент обертання, що створюється диском (рис. 11.3 з) або циліндром 2 (рис. 11.3 д), передається через рідину диска або циліндра 3. Диску або циліндру обертальний рух передається синхронним електродвигуном 1. Обертальний момент, що виникає на диску (циліндрі) 3, а відповідно на шківі 5, насадженому на спільному валу 4 з диском (циліндром) 3, пропорційний динамічній в'язкості. Цей момент зрівноважується силою пружної деформації пружини 7, з'єднаної із гнучкою ниткою 6, що приклеєна до шківів 5. Величину деформації пружини можна спостерігати на шкалі 8. За допомогою перетворювача 9 сила пружної деформації пружини 7 перетворюється в уніфікований електричний або пневматичний сигнал.

Характерною особливістю ротаційних віскозиметрів є широкий діапазон вимірюваних величин в'язкості $(0,01-1000) \text{ Па}\cdot\text{с}$. Класи точності ротаційних віскозиметрів 1 – 2,5.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що таке в'язкість: визначення, фізичний зміст, види в'язкості, їх взаємозв'язок, одиниці вимірювання?
2. Конструкція та принцип дії капілярних віскозиметрів.
3. Конструкція та принцип дії віскозиметрів із плаваючим тілом.
4. Конструкція та принцип дії ротаційних віскозиметрів.

12 ВИМІРЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ

12.1 Загальні положення

Теплопровідність – процес перенесення тепла завдяки тепловому руху мікрочастинок у суцільному середовищі, зумовлений неоднорідним розподілом температури. Фізичну величину, що характеризує інтенсивність перенесення тепла теплопровідністю, називають *коефіцієнтом теплопровідності* λ . По суті, це коефіцієнт пропорційності, що входить до виразу основного закону теплопровідності – *закону Фур'є*:

$$q = -\lambda \cdot \frac{dT}{dn}, \quad (12.1)$$

де q – густина теплового потоку; dT / dn – градієнт температури, тобто зміна температури dT на одиничній довжині у напрямку нормалі dn , до площини ізотермічної поверхні.

Одиниця вимірювання коефіцієнта теплопровідності $\lambda = [Wm / (m \cdot K)]$.

Виходячи з одиниць вимірювання теплопровідності, можна виявити фізичний зміст цього коефіцієнта – це кількість тепла, яке передається за одиницю часу через одиницю площі теплообмінної поверхні при одиничному градієнті температури, тобто при створенні різниці температур в один градус на одиниці товщини тіла (речовини), вимірній між ізотермічними поверхнями, на яких створена зазначена різниця температур.

Коефіцієнт теплопровідності в основному залежить від температури та меншою мірою – від тиску. Він не має адитивних властивостей та визначеного напрямку зміни. Залежно від природи речовини зі зростанням температури теплопровідність деяких рідин (наприклад, метиловий та етиловий спирт, касторове масло, оцтова кислота, ацетон, мінеральні масла та ін.) зменшується, а у деяких – зростає (вода, гліцерин, соляна, сірчана кислоти, аміак, гас та ін.). Теплопровідність газів при нагріванні зростає незалежно від їх природи. Теплопровідність більшості твердих матеріалів майже не залежить від температури, змінюючись або у бік незначного зростання, або зменшення залежно від природи матеріалу. Матеріали у порядку зменшення коефіцієнта теплопровідності, не враховуючи деяких винятків, можна розмістити у ряд: метали, неметали, неорганічні та органічні рідини, пара, газ.

12.2 Методи вимірювання коефіцієнта теплопровідності

Дослідження теплопровідності матеріалів виконуються в широкому діапазоні температур. Для дослідження використовують дві групи методів: стаціонарні та нестаціонарні. Стаціонарні методи, що базуються на дослідженні незмінних у часі температурних полів, як правило, простіші і, отже, досконаліші.

Нестаціонарні методи базуються на дослідженні змінних у часі за певним законом температурних полів. Вони складніші в реалізації. Основна складність полягає у тому, що в експерименті важко реалізувати умови, закладені в теорію методу. Проте нестаціонарні методи дозволяють, крім даних про теплопровідність, отримати інформацію про температуропровідність і теплоємність речовини.

