

МІНІСТЕРСТВО ТРАНСПОРТУ ТА ЗВ'ЯЗКУ УКРАЇНИ
ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ
ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

О. П. АРЕСТОВ

Теплотехнічні виміри

РЕКОМЕНДОВАНО МІНІСТЕРСТВОМ ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЯК НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК
ДЛЯ СТУДЕНТІВ ВИЩИХ НАВЧАЛЬНИХ ЗАКЛАДІВ

ВИДАВНИЦТВО
ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА
2008

ББК 3 32
А80
УДК 621.018.8 (075.8)

Рецензенти:

д-р техн. наук, проф. *В. О. Габрінець* (ДРІДУ НАДУ),
д-р техн. наук, проф. *М. М. Біляєв* (ДІТ),
канд. техн. наук, доц. *В. Ф. Івін* (ДІТ).

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України
як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів
(лист № 14/18-Г-1272 від 01.12.06)

Арестов, О. П.

А80 Теплотехнічні виміри [Текст]: навчальний посібник /
О. П. Арестов. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп.
ім. акад. В. Лазаряна, 2008. – 176 с.
ISBN 978-966-8471-32-2

Розглянуто основні сучасні засоби вимірювання головних теплотехнічних величин, таких як температура, тиск, рівень, витрати речовини, вологість речовини, та їх склад. Методологічно викладено фізичні закони, які є основою для вимірювання кожної величини, а також наведено технічні засоби та схеми, за допомогою яких вимірювання теплотехнічних величин перетворюється у спосіб, зручний для виконання.

Для студентів, які навчаються за напрямком «Теплоенергетика» з дисциплін «Теплотехнічні виміри», «Теплотехніка», «Термодинаміка і теплопередача», «Метрологія і стандартизація», «Тепломасообмін» тощо. Також може бути корисним для аспірантів, магістрів та науково-технічних працівників теплоенергетичних спеціальностей.

Іл. 78. Табл. 6. Бібліогр.: 7 назв.

ББК 3 32

© Арестов О. П., 2008

© Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн.
трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2008

ISBN 978-966-8471-32-2

ВСТУП

Навчальний посібник написано на основі досвіду проведення лекційних, лабораторних і практичних занять з дисципліни «Теплотехнічні виміри» для студентів спеціальності «Теплоенергетика».

Наведений у посібнику матеріал містить десять розділів, у яких розглядаються сучасні засоби вимірювання основних теплотехнічних величин, а саме: температури, тиску, рівня, витрат речовини, вологості речовини, та їх склад. Причому матеріал у посібнику викладається за певною методикою: спочатку розглядаються фізичні закони, які є основою для вимірювання кожної величини, а потім – технічні засоби та схеми, за допомогою яких виконується вимірювання технічних величин. Основні конструктивні схеми вимірювальних приладів і відповідні електричні схеми наведені в посібнику у вигляді рисунків, що сприяє кращому засвоєнню матеріалу студентами. Дуже важливим є також те, що розглядаються похибки при виконанні відповідних вимірювань та методологія їх усунення.

Навчальний посібник призначено для студентів, які навчаються за напрямком «Теплоенергетика» з дисциплін: «Теплотехнічні виміри», «Теплотехніка», «Термодинаміка і теплопередача», «Метрологія і стандартизація» тощо, а також для аспірантів, магістрів і наукових та інженерно-технічних працівників теплоенергетичних спеціальностей. Крім того, посібник може бути корисним для студентів і наукових співробітників інших спеціальностей.

Автор висловлює щирі подяку інженеру І. І. Кудашку та студенту-випускнику С. П. Бевзюку за допомогу в підготовці рукопису до видання.

Загальні питання вимірів

1.1. Виміри. Види вимірів

Виміри являють собою процес знаходження значення фізичної величини дослідним шляхом за допомогою спеціальних технічних засобів. У багатьох випадках у процесі виміру відбувається порівняння вимірюваної величини з фізичною, котрій привласнене числове значення рівне одиниці, і яке називається одиницею фізичної величини, або одиницею виміру. *Результат виміру* – це чисельне значення величини знайдене шляхом його виміру, наприклад, шляхом порівняння її з одиничним виміром. Результат може бути виражений у такий спосіб:

$$R = Q/q,$$

де Q – вимірювана фізична величина;

q – одиниця фізичної величини (одиниця виміру).

За способом одержання чисельного значення вимірюваної величини всі технічні виміри поділяються на прямі і непрямі.

Прямими вимірами називають такі, при яких шукане значення величини знаходять безпосередньо з дослідних даних (виміри температури термометром, тиску – манометром).

Результат виміру може бути отриманий також шляхом *непрямих вимірів*, коли чисельне значення знаходять на основі прямих вимірів величин, пов'язаних із вимірюваною величиною визначеною залежністю

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

де (x_1, x_2, \dots, x_n) – чисельне значення величин, вимірюваних прямим способом.

Приклад: визначити щільність тіла за розмірами виміру m і V , визначити питомий електричний опір дроту за його R , l і площею поперечного перерізу.

Виміри виконуються на основі фізичних явищ, що визначають принцип виміру. Для реалізації тих або інших принципів виміру застосовуються різні технічні засоби. Технічний засіб, використовуваний при вимірах і такий, що має нормовані метрологічні властивості, називається *засобом виміру*. Сукупність правил, що визначають принцип і засоби виміру, називається *методом виміру*.

У технічних вимірах широке поширення набули такі методи:

- безпосередньої оцінки;
- диференціальний;
- нульовий.

У *методі безпосередньої оцінки* значення вимірів визначається безпосередньо за відліковим пристроєм вимірюваного приладу прямої дії. Цей метод застосовується, наприклад, при вимірі тиску пружинним манометром, сили струму – амперметром.

У *диференціальному методі* на вимірювальний прилад впливає різниця вимірюваної і базової (значення якої відомо) величин (наприклад, вимір складу газової суміші за теплопровідністю шляхом порівняння з теплопровідністю повітря). Цей метод дозволяє одержати досить точні результати навіть при застосуванні засобів виміру цієї різниці не дуже високої точності. Однак для цього необхідно мати базову величину, значення якої близьке до вимірюваної величини і характеризується високою точністю.

У *нульовому методі* вимірювану величину порівнюють з величиною, значення якої відомо, але різниця між ними зводиться до нуля шляхом зміни відомої величини. Застосовуваний у цьому методі вимірювальний прилад служить лише для установлення факту рівності двох величин або рівності нулеві їхньої різниці. Приклад: компенсаційний метод виміру термо-ЕРС, вимір опору урівноваженим мостом.

Нульовий метод забезпечує високу точність виміру, обумовлену, в основному, точністю завдання відомої величини, що врівноважує вимірювана величина.

1.2. Засоби вимірів, їх елементи і параметри

Засоби вимірів повинні мати нормовані метрологічні характеристики, тобто визначені чисельні значення величин і властивостей, що визначають точність і вірогідність вимірів.

Засіб виміру, призначений для виробітку сигналу вимірювальної інформації у формі, зручній для безпосереднього сприйняття спостерігачем, називається *вимірювальним приладом*. На вимірювальному приладі можна прочитати або відлічити чисельне значення вимірюваної величини.

Вимірювальні прилади бувають: аналогові й цифрові.

В аналогових вимірювальних приладах показання є безперервною функцією зміни вимірюваної величини, у цифровому вимірювальному приладі (надалі в. п.) показання представлені в цифровій формі, що є результатом дискретного перетворення сигналів вимірювальної інформації.

В. п. розділяються на такі, що показують, і такі, що реєструють. У в. п., що показує, значення зчитується за шкалою або цифровим табло. У в. п., що реєструють, передбачається реєстрація показань у вигляді запису на діаграмному папері або шляхом роздруківки в цифровій формі.

У вимірювальних приладах може здійснюватися інтегрування вимірювальної величини за часом або іншою незалежною змінною. *Вимірювальним перетворювачем* називається засіб виміру, який призначено для виробітку сигналу вимірювальної інформації у формі, зручній для передачі, перетворення, обробки або збереження, але не піддається безпосередньому сприйняттю спостерігачем. Людина своїми органами чуття не може сприйняти сигнал вимірювального перетворювача.

Коефіцієнт вимірювального перетворювача – це відношення сигналу на виході вимірювального перетворювача, що відображає вимірювану величину, до сигналу на вході перетворювача, що викликає його.

Первинним вимірювальним перетворювачем називається вимірювальний перетворювач, на вхід якого впливає вимірювальна величина. Часто первинні вимірювальні перетворювачі називають датчиками. Вимірювальні прилади і вимірювальні перетворювачі в залежності від роду вимірюваної величини мають відповідну назву:

термометри, манометри, диференціальні манометри, витратоміри, рівнеміри, вологоміри, газоаналізатори, концентратоміри тощо.

Відліковий пристрій аналогового в. п. складається зі шкали і показчика (стрілкового або світлового, рис. 1).

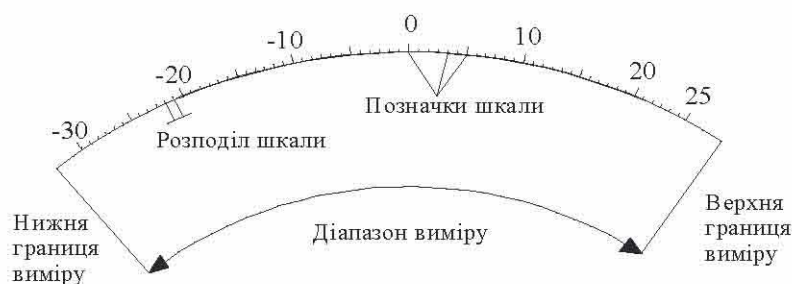


Рис. 1. Шкала вимірювального приладу

Ті позначки, у яких проставлено числові значення, називаються числовими позначками шкали (оцифрованими позначками). Проміжок між двома сусідніми позначками шкали називається поділкою шкали. Різниця значень величин, що відповідають двом сусіднім позначкам шкали, називається ціною розподілу шкали. Шкала з постійними поділками і з постійною ціною розподілу називається рівномірною шкалою.

Значення вимірюваної величини, визначене за відліковим пристроєм і виражене у прийнятих одиницях виміру величини, називаються *показаннями вимірювального приладу*. Найменше значення вимірюваної величини, зазначене на шкалі, називається *початковим значенням шкали*, а найбільше – *кінцевим значенням шкали*.

Область значення шкали, обмежена кінцевим і початковим значенням шкали, називається *діапазоном показань*.

Область значень вимірюваної величини, в якій допускають нормовані погрішності засобу, називається *діапазоном вимірів вимірювального приладу або вимірювального перетворювача*. У технічних приладах діапазон вимірів і діапазон показань, як правило, збігаються. *Межами вимірів* називається найбільше і найменше значення діапазону вимірів.

Шкали приладів бувають:

- однобічні;
- двобічні;
- безнульові.

В *однобічних шкалах* одна з меж виміру приладу дорівнює нулеві. Наприклад, шкала $0 \dots 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$, шкала $-0,1 \dots 0 \text{ МПа}$.

У *двобічних шкалах* нульове значення розташоване на шкалі: $-50 \dots 0 \dots 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $-1 \dots 0 \dots 0,15 \text{ МПа}$.