12.2.1 Теплопровідність твердих матеріалів

Стаціонарний метод плоского шару. Для визначення коефіцієнта теплопровідності твердих матеріалів використовується метод динамічного калориметра із тепломіром і адіабатичною оболонкою. Схема установки зображена на рис. 12.1. Досліджуваний зразок 4 поміщається між опорним мідним стрижнем 5 і мідною контактною пластинкою 3. Частина теплового потоку, який підводиться через тепломір $\dot{Q}_T(\tau)$, витрачається на нагрівання зразка $\dot{Q}_0(\tau)$.

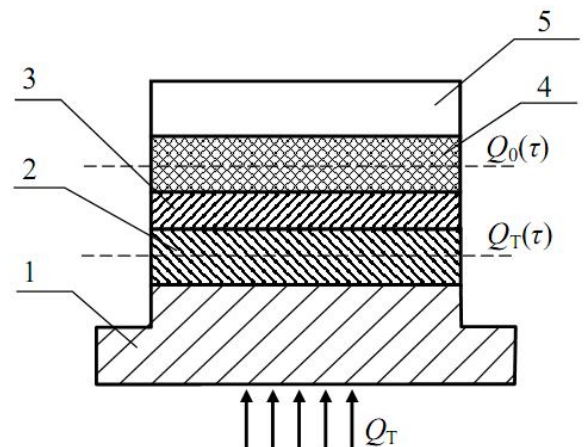


Рисунок 12.1 – Схема установки:

1 – основа; 2 – пластина;
3 – контактна пластинка; 4 – досліджуваний зразок; 5 – стрижень

Температурне поле у зразку 4 і пластині 2 можна вважати лінійним. Коефіцієнт теплопровідності зразка визначається за формулою

$$\lambda = \frac{h}{R \cdot F}, \quad (12.2)$$

де h , F , R – відповідно висота, площа поперечного перерізу і термічний опір зразка.

Величина R розраховується за формулою

$$R = \frac{\Delta T \cdot (1 + k)}{\Delta T_1 \cdot K(t)} - R_k, \quad (12.3)$$

де ΔT , ΔT_1 – перепад температури на зразку і пластині 2; $K(t)$ – теплова провідність тепломіра; R_k – поправка, що враховує теплові опори контакту між стрижнем 5 і пластиною 3, а також контактів термопар із поверхнями; k – поправка, що враховує вплив теплоємності зразка.

Поправка R_k і теплова провідність тепломіра $K(t)$ визначаються градуванням із використанням еталонних зразків із кварцового скла й міді.

Для підвищення точності їх визначення виконується не менше п'яти дублюючих дослідів. Теплова провідність тепломіра визначається за формулою

$$K(t) = \frac{c_e \cdot m_e}{t - t_a}, \quad (12.4)$$

де c_e і m_e – відповідно питома теплоємність і маса еталонного зразка.

Величина k визначається за формулою:

$$k = \frac{c \cdot m}{2 \cdot (c \cdot m + c_e \cdot m_e)}, \quad (12.5)$$

де c і m – відповідно питома теплоємність і маса досліджуваного зразка.

Метод поздовжнього теплового потоку. Метод поздовжнього теплового потоку широко застосовується при дослідженні металів та інших матеріалів із відносно великою теплопровідністю. На одному із торців довгого зразка з площею поперечного перерізу F створюється рівномірний тепловий потік \dot{Q} . Між двома перерізами зразка, розміщеними на відстані l один від одного, вимірюють різницю температур $\Delta t = t_1 - t_2$. За відсутності бічних теплових втрат теплопровідність зразка розраховується за формулою

$$\lambda = \frac{\dot{Q} \cdot l}{F \cdot (t_1 - t_2)}. \quad (12.6)$$

Основна складність методу полягає у створенні одновимірного осьового теплового потоку, його вимірюванні й урахуванні теплових втрат із бічної поверхні зразка. Захист циліндрового зразка від бічних теплових втрат може бути здійснений за допомогою захисного циліндра (рис. 12.2), уздовж якого створюється температурне поле, що повторює поле зразка.

Застосування методу поздовжнього теплового потоку знайшло поширення при дослідженні теплопровідності композиційних матеріалів в області криогенних температур (нижче 80 K). У цьому випадку теплові втрати

з бічної поверхні зразка (рис. 12.3) в умовах вакууму визначаються лише випромінюванням і при температурах нижче 80 K складають незначну частку основного теплового потоку.