У *безнульових шкалах* на шкалі немає нульового значення: $200 \dots 600 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Крім окремих засобів виміру і вимірювальних систем застосовуються складні інформаційно-вимірювальні системи, що дозволяють не лише здійснювати автоматичний вимір у багатьох точках (число вимірювальних каналів може обчислюватися тисячами), але й робити необхідну обробку результатів виміру за заданими алгоритмами. У зв'язку з цим особливо гостро виникає необхідність уніфікації сигналів, що надходять на вхід вимірювальних перетворювачів і вхідних пристроїв інформаційно-обчислювальних машин. Уніфікація сигналів дозволить звести до мінімального різновиди вимірювальних приладів, забезпечить взаємозамінність засобів виміру.

У залежності від назви і ролі, яку вони виконують у процесі виміру, засоби виміру поділяються на робочі, зразкові і еталони.

Робочі системи вимірів призначені для практичних вимірів у всіх галузях народного господарства. Вони розподіляються на системи вимірів підвищеної точності й технічні.

Зразкові системи вирахування призначені для передачі розмірів одиниць фізичних величин від еталонів або інших точних систем вимірів робочим системам вимірів. Зразкові системи вимірів першого розряду перевіряються, як правило, безпосередньо за еталонами. Зразкові системи вимірів другого розряду перевіряються за зразковими системами виміру першого порядку і наступних розрядів. За зразковими системами вимірів перевіряють і градуують робочі системи вимірів.

Еталони служать для відтворення і збереження одиниць фізичних величин і передачі їх розмірів через зразкові робочим системам вимірів, які застосовуються у народному господарстві. У такий спосіб здійснюється система передачі розмірів одиниць фізичних величин від еталонів усім системам вимірів за допомогою зразкових систем вимірів.

1.3. Основні метрологічні поняття

Істинне значення фізичної величини – це значення, що ідеально відображає у якісному і кількісному співвідношеннях відповідну властивість об'єкта.

Дійсне значення фізичної величини – це значення знайдене експериментально і настільки наближене до істинного, що для даної мети може бути використане замість нього.

Ступінь наближення результатів виміру до істинного значення вимірюваної величини називається *точністю виміру*. Вірогідність вимірів кількісно оцінюють за величиною погрішності, під якою розуміють відхилення результатів виміру від істинного значення вимірюваної величини.

Погрішності поділяються на:

- систематичні;
- випадкові;
- промахи (грубі).

Систематичні – це погрішності, що залишаються постійними або змінюються за визначеним законом. Вони можуть бути вивчені і результат виміру може бути уточнений шляхом уведення виправлень. Найчастіше доводиться мати справу з систематичними інструментальними погрішностями і внаслідок зовнішніх причин. Постійні систематичні погрішності мають визначений знак (плюс або мінус).

Випадкові – це погрішності, що приймають при повторних вимірах різні взаємно незв'язані позитивні або негативні значення. Теорія імовірності називає випадковим таку подію, яка при реалізації даного комплексу умов може відбутися або не відбутися. Природа виникнення випадкових погрішностей у багатьох випадках не досить зрозуміла. Часто вони виникають з ряду причин, сумарний вплив яких, комбінуючись випадковим чином, створює помітні результуючі погрішності. Випадкові погрішності, як системні, не можна виключити з результатів виміру. Але при проведенні ряду повторних вимірів можна, користуючись теорією імовірності і математичної статистики, дещо уточнити результати виміру.

Промахи – грубі помилки допущені в процесі виміру, тобто погрішності, що істотно перевищують систематичні або випадкові погрішності, виправдані об'єктивними умовами виміру. Причинами промахів є найчастіше помилки спостерігача або несправність

пристроїв інформації. При констатації промахів відповідні виміри визнають недійсними.

Погрішності пристроїв інформації можуть бути:

- абсолютними (в одиницях вимірюваної величини x);
- відносними;
- приведеними.

Абсолютна погрішність виміру $\Delta = x - X$ – це алгебраїчна різниця між значеннями x , що отримали при вимірі, й істинним значенням X вимірюваної величини.

Відносна погрішність $\delta = \frac{100 \Delta}{x}$ виражається у відсотках (або частках його) від значень вимірюваної величини.

Приведена погрішність $\gamma = \frac{100 \Delta}{x_{\pi}}$ – це погрішність, що виражається у відсотках від будь-якого нормуючого значення x_{π} (найчастіше від діапазону виміру визначеного робочою частиною шкали пристрою). Наприклад, скляний термометр зі шкалою $-50 \dots +150$ °C має $\gamma_{\max} = \pm 1$ %. Це означає, що для будь-якої частини шкали термометра $\Delta = \pm 2$ °C. Якщо нижня межа виміру дорівнює нулеві, то приведена погрішність γ виражається у відсотках від верхньої межі вимірів.

Погрішність показань пристроїв інформації поділяють на:

- основні;
- додаткові.

Основною називають таку погрішність, яка властива пристрою, що знаходиться в нормальних умовах застосування (при визначеній температурі $t_{\text{оточ.серед.}}$, як правило 20 °C, прийнятому атмосферному тиску, заданій напрузі джерела живлення, у нормальному робочому положенні пристрою і т. д.)

Додатковою називають погрішність, яка виникає при відхиленні однієї з величин, що впливають, за межі встановлені для нормальної області їх значення (наприклад, при недосяжно високій $t_{\text{оточ.серед.}}$).

За наявності систем погрішностей показання пристроїв інформації може бути уточнене введенням поправки – величини, що повинна бути алгебраїчно додана до показань пристроїв інформації, щоб отримати дійсне значення. Виправлення дорівнює абсолютній погрішності узятій з протилежним знаком.

Однією з важливих метрологічних характеристик засобів виміру є клас точності – узагальнена характеристика засобів виміру, обумовлена межами допуску основних і додаткових погрішностей, а також іншими властивостями вимірів, що впливають на точність.

Найчастіше клас точності приймає значення рівне γ (наведена погрішність) у відсотках. Однак клас точності не є безпосереднім показником точних вимірів, виконуваних даною системою вирахування. Наприклад, для вимірювального приладу класу точності 1,5 межа основної погрішності, що допускається, складає $\pm 1,5 \%$ від діапазону виміру приладу, а дійсне значення основної точності конкретного приладу може мати значення $\leq 1,5 \%$.

При експериментальній оцінці якості роботи вимірювального приладу зустрічаємось з так званою варіацією показань. Варіацією називають невелику, отриману експериментально, різницю між повторними показаннями вимірювального приладу, що відповідає тому самому значенню вимірюваної величини при незмінних зовнішніх умовах.

Наприклад, провели три виміри температури кипіння води ($t_{\text{кип.вод}}, ^\circ\text{C}$) при сторонньому атмосферному тиску: 100,1; 99,8; 99,9. Варіація показання термометра дорівнює 0,3 $^\circ\text{C}$.

Під *чутливістю вимірювального приладу* розуміють здатність його реагувати на зміни вимірюваної величини. Наприклад, якщо зміна температури на 10 $^\circ\text{C}$ викликає переміщення кінця стрілки приладу на 8 мм, то чутливість його буде дорівнювати 0,8 мм/град (для даної ділянки шкали).

Порогом чутливості називають найменшу зміну вимірюваної величини, здатну викликати переміщення покажчика. Гранична чутливість виникає, насамперед, за рахунок тертя в кінематичних ланках.

Комплекс операцій, вироблених з метою оцінки вірогідності показання вимірювального приладу, називається *перевіркою*. Крім операцій по визначенню погрішностей і варіацій їх показань в обсяг перевірки входять: зовнішній огляд і випробування приладів, визначення опору електричної ізоляції, характеру заспокоєння рухомої частини, порога чутливості, якості запису показань і швидкості просування діаграмного паперу та інші операції, побічно зв'язані з оцінкою якості роботи приладу.

Контрольні завдання і запитання

1. Що називають вимірюванням?
2. Які вимірювання називаються прямими?
3. Які вимірювання називаються непрямими?
4. Що називають засобом вимірювальної техніки?
5. Назвіть методи, які використовуються у вимірювальній техніці.
6. Що називають вимірювальним приладом?
7. Що називають аналоговим вимірювальним приладом?
8. Що називають цифровим вимірювальним приладом?
9. Що називають вимірювальним перетворювачем?
10. Зобразіть відліковий пристрій аналого-вимірювального приладу.
11. Поясніть різницю між діапазоном показань та діапазоном вимірювань.
12. Перерахуйте види шкал аналогових вимірювальних приладів.
13. Що розуміють під інформаційною вимірювальною системою?
14. Призначення еталонів.
15. Призначення СІТ.
16. Призначення робочих СІТ.
17. Назвіть види похибок вимірювань.
18. Що називають абсолютною похибкою вимірювань?
19. Що називають відносною похибкою вимірювань?
20. Що називають приведеною похибкою вимірювань?
21. Що називають основною похибкою?
22. Що називають додатковою похибкою?
23. Що розуміють під класом точності СІТ?
24. Що називають варіацією вимірювань?
25. Що називають повіркою СІТ?

Вимір температур

2.1. Загальні відомості про температуру

Температура – це величина, що характеризує ступінь нагрівання тіла. Залежність між середньою кінетичною енергією молекул, що поступально рухаються, і температурою ідеального газу визначається виразом

$$E_{\text{сер. кін}} = \frac{3}{2} kT,$$

де k – постійна Больцмана, $k = 1,380 \cdot 10^{-23}$ Дж/К;

T – абсолютна температура тіла, К.

Якщо тіла мають різні температури, то при їх контакті відбувається вирівнювання енергії: тіло, що має більш високу температуру (велику $E_{\text{сер. кін}}$), передає свою теплоту (енергію) тілу, що має меншу температуру (меншу $E_{\text{сер. кін}}$).

Таким чином, температура є параметром, що характеризує як якісну, так і кількісну сторону процесів температурообміну, температуропереносу. Однак виміряти температуру безпосередньо неможливо; можна визначити її значення тільки за будь-якими іншими фізичними параметрами тіла, що змінюється однозначно залежно від температури. Такими параметрами, що залежать від температури є напруга, обсяг, довжина, електричний опір, термо-ЕРС, енергетична яскравість випромінювання тощо.

Уперше прилад для виміру температури був запропонований у 1598 р. Галілеєм. Пізніше Ломоносовим і Фаренгейтом були розроблені термометри, з'явилися шкали Реомюра і Цельсія. Усі ці температурні шкали будувалися таким чином: вибиралися дві опорні (реперні) точки. Як правило, для цього бралися точки фазової рівноваги

чистих речовин. Зміна термометричної властивості в інтервалі між реперними точками опроксесміювалась лінійною залежністю від температури:

$$T = T_0 + kC,$$

де T_0 – значення температури однієї з реперних точок;

k – коефіцієнт пропорційності, визначений за значеннями термометричних властивостей і температур у реперних точках;

C – значення термометричної властивості при температурі T .

У процесі досліджень було встановлено, що температурні шкали, побудовані на тих самих реперних точках, але при різних термометричних речовинах, давали різні значення температури. Це пояснюється тим, що термометричні властивості речовин по-різному змінюються зі зміною температури, причому всі ці залежності нелінійні. У зв'язку з цим виникла проблема створення температурної шкали, що не залежала б від термометричних властивостей речовин. Така шкала була запропонована в 1848 р. Кельвіном і називалася термодинамічною. В основу побудови шкали Кельвін поклав ідеальний цикл Карно, у якому робота, отримана в цьому циклі, залежить тільки від температури початку і кінця процесу. Таким чином, шкала Кельвіна не залежала від термометричних властивостей, однак для практичних вимірів температури вона була незручна: потрібно було або вимірювати кількість теплоти, або, при використанні термометрів, заповнюваних реальними газами, вводити для кожного значення температури різні виправлення.