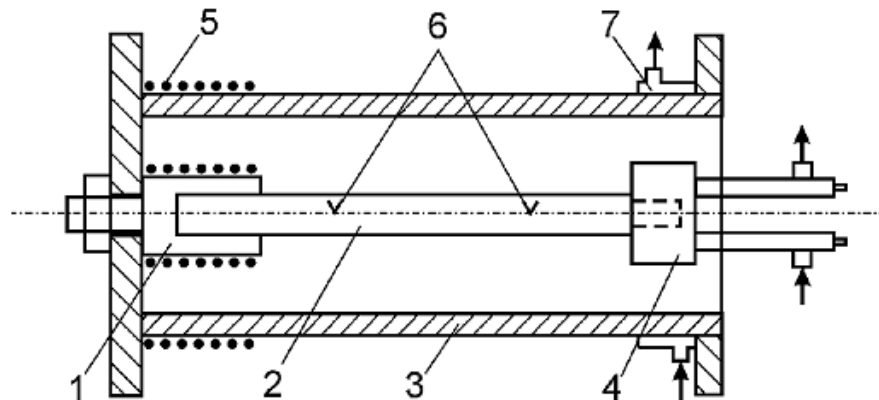


Рисунок 12.2 – Схема установки:

1 – блок нагрівача; 2 – зразок; 3 – захисний циліндр;
4, 7 – холодильники; 5 – нагрівач захисного циліндра; 6 – термопари

При визначенні теплопровідності металів та інших електропровідних матеріалів може бути використаний метод Егера і Диссельхорста, що ґрунтується на розв'язанні одновимірного рівняння теплопровідності із внутрішніми джерелами теплоти для стрижня, що нагрівається електричним струмом.

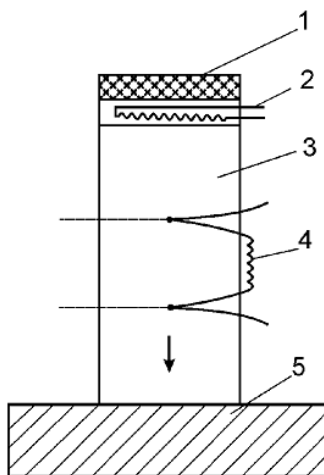


Рисунок 12.3 – Схема установки для вимірювання в області криогенних температур:

1 – ізоляція; 2 – нагрівач;
3 – зразок; 4 – диференціальні термопари; 5 – мідний блок

стрижня відповідно.

За відсутності тепловіддачі з бічної поверхні стрижня (рис. 12.4) розрахункова формула має вигляд

$$\lambda = \frac{U \cdot \sigma_e}{8 \Delta t}, \quad (12.7)$$

де σ_e – електрична провідність досліджуваного зразка; U – падіння напруги на зразку; Δt – різниця температур між серединою і кінцем стрижня за умови симетричного по довжині розподілу температур. Якщо в експерименті вимірювати силу струму I , то розрахункова формула матиме вигляд:

$$\lambda = \frac{I \cdot l}{8 \cdot \Delta t \cdot F}, \quad (12.8)$$

де l і F – довжина і площа перерізу

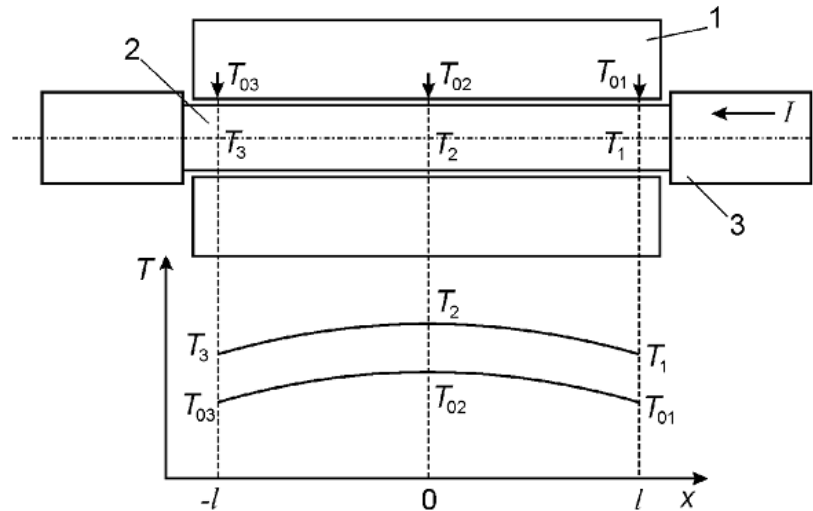


Рисунок 12.4 – Схема методу Егера і Диссельхорста:

I – електричний струм; 2 – зразок; 3 – цапфи кріплення зразка;

$T_{01}, T_{02}, T_{03}, T_1, T_2, T_3$ – місця закладання термопар і вимірювані ними температури

12.2.2 Теплопровідність рідин і газів

Для вимірювання теплопровідності рідин і газів використовуються деякі методи, що застосовуються для твердих тіл, і деякі специфічні.

Метод плоского шару. Конструкція вимірювальної установки, яка використовується для визначення теплопровідності рідин, аналогічна конструкції установки, зображеної на рис. 12.1. Особливість реалізації методу для рідин – контроль появи конвекції у досліджуваному шарі. Для виключення цього ефекту рекомендується розміщувати робочі поверхні строго горизонтально і здійснювати підведення теплоти до досліджуваного шару лише зверху.

Для вимірювання теплопровідності рідин може бути використаний метод поздовжнього теплового потоку (див. рис. 12.2). У цьому випадку тепловий потік створюється уздовж тонкостінної металевої трубки, заповненої досліджуваною речовиною. При розрахунку теплового потоку необхідно враховувати його частку, що рухається вздовж трубки.

Метод коаксіальних циліндрів. У цьому методі досліджувана речовина (рідина або газ) заповнює циліндричний зазор (рис. 12.5), утворений двома коаксіально розміщеними циліндрами. У внутрішньому циліндрі розміщується основний нагрівач 2 потужністю W . Шар досліджуваної речовини 3 обмежений внутрішнім циліндром 1 із діаметром d_1 і довжиною l і зовнішнім циліндром 4 із внутрішнім діаметром d_2 . Робоча різниця температур $\Delta t = t_1 - t_2$ вимірюється термопарами 5. Для виключення

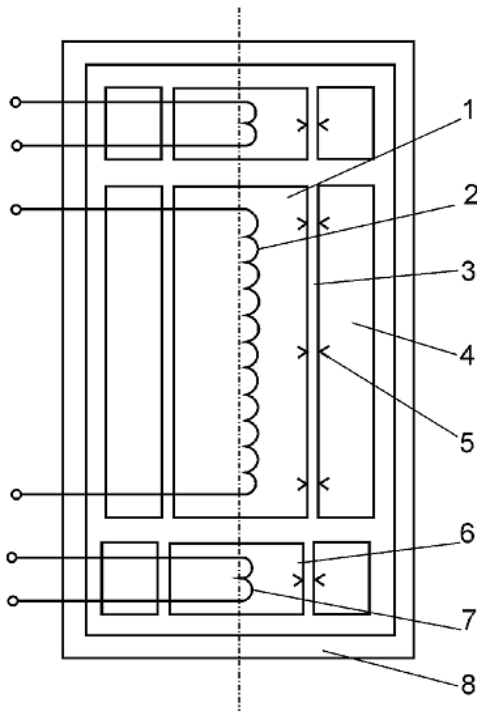


Рисунок 12.5 – Схема вимірювального вічка:

- 1 – внутрішній циліндр;
- 2 – основний нагрівач;
- 3 – досліджувана речовина;
- 4 – зовнішній циліндр;
- 5 – термопари; 6 – захисні циліндри;
- 7 – захисні нагрівачі; 8 – корпус

торцевих втрат теплоти з циліндра 1 передбачені захисні циліндри 6 із захисними нагрівачами 7. Уся вимірювальна комірка розміщується у корпусі 5, розрахованому на повний тиск досліджуваного середовища. Теплопровідність досліджуваної речовини розраховується за формулою

$$\lambda = \frac{W \cdot \ln(d_2 / d_1)}{2 \cdot \pi \cdot l \cdot (t_1 - t_2)}, \quad (12.9)$$

де t_1, t_2 – температури зовнішньої поверхні внутрішнього циліндра і внутрішньої поверхні зовнішнього циліндра.