2.2. Практичні температурні шкали

На сьогодні застосовується Міжнародна практична температурна шкала (МПТШ-68) редакції 1968 р. Відповідно до неї основною температурою є термодинамічна температура T , одиниця якої Кельвін (К) – $1/273,15$ – частина термодинамічної температури рівноваги між твердою, рідкою і газоподібною фазами води (потрійна точка води). Температура Цельсія $t = T - T_0$, де $T_0 = 273,15$ К.

Для вираження температури Цельсія застосовується одиниця – градус Цельсія ($^{\circ}\text{C}$), що дорівнює Кельвінові. Різниця температур визначених як у К, так і в $^{\circ}\text{C}$.

МПТШ-68 обрана таким чином, щоб температура, вимірювана за цією шкалою, була близька до термодинамічної температури з точністю, що забезпечується сучасними засобами вимірів.

МПТШ-68 заснована на значеннях температур, призначених одинадцятьом відтвореним станам рівноваги (основні постійні точки), і на спеціально атестованих інтерполяційних приладах. Інтерполяція між температурами постійних точок виконується за формулами, які служать для встановлення зв'язку між показаннями цих приладів і значеннями МПТ (міжнародної практичної температури).

Основні постійні точки відтворюють, здійснюючи стан рівноваги між фазами чистих речовин. У табл. 1 наведено стани рівноваги і привласнені їм значення температури визначених за термодинамічною шкалою. Таким чином МПТШ-68 побудована на постійних температурних точках, що можуть бути відтворені з необхідною точністю. Чисельне значення температур у цих постійних точках визначене на спеціальних установках еталонними засобами вимірів за термодинамічною шкалою. Значення температур між постійними точками визначається за допомогою еталонних засобів виміру за інтерполяційними формулами. За еталонними засобами виміру градуюють зразкові засоби виміру, а за зразковими градуюються робочі засоби вимірів МПТШ-68, що дозволяє визначити температуру робочими засобами виміру за термодинамічною шкалою з погрішністю, обумовленою методом виміру МПТШ-68, що забезпечує вимір температур в інтервалі 13,81... 6 300 К. Як еталон засобу виміру для області температур 13,81...903,89 К (630,74 $^{\circ}\text{C}$) застосовуються термометри опору, виготовлені з платиногого дроту. Для області температур 630,74...1064,43 $^{\circ}\text{C}$, як еталонне застосування, – платинородійплатиновий термоелектричний термометр. Для області температур 1337,58 К (1064,43 $^{\circ}\text{C}$)... 6 300 К застосовується квазімонохроматичний пірометр.

Крім МПТШ-68 установлені практичні температурні шкали, що призначені для здійснення однакових вимірів температур 0,01...100 000 К.

Для діапазону 0,01...0,8 К установлено температурну шкалу термометра магнітної сприйнятливості (ТШТМС), яка ґрунтується на

залежності магнітної сприйнятливості термометра з церій-магнієвого нітрату від температури.

Таблиця 1

Привласнені значення температури станам рівноваги між фазами

Стан рівноваги	Привласнені значення температури за термодинамічною шкалою	
	T, K	$T, ^\circ C$
Рівновага між твердою, рідинною і газоподібною фазами водню (потрійна точка водню)	13,810	-259,340
Рівновага між рідинною і газоподібною фазами водню при тиску 33 330,6 Па (25/76 нормального атмосферного тиску)	17,042	-256,108
Рівновага між рідинною і газоподібною фазами водню (точка кипіння водню)	20,280	-252,870
Рівновага між рідинною і газоподібною фазами неону (точка кипіння неону)	27,102	-246,048
Рівновага між твердою, рідинною газоподібною фазами кисню (потрійна точка кисню)	54,361	-218,789
Рівновага між рідинною і газоподібною фазами кисню (точка кипіння кисню)	90,188	-182,962
Рівновага між твердою, рідинною і газоподібною фазами води (потрійна точка води)	273,160	0,010
Рівновага між рідинною і пароподібною фазами води (точка кипіння води)	373,150	100,000
Рівновага між твердою і рідинною фазами цинку (точка затвердіння цинку)	692,730	419,580
Рівновага між твердою і рідинною фазами срібла (точка затвердіння срібла)	1 235,080	961,930
Рівновага між твердою і рідинною фазами золота (точка затвердіння золота)	1 337,580	164,430

У діапазоні від 0,8 до 1,5 К встановлено шкалу конденсаційного термометра He³ 1962 р., засновану на залежності тиску насичення пари ізотопу гелію-3 від температури.

У діапазоні від 1,5 до 4,2 К застосовується шкала конденсаційного термометра He^4 1958 р., заснована на залежності тиску насичених парів ізотопу гелію-4 від температури.

Температурна шкала германієвого термометра електричного опору (ТШГТС) заснована на залежності опору германієвого термометра від температури T і встановлена для діапазону 4,20...13,81 К. Температурна шкала пірометра мікрохвильового випромінювання (ТШПМИ) заснована на залежності спектральної щільності енергії випромінювання $L(T)$ чорного тіла від температури T у мікрохвильовому діапазоні випромінювання і встановлена для діапазону 6 300...10 000 К.

Контрольні завдання і запитання

1. Що характеризує температура?
2. Які параметри залежать від температури?
3. Назвіть основні шкали вимірювання температури.
4. Покажіть математичну залежність між абсолютною температурою та температурою за Цельсієм.
5. Назвіть основні засоби вимірювання температури.

Засоби вимірів температури

У наш час у різних галузях науки й промисловості застосовуються десятки різних засобів виміру. У табл. 2 наведено найбільш розповсюджені засоби виміру температури, і зазначено межі застосування серійних засобів виміру (у дужках зазначено межі виміру для спеціальних цілей).

Таблиця 2

Границі застосування промислових засобів виміру температури

Засоби вимірів	Межа тривалого застосування, °С	
	нижня	верхня
Термометри розширення:		
рідинні скляні	–200	600
манометричні	–200 (–272)	1 000
Термометри опору:		
металеві (провідникові)	–260	1 100
напівпровідникові	–272	600
Термометричні термометри:		
термoeлектричні	–200 (–270)	2 200 (2 800)
Пірометри:		
квазімонохроматичні	700	6 000 (100 000)
пірометри спектрального випромінювання	300	2 800
термометри повного випромінювання	–50	3 500

Засіб виміру температури, призначений для виробітку сигналу у формі зручній для сприйняття спостерігачем, автоматичної обробки, передачею і використанням АСУ називається термометром.

Засіб виміру температури за тепловим електромагнітним випромінюванням називається пірометром. Пірометри застосовуються для безконтактного виміру температури.

Термометром називається прилад (пристрій), який служить для виміру температури шляхом перетворення її в показання або сигнал, є відомою функцією температури. Чутливим елементом (надалі ч. е.) термометра називається частина термометра, що перетворює теплову енергію в інший вид енергії для одержання інформації за температурою. Розрізняють термометри контактні і безконтактні.

Пірометром називається безконтактний термометр, дія якого заснована на використанні теплового випромінювання нагрітих тіл.

Термокомплект – це вимірювальна установка, що складається з термометра, що не має власної шкали, і вторинного приладу, що перетворює вихідний сигнал термометра в чисельну величину.

3.1. Термометри розширення

Принцип їх дії заснований на розширенні термометричної рідини, вміщеної в термометр, залежно від температури.

Рідинний термометр (рис. 2) складається зі скляного балона 1, капілярної трубки 3 і запаяного резервуара 4. Термометрична речовина 2 заповнює балон і частково капілярну трубку. Вільний простір у капілярній трубці й у резервуарі заповнюється інертним газом або може знаходитися під вакуумом (при $t < +100\text{ }^{\circ}\text{C}$). Запаяний резервуар або виступаюча за верхнім розподілом шкали частина капілярної трубки служать для запобігання від псування при надмірному перегріві термометра.

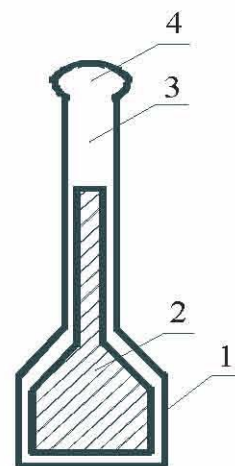


Рис. 2. Рідинний скляний термометр

Про температуру судять за величиною видимої зміни обсягу термометричної рідини. Температуру відраховують по висоті рівня в капілярній трубці. Градусна шкала наноситься або безпосередньо на зовнішню поверхню масивного товстостінного капіляра (київський манометр), або на спеціальну шкальну пластинку, яка розташовувана усередині

зовнішньої скляної оболонки термометра (із вкладеною шкалою), або на прикладну шкальну пластинку, до якої прикріплюється капілярна трубка.

Найбільшого поширення набули ртутні скляні термометри. Хімічно чиста ртуть, як термометрична речовина, має ряд переваг:

- залишається рідиною в широкому інтервалі температур;
- не змочує скло;
- легко може бути отримана в чистому вигляді.

Проте ртуть має відносно малий коефіцієнт об'ємного розширення, що вимагає виготовлення термометрів із тонкими капілярами. Нижня межа виміру ртутних термометрів $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ визначається температурою затвердіння ртуті. Верхня межа $+600\text{ }^{\circ}\text{C}$ визначається характеристикою скла.

У зв'язку з тим, що $t_{\text{кип}}$ ртуті при атмосферному тиску \leq верхньої межі застосування ртутних термометрів, у термометрах, призначених для виміру високих температур, капіляр над ртуттю заповнюється інертним газом (наприклад, азотом). При цьому для запобігання утворенню парів ртуті в капілярі тиск газу повинен бути тим більше, чим вище верхній рівень (межа) виміру. Для термометрів із верхньою межею виміру $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ тиск газу над ртуттю перевищує 3 МПа (30 кг/см^2).

Скляні термометри з іншими термометричними рідинами (табл. 3) застосовуються в інтервалі температур $-200\dots+200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Однак ці рідини змочують скло і тому вимагають застосування капілярів з відносно великим діаметром каналу.

Переваги рідинних скляних термометрів (р. с. т.):

- висока точність виміру;
- простота;
- дешевизна.

Недоліки р. с. т.:

- відносно погана видимість шкали;
- практична неможливість передачі показань на відстань і, отже, неможливість реєстрації показань;
- не підлягає ремонту.

На сьогодні випускають наступні різновиди р. с. т.:

Технічні ртутні термометри зі вкладеною шкалою – прямі і кутові. Випускається 11 модифікацій зі шкалами: $-90\dots+30$; $-60\dots+50$; $-30\dots+50$; $0\dots+100$; $0\dots+160$; $0\dots+200$; $0\dots+3\,000$;

0...+350; 0...+450; 0...+500; 0...+600 °C. Ціна поділки шкали складає від 0,5 °C (шкала –30...+50 °C), до 5 і 10 °C (шкала 0...+600 °C).

Таблиця 3

Межі застосування рідин у скляних термометрах

Рідина	Середня температура °C		Межа застосування, °C		Середній температурний коефіцієнт об'ємного розширення $10^5 \cdot K^{-1}$	
	затвердіння	кипіння	нижня	верхня	дійсний	видимий
Ртуть	–38,9	356,6	–35	600	18	16
Толуол	–97,2	109,8	–90	200	109	107
Етиловий спирт	–114,5	78,0	–80	70	105	103
Гас	–	До 325	–60	200	95	93
Петролейний ефір	–	До 70	–120	25	152	150
Пентан	–200,0	36,0	–200	20	92	90

Лабораторні ртутні термометри кийові зі вкладеною шкалою. Призначені для виміру температур –30...+600 °C . Ці термометри за- нурюються у вимірювальне середовище до відлічуваної температур- ної позначки. Вони підрозділяються на чотири групи. Термометри з ціною розподілу 0,1 °C мають діапазон виміру 55 °C (наприклад, 0...55 °C або 200...255 °C) з верхньою межею виміру ≤ 305 °C. Для великих діапазонів виміру 0...500 °C, 0...600 °C ціна розподілу шка- ли 2 °C.

Рідинні (не ртутні) термометри виконуються кийовими із вкла- деною шкалою та зовнішньою шкальною пластиною у межах виміру –200...+200 °C з ціною розподілу 0,2...5 °C.

Термометри ртутні підвищеної точності й зразкові випускають- ся з вузькими діапазонами виміру (4...50 °C) і з ціною розподілу 0,01...0,1 °C.

Термометри ртутні електроконтактні виготовляються для під- тримки постійної температури або сигналізації заданої температури в інтервалі –30...+300 °C. Термометри виготовляються з постійним

робочим і рухомим робочим контактами, що можуть бути встановлені на будь-якому значенні температури в межах шкали.

Спеціальні термометри: медичні, метеорологічні й іншого призначення.

Погрішності технічних термометрів, що допускаються, не повинні перевищувати розподілів шкали. Наприклад, при ціні розподілу $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ межа припустимої погрішності складає $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3.2. Манометричні термометри (МТ)

Принцип дії МТ заснований на залежності тиску термометричної речовини в герметично замкнутому обсязі від температури.

Термосистема манометричного термометра (рис. 3) складається з термобалона 1, капіляра 2 і манометричної пружини, один кінець якої з'єднаний з капіляром, а інший запаяний кінець пружини з'єднаний зі стрілкою вимірювального приладу.

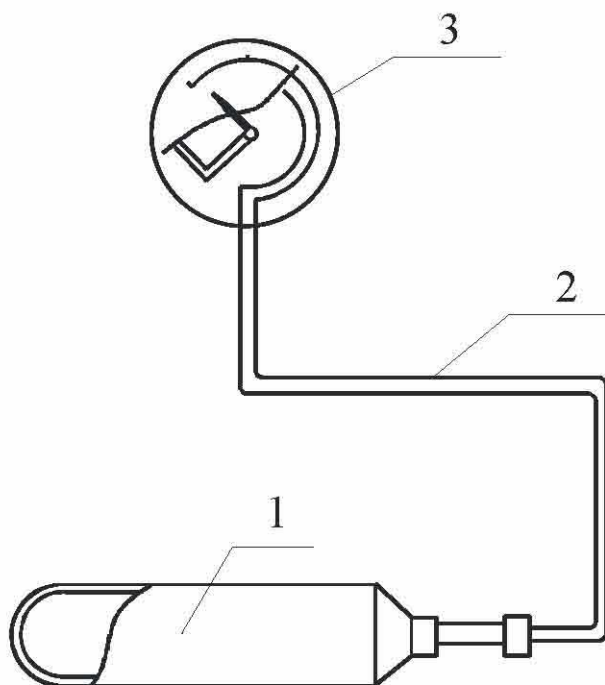


Рис. 3. Манометричний термометр

Термобалон, занурений у вимірюване середовище, і робоча речовина, що знаходиться в термобалоні, сприймає на себе температуру

вимірюваного середовища. У термосистемі встановлюється тиск, обумовлений температурою вимірюваного середовища. При підвищенні температури підвищується тиск, при зниженні знижується. Зміна тиску робочої речовини через гнучкий капіляр передається на вимірювальний прилад, що є пружинним манометром, розрахованим на ті діапазони виміру тиску, що мають місце.

Манометричні термометри залежно від виду робочої (термометричної) речовини, яка заповнює термосистему, розподіляються на *газові, рідинні і конденсаційні*. Манометричні термометри призначені для виміру температур $-200 \dots +600$ °С (конкретні діапазони виміру визначаються заповнювачем термосистеми). Термометри зі спеціальним заповнювачем застосовуються для виміру температур $100 \dots 1\,000$ °С.

Газові манометричні термометри призначені для виміру температури $-200 \dots +600$ °С. В якості робочої речовини в них застосовується азот. Залежність тиску газу від температури при постійному обсязі описується лінійним рівнянням

$$P_t = P_0(1 + \beta t),$$

де P_0 – тиск газу при температурі 0 °С;

β – температурний коефіцієнт розширення газу,

$$\beta = \frac{1}{273} = 0,00366 \text{ K}^{-1}.$$

Діапазон зміни робочого тиску в термосистемі може бути збільшений шляхом підвищення початкового тиску азоту в термосистемі. Це дозволить уніфікувати манометричні пружини, а також понизити барометричну погрішність манометричного термометра. Пружинні манометри вимірюють надлишковий тиск, тому зміна барометричного тиску може викликати зміну їхніх показань. Якщо вимірюваний тиск буде значним, то коливання барометричного тиску практично не буде впливати на показання приладу.

Для зниження впливу зміни $t_{\text{оточ}}$ повітря прагнуть понизити відношення внутрішнього обсягу пружини і капіляра до обсягу термобалона. З цією метою підвищують довжину термобалона або його діаметр. Довжина термобалона газового манометричного термометра

≤ 400 мм, а діаметр термобалона вибирається з ряду 5, 8, 10, 12, 16, 20, 25 і 30 мм (ДСТ 8624-80). Довжина капіляра може складати 0,6...60 м.

Для зниження температурної погрішності в деяких вимірювальних приладах установлюють термокомпенсатори. Спеціально виготовлені газові манометричні термометри можуть застосовуватись і для виміру температур більш низьких, ніж 0°C . Наприклад, водневий газ манометричного термометра може застосовувати до -250°C , а гелієвий до -267°C .

Рідинні манометричні термометри призначені для виміру температури $-150...+300^{\circ}\text{C}$. В якості робочої речовини застосовується ртуть, пропиловий спирт, метаксилол та інші рідини. Робоча речовина рідинних манометричних термометрів практично нестислива. У рідинних манометричних термометрах погрішність, викликана зміною барометричного тиску, як правило, відсутня, тому що тиск у системі значний. Погрішність, що викликана зміною температури навколишнього середовища, має місце й у рідинних манометричних термометрах. Для її зниження застосовують ті ж способи, що й у газових манометричних термометрах: знижують відносний обсяг рідини, що знаходиться при температурі навколишнього середовища, зменшуючи внутрішній обсяг термокапіляра і пружини або усередину вимірювального приладу вбудовують спеціальні термокомпенсатори погрішності.

У рідинних манометричних термометрах може мати місце гідростатична погрішність, яка виникає при різних рівнях розташування термобалона і вимірювального приладу. Для зниження можливих гідростатичних погрішностей довжину капіляра знижують до 10 м. Відстані, що допускаються по висоті між термобалоном і вимірювальним приладом, вказують в інструкціях до приладів.

Конденсаційні манометричні термометри призначені для виміру температури $-50...+300^{\circ}\text{C}$. Термобалон на $3/4$ заповнений низькокиплячою рідиною, а інша частина – насиченою парою цієї рідини. Кількість рідини в термобалоні повинна бути такою, щоб при t_{max} не вся рідина переходила в пару. Як робочу рідину застосовують фреон-22, пропілен, хлористий метил, ацетон і етилбензол. Капіляр і манометрична пружина заповнюються як правило іншою рідиною. Тиск у термосистемі КМТ буде дорівнювати тиску насиченої пари робочої рідини, що визначається у свою чергу температурою, при

якій знаходиться робоча рідина (тобто температура вимірюваного середовища з уміщеним у ній термобалоном). Ця залежність тиску насичення пари від температури має нелінійний вигляд, вона однозначна, якщо вимірювана температура менше $t_{\text{крит}}$.

У зв'язку з тим, що тиск у такій системі залежить тільки від вимірюваної температури, на показання КМТ не буде впливати температура навколишнього середовища. Гідростатична погрішність викликається різницею висот розташування термобалона і вимірювального приладу, причому ця погрішність буде залежати від показань приладу: на початку шкали вона буде більша, а наприкінці – менша. Довжина капіляра для зниження цієї погрішності ≤ 25 м.

Параметр погрішності в КМТ може мати місце на початковій ділянці шкали, коли тиск у термосистемі невеликий. В інших випадках впливом тиску можна знехтувати.

Спеціально виготовлені КМТ застосовуються для виміру наднизьких температур. КМТ, заповнені гелієм, використовуються для виміру температур від 0,8 К.

Переваги манометричних термометрів:

- простота пристрою;
- можливість дистанційної передачі й автоматичного запису;
- можливість використовувати в вогне- і вибухонебезпечних приміщеннях.

Недоліки:

- труднощі ремонту при розгерметизації системи;
- обмежена відстань дистанційної передачі показань;
- 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; 4.

3.3. Термоелектричні термометри (ТЕТ)

3.3.1. Основи теорії, термометричні ланцюги

Застосування термоелектричних термометрів для виміру температури ґрунтується на залежності термоелектрорушійної сили (термо-ЕРС) термопари від температури. Термо-ЕРС виникає в ланцюзі, що

складається з двох різнорідних провідників за нерівності температур у місцях з'єднання цих провідників (рис. 4).

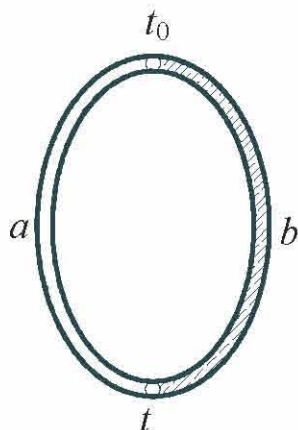


Рис. 4. Ланцюг з'єднання провідників a і b

Сучасна фізика пояснює термоелектричне явище в такий спосіб. З одного боку, унаслідок розходжень рівнів ферми в різних металах при їх стиканні виникає контактна різниця потенціалів. З іншого боку, концентрація вільних електронів у металі залежить від температури. За наявності різниці температур у провіднику виникає дифузія електронів, що приводить до утворення електричного поля. Таким чином, термо-ЕРС складається із суми стрибків потенціалу в контактах (спаях) термопари і суми змін потенціалу, викликаних дифузією електронів, і залежить від роду провідників та їх температури.

Якщо в ланцюзі (див. рис. 4) температури місць з'єднання провідників a і b будуть однакові і рівні t , то і різниці потенціалів будуть рівні за значенням, але мати різні знаки: $e_{ab}(t) = -e_{ba}(t)$, а сумарна термо-ЕРС і струм у ланцюзі будуть дорівнювати нулю:

$$E_{ab}(t, t) = e_{ab}(t) - e_{ab}(t) = 0. \quad (1)$$

Якщо $t \neq t_0$, то сума термо-ЕРС $\neq 0$:

$$E_{ab}(t, t_0) = e_{ab}(t) - e_{ab}(t_0) \neq 0, \quad (2)$$

тому що різниці потенціалів для тих самих провідників при різних температурах не рівні: $e_{ab}(t) \neq e_{ab}(t_0)$.

Результуюча термо-ЕРС залежить для даних параметрів a і b від температур t і t_0 . Щоб одержати однозначну залежність термо-ЕРС від вимірюваної температури t , необхідно іншу температуру t_0 підтримувати постійною. Для виміру термо-ЕРС у ланцюг ТЕТ включають вимірювальний прилад, причому його включення вводить у ланцюг принаймні ще один, третій провідник. Щоб з'ясувати, як впливає включення у ланцюг ТЕТ третього провідника, розглянемо ланцюг, що складається з трьох різних провідників a , b , c (рис. 5, a).