Метод нагрітого проводу. У цьому методі внутрішній циліндр замінюється на нагрітий провід, що є одночасно джерелом тепла \dot{Q} . В установці використовуються термометри опору для вимірювання температури t . Завдяки цьому вдається різко збільшити порівняно із методом коаксіальних циліндрів відношення довжини нагрівача l до його діаметра d_1 і тим самим істотно зменшити торцеві втрати тепла.

Вимірювальний провід 1 (рис. 12.6 а) діаметром d_1 і довжиною l розміщений у трубці (капілярі) 2 коаксіально. Досліджувана речовина 3 знаходиться у зазорі між ними. Через провід за допомогою струмопроводів 4

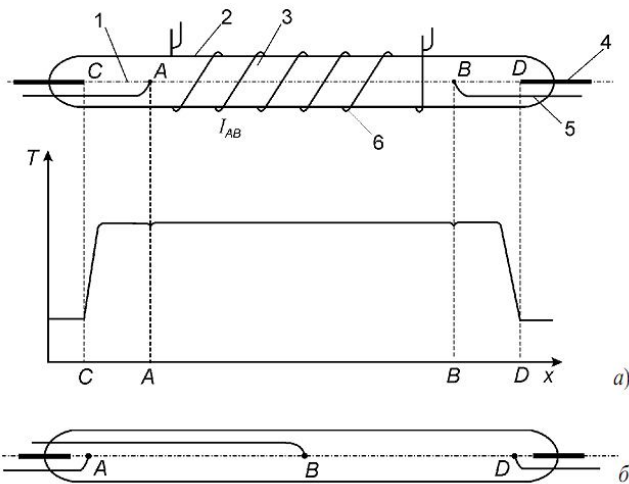


Рисунок 12.6 – Схема вимірювального вічка без середнього потенціального відведення (а)

із середнім потенціальним відведенням (б):

- 1 – дріт; 2 – трубка; 3 – досліджувана речовина;
- 4 – струмопроводи; 5 – потенціальні відведення;
- 6 – зовнішній термометр

пропускають електричний струм силою I . Теплову потужність \dot{Q} визначають за струмом I і падінням напруги ΔU_{AB} на довжині проводу l_{AB} , виміряного за допомогою подовжуючих проводів потенціометра 5. Температуру внутрішньої поверхні трубки t_2 визначають за допомогою зовнішнього термометра 6 з урахуванням поправки на перепад температур у стінці трубки. Для усунення цієї поправки у ряді випадків замість скляної або кварцевої трубки використовують тонкостінний металевий капіляр, який служить одночасно і термометром опору.

Якщо весь тепловий потік поширюється лише радіально завдяки теплопровідності речовини і при цьому можна вважати, що $\lambda = \text{const}$, теплопровідність досліджуваної речовини можна визначити за формулою

$$\lambda = \frac{I \cdot U_{AB} \cdot \ln(d_2 / d_1)}{2 \cdot \pi \cdot l_{AB} \cdot (t_1 - t_2)}. \quad (12.10)$$

Поправку на торцеві втрати теплоти у методі нагрітого проводу можна виключити експериментально, якщо виконати досліди на двох вимірювальних комірках (рис. 12.6 а), що відрізняються лише довжиною проводу. Інколи використовується конструкція вимірювальної комірки з відведенням подовжуючих проводів потенціометра від середини нагріваючого проводу (рис. 12.6 б). У цьому випадку теплопровідність досліджуваної речовини розраховується за формулою

$$\lambda = \frac{I \cdot (U_{AD} - U_{AB}) \cdot \ln(d_2 / d_1)}{2 \cdot \pi \cdot (l_{AD} - l_{AB}) \cdot (t_1 - t_2)}. \quad (12.11)$$

Оскільки конструкції вимірювальної комірки (рис. 12.6 б) або двох комірок із різною довжиною проводів складні у реалізації, останнім часом значного поширення набули розрахункові способи визначення торцевих втрат, що базуються на розв'язанні стаціонарного рівняння теплопровідності для проводу із внутрішнім джерелом тепла.

На теплопровідність, виміряну у трубках малого діаметра, суттєво може вплинути ексцентричне розміщення проводу щодо трубки. При малих зсувах проводу щодо осі трубки уточнення дійсного значення теплопровідності досліджуваної речовини можна виконати за формулою

$$\lambda = \lambda_{\text{вим}} \cdot \left[1 - \frac{4 \cdot \delta^2}{(d_2^2 - d_1^2) \cdot \ln(d_2 / d_1)} \right], \quad (12.12)$$

де δ – середній зсув осі проводу щодо осі капіляра.

При розрахунку параметрів установки, як правило, для усунення конвективної складової $\dot{Q}_{\text{кон}}$ намагаються забезпечити умову $Ra < 1000$.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що таке теплопровідність, фізичний зміст, одиниці вимірювання?
2. Як змінюється теплопровідність у різних речовин та матеріалів зі зміною температури?
3. Опишіть суть стаціонарного методу плоского шару.
4. Опишіть суть методу поздовжнього теплового потоку.
5. Опишіть суть методу плоского шару.
6. Опишіть суть методу коаксіальних циліндрів.
7. Опишіть суть методу нагрітого дроту.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Берлинер М. А. Измерение влажности / М. А. Берлинер. – 2-е изд, перераб. и доп. – М. : Энергия, 1973. – 400 с., ил.
2. Босий В. В. Інженерні методи розрахунку похибок / В. В. Босий, Г. Н. Васильченко, Е. Н. Панов. – К. : КПІ, 1986. – 72 с.
3. Гаузнер С. И. Измерение массы, объема и плотности / С. И. Гаузнер, С. С. Кивилис, А. П. Осокина, А. Н. Павловский. – М. : Изд-во стандартов, 1972. – 623 с.
4. Денісов А. К. Теплотехнічні вимірювання та прилади : навчальний посібник / А. К. Денісов, С. А. Денісов. – Рівне : НУВГП, 2013. – 184 с.
5. Иванова Г. М. Теплотехнические измерения и приборы : учебник для вузов / Г. М. Иванова, Н. Д. Кузнецов, В. С. Чистяков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Издательство МЭИ, 2005. – 460 с., ил.
6. Коротких А. Г. Теплопроводность материалов: учебное пособие / А. Г. Коротких; Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 97 с.
7. Музалевский В. И. Измерение влажности древесины / В. И. Музалевский. – М. : Лесная промышленность, 1976. – 120 с.
8. Мурин Г. А. Теплотехнические измерения: учебник для техникумов / Г. М. Мурин. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергия, 1979. – 424 с., ил.
9. Преображенский В. П. Теплотехнические измерения и приборы / В. П. Преображенский. – М. : Энергия, 1978. – 704 с.
10. Ранеев Г. Г. Методы и средства измерений: учебник для вузов / Г. Г. Ранеев, А. П. Тарасенко. – 2-е изд., стереотип. – М. : Издательский центр «Академия», 2004. – 336 с.
11. Фарзани Н. Г. Технологические измерения и приборы / Н. Г. Фарзани, Л. В. Илясов, А. Ю. Азим-Заде. – М. : Высшая школа, 1989. – 456 с.
12. Хансуваров К. И. Техника измерения давления, расхода, количества и уровня жидкости, газа и пара : учебн. пособие для техникумов / К. И. Хансуваров, В. Г. Цейтлин. – М. : Издательство стандартов, 1990. – 287 с., ил.
13. Чистяков В. С. Краткий справочник по теплотехническим измерениям / В. С. Чистяков. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
14. Чистяков С. Ф. Теплотехнические измерения и приборы / С. Ф. Чистяков, Д. В. Радун. – М. : Энергия, 1978. – 215 с.

Навчальне видання

Курилов Анатолій Федорович,
Козін Віктор Миколайович

ТЕПЛОТЕХНІЧНІ ВИМІРЮВАННЯ І ПРИЛАДИ

Навчальний посібник

Художнє оформлення обкладинки В. М. Козіна
Редактор Н. В. Лисогуб
Комп'ютерне верстання В. М. Козіна

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 11,23. Обл.-вид. арк. 11,16. Тираж 300 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач
Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.