При рівності температури t усіх місць з'єднання термо-ЕРС

$$E_{a\bar{e}c}(t) = e_{a\bar{e}}(t) + e_{\bar{e}c}(t) + e_{ca}(t) = 0, \quad (3)$$

або

$$e_{a\bar{e}}(t) = -e_{\bar{e}c}(t) - e_{ca}(t).$$

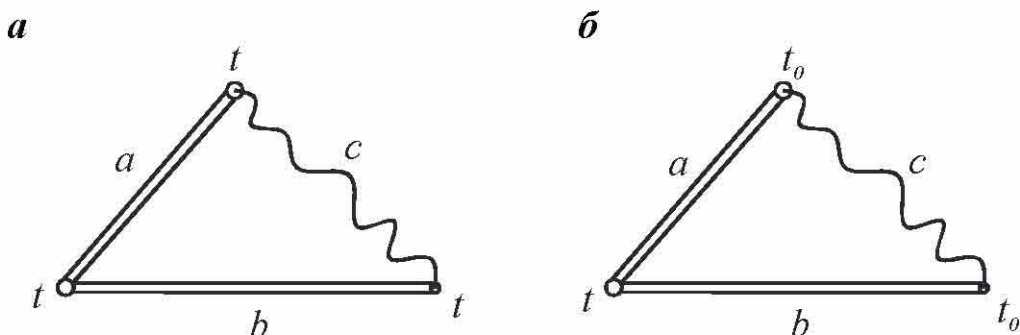


Рис. 5. Ланцюги, що складаються з трьох різних провідників a, b, c

Розглянемо термоелектричний ланцюг із трьох провідників, коли температура місця приєднання третього провідника c не дорівнює вимірюваній температурі (рис. 5, б)

$$E_{a\bar{e}c}(t, t_0) = e_{a\bar{e}}(t) + e_{\bar{e}c}(t_0) + e_{ca}(t_0) = 0. \quad (4)$$

Із (3) маємо, що

$$-e_{a\bar{e}}(t_0) = e_{\bar{e}c}(t_0) + e_{ca}(t),$$

тоді (4) можна записати так:

$$E(t, t_0) = e_{a\bar{e}}(t) + e_{a\bar{e}}(t_0) \quad (5)$$

тобто термо-ЕРС ланцюга, складена з трьох різнорідних провідників, не відрізняється від термо-ЕРС ланцюга з двох провідників, якщо температура місць під з'єднання третього провідника однакова. Із закономірностей включення третього провідника можна зробити висновки:

– включення одного, двох або декількох провідників у ланцюг ТЕТ не викликає перекручування термо-ЕРС термометра, якщо місця приєднання кожного з цих провідників будуть мати однакову температуру;

– робочий кінець ТЕТ можна виготовити шляхом зварювання або пайки, якщо температура у всіх точках спаю буде однакова.

На підставі викладеного можуть бути використані два варіанти включення вимірювального приладу в ланцюг ТЕТ: у розрив електрода (рис. 6, *а*) і в розрив спаю (рис. 6, *б*).

У першому випадку вимірювана температура (температура робочого кінця) буде t , температура вільних кінців, підтримувана постійно, t_0 і температури місць приєднання третього провідника з вимірювального приладу t' і t'' . Щоб не було перекручування значень термо-ЕРС, повинно бути $t' = t''$, а температура вільних кінців $t_0 = \text{const}$.

У другому випадку третій провідник із вимірювальним приладом включається в розрив вільних кінців, тому місця приєднання третього провідника одночасно є вільними кінцями ТЕТ. Ці температури повинні бути однакові, як кінці третього провідника, і постійні, як вільні кінці. Якщо виконано ці умови, то включення вимірювального приладу не перекручує термо-ЕРС термометра.

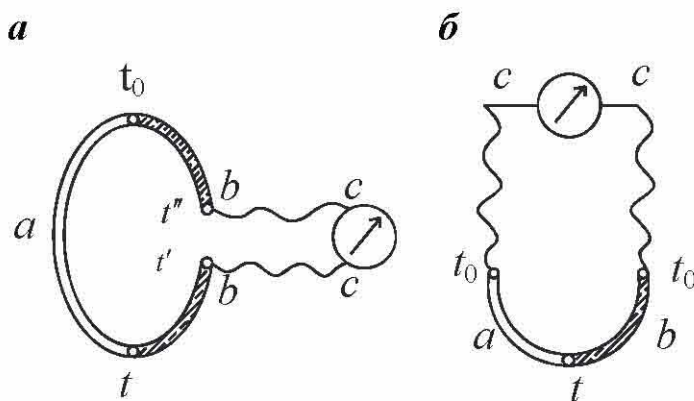


Рис. 6. ТЕТ з вимірювальним приладом

Для виміру температури за допомогою ТЕТ необхідно виміряти термо-ЕРС, яку розвиває термометр, і температуру вільних кінців. Якщо $t_{\text{в.к}}$ термометра при вимірі температури дорівнює $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, то вимірювана температура визначається відразу з градуйованої характеристики (рис. 7), що встановлює залежність термо-ЕРС від температури робочого спаю.

Градуйовані характеристики ТЕТ визначені, як правило, при $t_{\text{в.к.}}$, що дорівнює $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Якщо ж $t_{\text{в.к.}}$ не дорівнює $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, але залишається постійною, то для визначення температури робочого кінця за граду-йованою характеристикою необхідно знати не тільки термо-ЕРС, що розвивається термометром, але і $t_{\text{в.к.}}$ t_0 . Щоб ввести поправку на t_0 , яка не дорівнює $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, необхідно до термо-ЕРС, що розвивається ТЕТ $E(t, t_0)$, додати $E(t_0, t)$, щоб одержати $E(t, 0)$:

$$E(t, t_0) + E(t_0, t) = E(t, 0). \quad (6)$$

Таку термо-ЕРС $E(t, 0)$ розвивають ТЕТ при $t_{\text{роб.спаю}} = t$ і $t_{\text{в.к.}} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, тобто за умов градуювання.

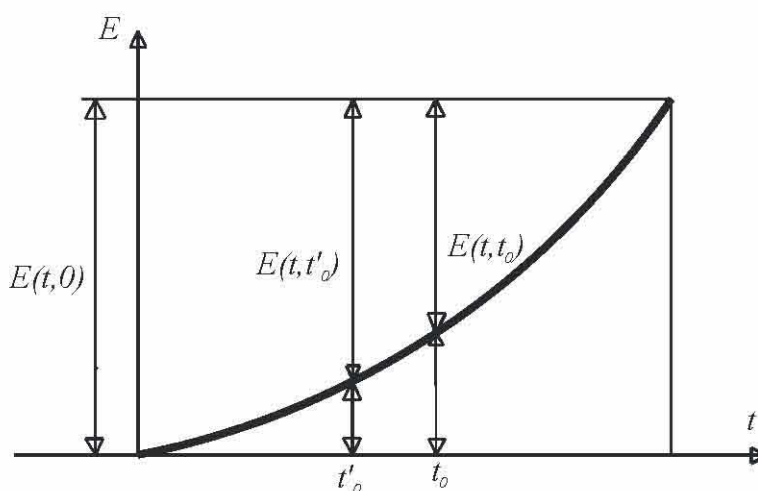


Рис. 7. Графічна залежність термо-ЕРС від температури робочого спаю

Якщо в процесі виміру $t_{\text{в.к.}}$ набуде якогось нового значення t'_0 , то термо-ЕРС, що розвивається термометром, буде $E(t, t'_0)$ (див. рис. 7) і величина поправки на $t_{\text{в.к.}}$ буде $E(t'_0, 0)$, а термо-ЕРС – відповідаючи умовам градуювання:

$$E(t, t'_0) + E(t'_0, 0) = E(t, 0). \quad (7)$$

Значення поправки на $t_{\text{в.к.}}$ ТЕТ залежить від градуйованої характеристики термометра, обумовленої матеріалами провідників, з якого виготовлений ТЕТ. Незалежно від способу введення поправки (розрахункового або автоматичного) методика введення поправки залишається незмінною: визначається розрахунковим шляхом або

автоматично в схемі отримується значення $E(t_0, 0)$, яке потім шумується з термо-ЕРС термопар. Сумарна термо-ЕРС відповідає граду-йованому значенню.

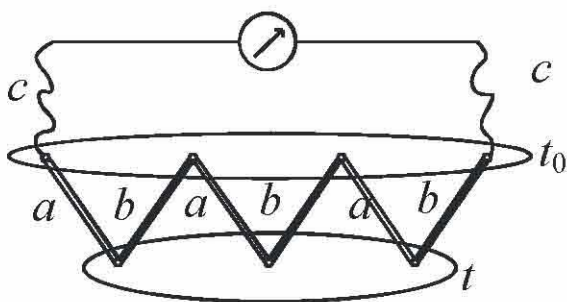


Рис. 8. Термобатарея

Для вирішення окремих задач вимірів температури застосову-ються різні способи з'єднання термоелектричних термометрів. Найбільш поширені – термобата-рея (рис. 8) і диференціальна тер-мопара.

Для збільшення коефіцієнта перетворення термоелектричного термометра застосовують послі-довне включення декількох термопар (термобатарею). При цьому термо-ЕРС, що розвивається термопарами, сумується, тобто термо-ЕРС термобатареї з n термопар у n раз більше термо-ЕРС окремої термопар.

Таке включення застосовується для вимірів при малих різницях $t-t_0$ кінців. Однак, як правило, температури в різних точках розташу-вання робочих і вільних кінців не зовсім однакові внаслідок неодно-рідності температурних полів. Тому термобатарея, збільшуючи тер-мо-ЕРС термометра, дозволяє понизити погрішність виміру термо-ЕРС, але істотно не підвищує точність виміру температури.

У деяких випадках виникає необхідність виміру різниці темпера-тур у двох точках. Для цього розташовуємо робочий спай температу-ри у двох точках, а вільні кінці – в іншій точці (рис. 9).

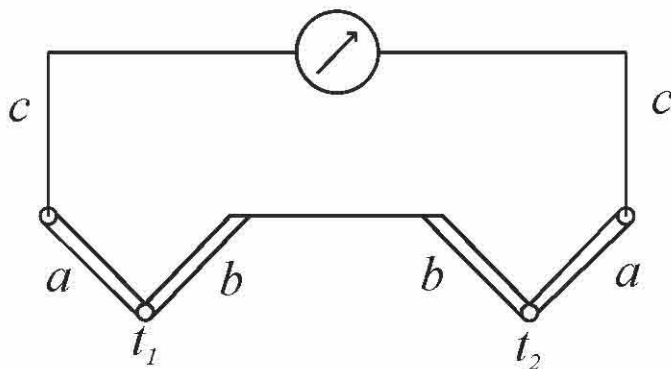


Рис. 9. Диференційна ТЕТ

Тоді

$$E(t_1, t_2) = e(t_1) - e(t_2). \tag{8}$$

Якщо в інтервалі $(t_1 - t_2)$ залежність термо-ЕРС від температури може бути апроксимована лінійною залежністю, то рівняння (8) матиме вигляд:

$$E(t_1, t_2) = k(t_1 - t_2).$$

Така лінійна апроксимація звичайно справедлива для будь-якої термопари за різниці $m - p \leq 20 \dots 25$ °С.

3.3.2. Будова ТЕТ і матеріали, які застосовуються

До матеріалів ТЕТ висуваються наступні вимоги: жаростійкість, жароміцність, хімічна стійкість, відтворюваність, стабільність, однозначність і лінійність градуйованої характеристики тощо.

Серед них є обов'язкові і бажані вимоги. До числа обов'язкових вимог належать стабільність градуйованої характеристики (для стандартних термометрів) і відтворюваність у необхідних кількостях матеріалів, для яких характерні цілком визначені термоелектричні властивості. Всі інші вимоги є бажаними.

Наприклад, досить жароміцні матеріали можуть бути відтворені з однозначною і лінійною градуйованою характеристикою і високим коефіцієнтом перетворення. Але, якщо градуйована характеристика цих матеріалів не стабільна, то виміряти таким термометром **не можна!** З іншого боку, матеріали, що мають низький коефіцієнт перетворення, нелінійну градуйовану характеристику, але мають стабільну характеристику, використовуються для ТЕТ.

У відповідності до норм застосовуються наступні стандартні ТЕТ (табл. 4).

Мідь–копелеві і мідь–мідно–нікелеві типу Т (близькі до мідь–константанових) ТЕТ застосовуються головним чином для виміру низьких температур у промисловості і лабораторній практиці. Застосування цих термометрів для $t < -200$ °С ускладнюється істотним зниженням коефіцієнту перетворення зі зниженням температури. При $t > 400$ °С починається інтенсивне окислювання міді, що обмежує застосування цих типів термометрів.

Залізо–мідно–нікелеві (близькі до залізо–константанових) ТЕТ типу J застосовуються в широкому діапазоні температур

$-200 \dots +700$ °C, а короткочасно – і до 900 °C. Вони мають досить великий коефіцієнт перетворення (~ 55 мкВт/°C). Верхня межа виміру обмежена окислюванням заліза і мідно-нікелевого сплаву.

Таблиця 4

Характеристики стандартних ТЕТ

Тип термопари ТЕТ	Позначення нове (старе)	Робочий діапазон тривалості режи- му роботи, °C	t_{\max} короткоча- сного режиму роботи, °C
Мідь–копелева	–	$-200 \dots +100$	–
Мідь–мідно–нікелева	T	$-200 \dots +400$	–
Залізо–мідно–нікелева	J	$-200 \dots +700$	900
Хромель–копелева	(ХК)	$-50 \dots +600$	800
Нікель–хром–мідно–нікелева	E	$-100 \dots +700$	900
Нікель–хром–нікель–алюмінієва (хромель–алюмелева)	K (ХА)	$-200 \dots +1\,000$	1\,300
Платинорадій (10 %)–платинова	S	$0 \dots +1\,300$	1\,600
Платинорадій (30 %)–платинора- дієва (6 %)	B (ПР)	$300 \dots 1\,600$	1\,800
Вольфрамрений (5 %)– вольфрам- ренієва (20 %)	(ВР)	$0 \dots 2\,200$	2\,500

Хромель–копелеві ТЕТ мають найбільший коефіцієнт перетворення з усіх стандартних термометрів ($\sim 70 \dots 90$ мкВт/°C). Для термометрів із термоелектродами діаметром < 1 мм верхня межа тривалості застосування < 600 °C і складає, наприклад, для термоелектродів $d = 0,2 \text{--} 0,3$ мм тільки 400 °C. Верхня межа застосування визначається стабільністю характеристик копелевого термоелектрода.

Нікель–хром–мідно–нікелеві типу E (близькі до хромель–константанових) і нікель–хром–нікель–алюмінієві типу K термометри (попередня назва хромель–алюмелеві) застосовуються для виміру температури різних середовищ у широкому інтервалі температур. Термоелектрод з нікель–алюмінієвого дроту менш стійкий до окислювання, ніж нікель–хромовий. Для термоелектродів $d = 3 \dots 5$ мм верхня межа тривалого застосування нікель–хром–нікель–алюмінієвих

термометрів складає 1 000 °С, а для $d = 0,2-0,3$ мм – не більше 600 °С. Для нікель-хром–мідно-нікелевої термопари він ≤ 700 °С.

Усі розглянуті ТЕТ із неблагородних металів добре стоять в інертній і відбудовній атмосфері, а в окисній – термін служби обмежений. Крім того, ТЕТ хромель–копелеві і нікель-хром–нікель-алюмінієві відрізняються досить високою стабільністю градуйованої характеристики при високій інтенсивності іонізуючих випромінювань.

Платино-радій-платинові ТЕТ типу S можуть тривалий час працювати в інтервалі температур 0...1300 °С, а короткочасно – 1600 °С. Позитивний термоелектрон, представлений сплавами, складається на 10 % з родію, на 90 % із платини; негативний – з чистої платини. Ці термометри зберігають стабільність градуйованої характеристики в окисному і нейтральному середовищах. У відбудовній атмосфері ці ТЕТ працювати не можуть, тому що відбувається істотна зміна термо-ЕРС термометра. Неприятливо впливають на ці термометри також контакти із вуглецем, парами металів, з'єднаннями вуглецю С та кремнію Si, а також із рядом інших металів, що забруднюють термоелектроди. Відзначимо, що градуйована характеристика типу S не збігається з градуйованою характеристикою типу ПП, що застосовувалася раніше.

Платинорадій–платинорадієва ТЕТ типу В застосовується довгостроково в інтервалі 300...1600 °С, а короткочасно – до 1800 °С. Позитивний електрод – сплав із 30 % радію і 70 % платини, а негативний – з 6 % радію і 94 % платини. Ці термометри характеризуються більшою стабільністю градуйованої характеристики ніж платино-радій–платинові, але в той же час вони погано працюють у відбудовному середовищі. У зв'язку з тим, що термо-ЕРС, яка розвивається цими термометрами в інтервалі температур 0...100 °С, незначна, при технічних вимірах їх можна застосовувати без термостатування вільних кінців. Наприклад, якщо $t_{в.к} = 70$ °С, то виправлення на неї не вводиться, що при $t_{роб.стаю} = 1600$ °С викликає погрішність $\sim 2,1$ °С.

Зауважимо також, що градуйована характеристика типу В не збігається з градуйованою характеристикою ПР.

Вольфрамрений–вольфрамренієві ТЕТ призначені для тривалого виміру температури 0...2 200 °С і короткочасно – до 2 500 °С у вакуумі, нейтральному і відбудовному середовищі. Позитивний електрод – сплав із 95 % W і 5 % Re, негативний – із 80 % W і 20 % Re.

Крім стандартних ТЕТ, знаходять застосування в особливих умовах і нестандартні ТЕТ, що або не відповідають вимогам відтворюваності, або не мають досить стабільної градуйованої характеристики. До них відносяться високотемпературні термометри:

- дисиліцид Мо (MoSi_2) і дисиліцид W (WSi_2) – для виміру температур агресивних газових середовищ і деяких розплавів до $1700\text{ }^\circ\text{C}$;

- вуглець С–борид Zr (ZrB_2) – для виміру температур рідких металів до $1800\text{ }^\circ\text{C}$;

- вуглець С–карбід Ti (TiC) – для виміру неокислювальних газових середовищ до $2500\text{ }^\circ\text{C}$;

- карбід ніобію (NbC)–карбід цирконію (ZrC) – для виміру температур у відбудовному та інертному середовищі або у вакуумі до $3000\text{ }^\circ\text{C}$.

Для виміру низьких температур до $-270\text{ }^\circ\text{C}$ у промислових установках застосовують золото-залізо(AuFe)–нікель-хромову (NiCr) термопару, що практично не змінює свого коефіцієнта перетворення в інтервалі температур $-200\dots-270\text{ }^\circ\text{C}$.

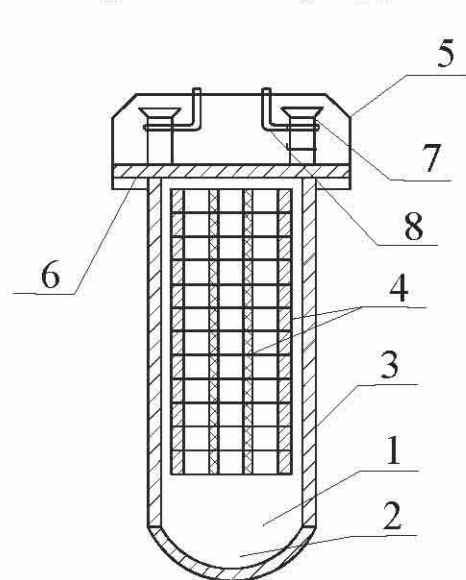


Рис. 10. Будова ТЕТ

На рис. 10 показано будову ТЕТ.

Термоелектроди 1 розташовані так, що їх спай 2 торкається захисного чохла 3. На термоелектроди 1 одягнені ізоляційні намісти 4. На кінці захисного чохла кріпиться головка термометра 5. У головці розташована колодка 6 із затисками 7 для термоелектродів і з'єднувальних проводів 8. Робочий спай найчастіше виготовляють шляхом зварювання або пайки (в окремих випадках), а для W-Re термометрів застосовують скрутку. В окремих конструкціях термоелектроди приварюють до захисного чохла. Електрична ізоляція виконується матеріалами, що зберігають свої ізоляційні властивості за відповідних температур і не забруднюють термоелектроди. До $1300\text{ }^\circ\text{C}$ застосовують частіше фарфорові одно- і двоканальні трубки і з намістом. Для більш високих температур застосовується наміст із окису алюмінію та інших ізоляційних матеріалів.

Для захисту термоелектродів від впливу вимірюваного середовища їх розміщують у захисний чохол із газонепроникних матеріалів, що витримують необхідно високі температури і тиски середовища. До $t = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ захисні чохла виготовляють з різних марок сталі. При більш високих температурах застосовують спеціальні чохла з тугоплавких з'єднань. Для виміру температури сталі, чавуна і відбудовного газового середовища до $1700\text{ }^{\circ}\text{C}$ застосовують захисні чохла з дисциліда Мо.

Більшість конструкцій захисної арматури ТЕТ у наш час уніфіковано. Вони різняться в основному конструкціями захисних чохла, розрахованих на різні тиски, і конструкціями штуцерів. Головка до захисних чохла для багатьох модифікацій одна й та ж сама.

В останні роки широкого поширення набувають ТЕТ кабельного типу. Вони являють собою два термоелектрода, вміщених у тонкостінну оболонку. Об'єм між термоелектродами й оболонками заповнений спеціальним ізолюючим насипом (порошок Mg або Al_2O_3). Оболонка виготовлена з нержавіючої або жароміцної сталі. Зовнішній діаметр оболонки $0,5 \dots 6,0\text{ мм}$, довжина – до 25 м . Випускають хромель-алюмелеві і хромель-копелеві термоперетворювачі з ізолюваним (рис. 11, а) та неізолюваним (рис. 11, б) спаями.

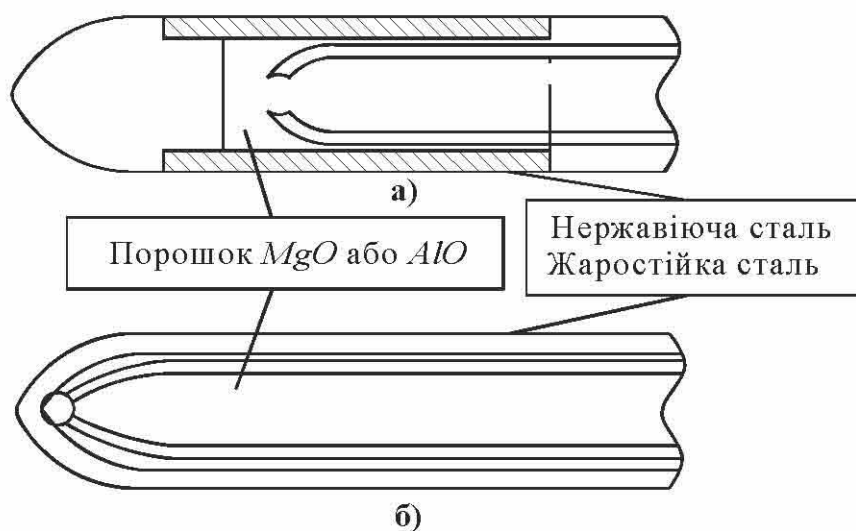


Рис. 11. Термоперетворювачі з ізолюваним (а) та неізолюваним (б) спаями

Вони застосовуються в інтервалі температур $-50 \dots +900\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в оболонках із жароміцної сталі – до $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$) при тиску до 40 Мпа .

Істотною перевагою термометрів кабельного типу є їхня радіаційна стійкість, що дозволяє їм працювати в енергетичних реакторах АЕС, а також підвищена стійкість до теплових ударів, вібрацій і механічних навантажень.

3.3.3. Подовжувальні термоелектродні дроти

Досить часто виникає необхідність подовжити ТЕТ, не спотворюючи його термо-ЕРС. Досягається це за допомогою подовжувальних дротів, що повинні мати визначені властивості, щоб виключити появу паразитної термо-ЕРС. Таке можливо, якщо проводи будуть мати ту ж градуйовану характеристику, що і сам термометр.

Подовжувальні термоелектродні дроти виготовляються одно- і багатожильними, в ізоляції та з зовнішнім покриттям або оболонкою, зручними для монтажу і прокладки. Для ізоляції застосовують полівінілхлорид, поліетилентерефталатну і фторопластову плівку. Крім ізоляції дріт часто покривають полівінілхлоридною оболонкою або оплітком з лавсанових ниток або склониток. Якщо потрібен захист від зовнішніх електромагнітних полів і механічних впливів застосовують оплітку або екран із мідних або сталевих дротів.

Кожен матеріал проводу має свій колір ізоляції або кольорові нитки в обмотці й оплітку проводу.

3.4. Мілівольтметри

На сьогодні для виміру термо-ЕРС ТЕТ-ами найбільшого розповсюдження отримали магнітоелектричні мілівольтметри (рис. 12), потенціометри – автоматичні і з ручним керуванням та нормуючі перетворювачі.

Магнітоелектричні мілівольтметри використовуються для виміру температур у комплекті з ТЕТ-ми. Принцип дії мілівольтметра заснований на взаємодії струму, що проходить через рухома рамку приладу, з магнітним полем постійного магніту. Напрямок сили, що діє на провідник у магнітному полі, визначається правилом лівої руки,

а її значення $F = lBI$, де l – довжина провідника, м; B – магнітна індукція, Т; I – сила струму в провіднику, А.

Полюсні наконечники постійного магніту роблять концентричними з сердечником, розташованим усередині рамки, що складається з n витків розміром $1 \times 2R$. Рамка, яка обертається в зазорі між наконечниками і сердечником, завжди розташовується паралельно магнітно-силовим лініям так, що

$$M_{об} = 2RnF = 2nlRBI.$$

Щоб кут повороту рамки був пропорційний силі біжучого по ній струму, необхідно прикласти до рамки момент протидії, пропорційний куту повороту рамки. Такий момент створюється спіральними пружинами (або підвіскою), що з'єднуються з віссю рамки:

$$M_{hp} = C\varphi,$$

де C – питомий момент протидії;

φ – кут повороту рамки.

При проходженні струму рамка з прикріпленою до неї стрілкою почне повертатися доти, поки не буде виконана умова: $M_{кр} = M_{пр}$ або $2lnRBI = C\varphi$, звідки $\varphi = \frac{2lnRBI}{C} = SI$. Коефіцієнт $S = \varphi/I$ – чутливість приладу.

Основні частини мілівольтметра: постійний магніт із полюсними наконечниками, сердечник із магніто-м'якої сталі, рамка з великою кількістю витків (як правило, мідного дроту), скріплених лаком. Рамка жорстко скріплена зі стрілкою й утворює рухому систему мілівольтметра, що може повертатися навколо своєї осі. Підведення струму до рамки здійснюється через спіральні пружинки, що одним кінцем з'єднані з рамкою, а іншим – з нерухомими контактами. Послідовно з рамкою включений додатковий резистор. Тертя в опорах рамки є однією з причин погрішності мілівольтметра, воно ж викликає варіацію. У приладах високої чутливості замість стрілки встановлюється дзеркало для світлового показника кута повороту, а рухлива система кріпиться на розтяжках або підвісках.

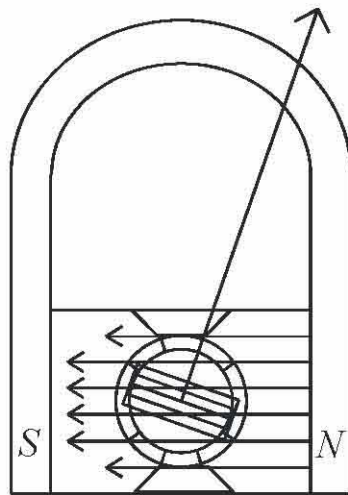


Рис. 12. Магнітоелектричний мілівольтметр

Мілівольтметри застосовуються для виміру термо-ЕРС ТЕТ в промисловості і лабораторній практиці. Вони можуть бути показувальними, самописними і регулюючими. За конструкторським виконанням прилади бувають щитовими і переносними. Для переносних приладів установлені наступні класи точності: 0,2; 0,5 і 1,0; для щитових – 0,5; 1,0 і 1,5.

На шкалі мілівольтметра вказується градування ТЕТ (або термометра повного випромінювання), у комплекті з якими він повинен працювати. Шкали можуть починатися як від $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, так і від інших значень. Внутрішній опір мілівольтметра для класу точності 0,2; 0,5; 1,0 і 1,5 повинен бути відповідно не менше 500; 300 і 200 Ом. Відхилення температури навколишнього повітря від нормальної викликає додаткові погрішності, що можуть сягати 0,5 межі основної погрішності на кожні $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ відхилення температури.

3.4.1. Вимір термо-ЕРС мілівольтметром

Термо-ЕРС ТЕТ-а однозначно залежить від температури робочого спаю, якщо $t_{\text{св.к}} = \text{const}$. Коли термо-ЕРС термометра вимірюється мілівольтметром, варто мати на увазі, що фактично мілівольтметр вимірює не термо-ЕРС термометра, а струм, що протікає по рамці приладу. Тому для однозначної залежності між термо-ЕРС і показаннями мілівольтметра необхідно, щоб опір усього ланцюга ТЕТ – мілівольтметр був постійним. Якщо при цьому додати вимоги правильності показань, то необхідно, щоб опір усього ланцюга був не тільки постійним, але й дорівнював градуйованому значенню, тобто дорівнював тому значенню опору усього ланцюга, що було при градуванні мілівольтметра: $R_{\text{ц}} = R_{\text{град}} = \text{const}$.

На схемі (рис. 13) ТЕТ 1 підключається до мілівольтметра 2 подовжувальними термоелектродними 3 і з'єднувальними 4 дротами. Для пригонки опору зовнішнього ланцюга до градуйованого значення застосовується підгінна котушка $R_{\text{п.к}}$. Зміна показань мілівольтметра може бути пов'язана як зі змінами R зовнішнього ланцюга, куди входять опори термометра $R_{\text{т}}$, з'єднувальних і подовжувальних дротів $R_{\text{з.д}}$ і $R_{\text{п.д}}$, так і зміни опору самого мілівольтметра $R_{\text{м.в}}$. Щоб знизити вплив зміни опору зовнішнього ланцюга на показання мілівольтметра, необхідно понизити $R_{\text{т}}$, $R_{\text{з.д}}$ і $R_{\text{п.д}}$, щоб їх част-

ка в загальному опорі усього ланцюга ТЕТ–мілівольтметр була незначною. Для цього термоелектроди термометра виготовляють у більшості випадків із дроту $d = 2-3$ мм, а подовжувальні і з'єднувальні дроти перетином $2,0 \dots 2,5$ мм². У цьому випадку опір зовнішнього ланцюга $\leq 3 \dots 5$ Ом. Як уже зазначалося, для однозначної залежності показань мілівольтметра від термо-ЕРС опір усього ланцюга ТЕТ–мілівольтметр повинен бути постійним і дорівнювати градуйованому значенню. Для забезпечення цієї сталості мілівольтметр, як правило, встановлюється у приміщенні з меншими коливаннями температури, ніж у з'єднувальних і подовжувальних дротах, а його опір робиться в сотні разів більшим, ніж опір зовнішнього ланцюга: $R_{\text{м.в.}} \gg R_{\text{зов.ланц.}}$.

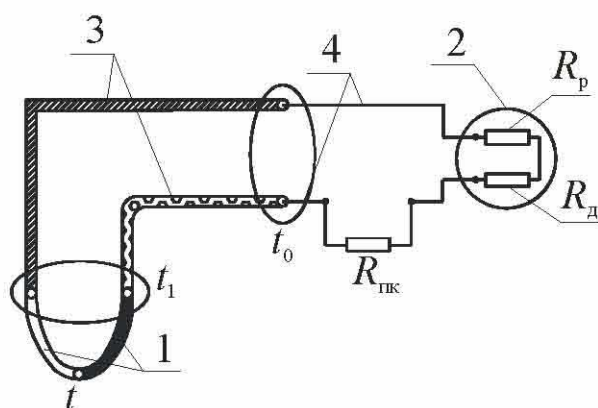


Рис. 13. Схема підключення ТЕТ до мілівольтметра

Внутрішній опір мілівольтметра може змінюватись від $t_{\text{навк.повітря}}$. Але температурний коефіцієнт мілівольтметра зменшено за рахунок додаткового манганінового опору. Таким чином, зміна опору ланцюга ТЕТ–мілівольтметр, що викликана зміною температури навколишнього середовища, істотно знижується, а разом з нею знижуються і температурні погрішності системи ТЕТ–мілівольтметр.

Крім опору вимірювального ланцюга, на показання мілівольтметра можуть впливати наступні фактори: електростатичні заряди, які можуть утворюватися на склі приладу; зовнішні магнітні поля від інших приладів і феромагнітного щита; зміна нахилу приладу щодо рекомендованого ТУ положення.

Якщо $t_{\text{вільн.к}} \neq 0^\circ\text{C}$, то необхідно вводити виправлення на зміну термо-ЕРС відносно градуйованого значення. У промислових умовах намагаються розташувати вільні кінці ТЕТ у таких місцях, де температура мало змінюється. У цьому випадку постійну за значенням

поправку на температуру вільних кінців можна ввести шляхом зсуву коректором стрілки мілівольтметра на позначку, що відповідає $t_{\text{вільн.к.}}$.

Однак у цілому ряді випадків зміни температури з обох кінців виявляються значними. Тоді застосовують пристрій для автоматичного уведення поправок на $t_{\text{вільн.к.}}$. Цей пристрій являє собою мостову схему, що живиться постійним струмом (рис. 14).

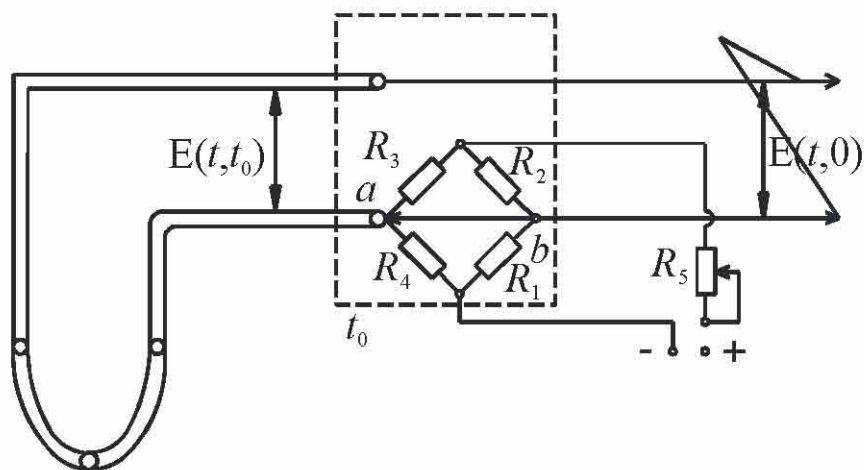


Рис. 14. Мостова схема з'єднання ТЕТ із вимірювальним приладом

Три плеча моста R_1 , R_2 , R_3 виконані з манганіну, а четверте R_4 – з міді, що змінює свій опір у залежності від температури. При $t_0 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ міст знаходиться в рівновазі. Якщо $t_0 \neq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, то між вершинами a і b виникне різниця потенціалів U_{ab} . При цьому повинна виконуватись умова $U_{ab} = E(t_0, 0)$. Резистор R_5 може бути використаний як для корегування сигналів U_{ab} , так і за потреби його істотної зміни, наприклад, при переході від одного градування термометра до іншого. Таким чином різниця потенціалів U_{ab} змінюється залежно від температури так само, як і термо-ЕРС термометра. Напруга U_{ab} дорівнює значенню поправки на $t_{\text{вільн.к.}}$ $E(t_0, 0)$. Вільні кінці ТЕТ-у розташовуються на затисках цього пристрою, тобто $t_{\text{вільн.к.}}$ термометра і температура пристрою дорівнюють t_0 , щоб U_{ab} відповідало саме тій поправці, яку треба вводити для даного виправлення $t_{\text{вільн.к.}}$. Пристрій для автоматичного уведення поправки включається послідовно з ТЕТ-м так, щоб поправка $U_{ab} = E(t_0, 0)$ підсумовувалась з термо-ЕРС ТЕТ-а. Таким чином, на вході у вимірювальний прилад сигнал дорівнює $E(t, 0)$. Такий спосіб автоматичного уведення виправлення

на $t_{\text{вільн.к}}$ ТЕТ-а застосовується при вимірі термо-ЕРС мілівольтметра у різних вимірювальних перетворювачах й інших засобах виміру.

Насправді $U_{ab} \neq E(t_0, 0)$, а визначається за формулою

$$U_{\text{м.в}} = IR_{\text{м.в}} = E(t, 0) \frac{R_{\text{м.в}}}{R_{\text{м.в}} + R_{\text{вн}}},$$

$$R_{\text{вн}} = R_{\text{з.д}} + R_{\text{п.д}} + R_{\text{п.к}}.$$

При цьому може мати місце погрішність викликана невідповідністю U_{ab} і $E(t, 0)$ у широкому діапазоні зміни температури, тому що зміна різниці потенціалів на вершинах моста U_{ab} зі зміною температури t не ідеально відтворює градуйовану характеристику термометра $E(t, 0)$.

3.5. Компенсаційний метод виміру термо-ЕРС

Компенсаційний метод виміру термо-ЕРС заснований на врівноважуванні вимірюваної ЕРС спаданням напруги, значення якої може бути визначено.

На схемі (рис. 15) джерело термо-ЕРС E_T підключене до ділянки напруги R_p , що живиться від джерела живлення E таким чином, що спадання напруги на ділянці U_{ae} включено назустріч E_T . Переміщаючи движок ділянки, можна знайти положення, коли $U_{ae} = E_T$. У цьому випадку термо-ЕРС E_T буде врівноважена спаданням напруги U_{ae} , яка у ланцюзі джерела термо-ЕРС (наприклад, ТЕТ-а) буде відсутня, і високочутливий нуль-гальванометр НГ покаже нуль.

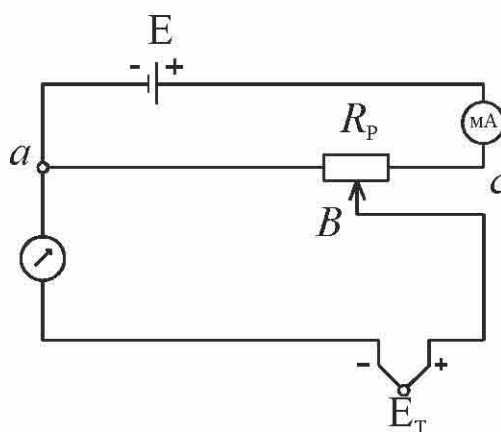


Рис. 15. Схема виміру термо-ЕРС компенсаційним методом

Головна перевага компенсаційного методу – результати виміру не залежать від опору ланцюга ТЕТ-а на відміну від мілівольтметра, де $R_{\text{ланц}}$ відіграє важливу роль. Однак точність виміру не буде істотно вищою, ніж при вимірі термо-ЕРС мілівольтметром, тому що класи точності мілівольтметра, яким вимірюють струм I у робочому контурі, і мілівольтметра практично однакові.

Для більш ефективного використання переваги компенсаційного методу виміру термо-ЕРС треба підвищити точність визначення (виміру) робочого струму. Це завдання вирішується у схемі потенціометра з постійною силою робочого струму, де гранична погрішність складає 0,05 % і менше (рис. 16).

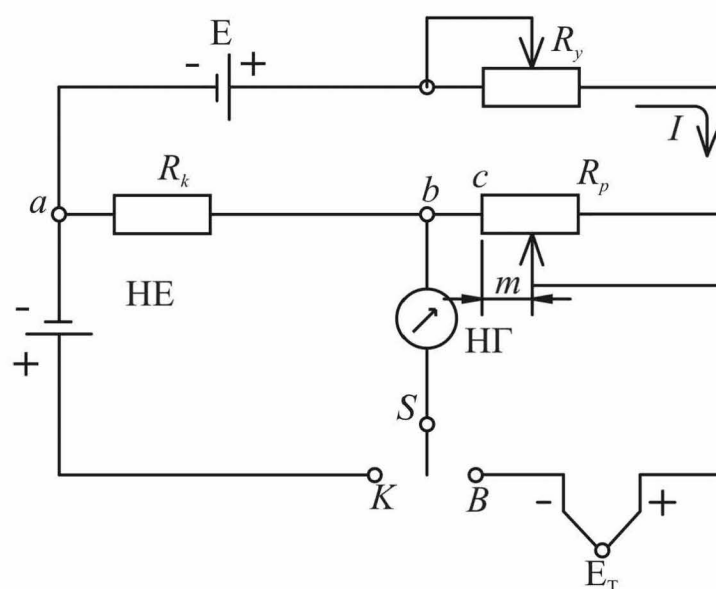


Рис. 16. Схема потенціометра:

НЕ – нормальний елемент; E – джерело струму напругою E , від якої живиться потенціометр. Значення I змінюється резистором R_y ; R_k – постійний резистор

із відомим опором $R_k = 509,3 \text{ Ом}$

НЕ – електрохімічне джерело (живлення) постійної ЕРС, що характеризується високою точністю (наприклад 1,0186 В). Воно малої потужності і використовується лише як еталон постійної різниці потенціалів (міра ЕРС). В них $I_{\text{дод}} = 1 \text{ мка}$ (10 мка).

За допомогою R_y рівності $V_{ab} = E_{\text{не}}$ (переключається S у положення K), $I_{\text{нг}} = 0$.

$$I = \frac{E_{\text{не}}}{R_k} = \frac{1,0186}{509,3} = 0,002000 \text{ A} = 2 \text{ mA},$$

тобто $I_{\text{роб}}$ встановлюється з точністю до четвертого знаку. При переключенні S в положення В (виміри) домагаються рівності $E_{\text{т}} = V_{bc}$ за допомогою движка R_p , при цьому $I_{\text{нт}} = 0$. Компенсуюча напруга дорівнює

$$U_{\text{ec}} = I_{\text{т}} R_p = \frac{E_{\text{нр}}}{R_k} m R_p.$$

Переваги потенціометра з постійною силою робочого струму полягають у наступному:

- незалежність показань від зміни опору зовнішнього ланцюга (перевага компенсаційного методу);
- підвищена точність виміру за рахунок підвищення точності встановлення струму I (перевіряється точністю $R_{\text{нк}}$ і $R_{\text{не}}$).

Автоматичні потенціометри служать для компенсаційного виміру термо-ЕРС без участі людини. Це необхідно для ручного керування у звичайних неавтономних потенціометрах. Їх вимірювальна схема принципово не відрізняється нічим, лише автоматично виводиться виправлення на $t_{\text{вільн.к}}$.

3.6. Термометри опору

3.6.1. Загальні відомості про термометри опору

Принцип їх дії базується на властивостях різних матеріалів (у першу чергу металів) змінювати свій електричний опір зі зміною температури. Параметр, що характеризує зміну електричного опору з температурою, називається температурним коефіцієнтом α електричного опору. Для металів, у яких температурний коефіцієнт

не залежить від температури, він може бути визначений так:

$$\alpha = \frac{R_t - R_0}{R_0 t}, \text{ де } R_t \text{ і } R_0 - \text{опір при температурах } t \text{ і } 0 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

У випадку якщо α залежить від температури, то $\alpha = \frac{1}{R_0} \frac{dR_t}{dt}$.

Для більшості чистих металів $\alpha = 0,0035 \dots 0,0065 \text{ K}^{-1}$.

У сплавів α істотно менший і в деяких випадках наближається до 0 (для магнію $\alpha = 2 \cdot 10^{-5}$). Для напівпровідникових матеріалів α негативний і на порядок менший, ніж у металів ($\alpha = 0,01 \dots 0,15 \text{ K}^{-1}$).

Термометри опору з чистих металів, як правило, виготовляють шляхом спеціального намотування тонкого дроту на каркас із ізоляційного матеріалу. Для запобігання ушкодженню дріт разом з каркасом поміщають у захищену оболонку. Можливі й інші конструкції термометрів опору.

Вимоги до матеріалів, що йдуть на виготовлення термометрів опору, аналогічні вимогам до матеріалів ТЕТ, а саме:

- стабільність градуйованої характеристики;
- відтворюваність.

Інші вимоги: висока чутливість, лінійність градуйованої характеристики, великий питомий опір тощо є бажаними, але не обов'язковими.

Для виготовлення термометрів опору застосовують мідь, платину, нікель.

Мідь – досить дешевий матеріал (може бути високої чистоти). Вона може бути отримана у вигляді тонких дротів з різною ізоляцією.

Для неї $R_t = R_0(1 + \alpha t)$, де R_t і R_0 – опір термометра при t і $0 \text{ } ^\circ\text{C}$; $\alpha = 4,28 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ – температурний коефіцієнт мідного дроту. У зв'язку з окислюванням міді вона використовується для вимірів $t \leq 200 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Недолік міді – малий питомий опір $\rho = 0,17 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}\cdot\text{м}$, що впливає на габарити температури опору: чим менше ρ , тим більше потрібно дроту, щоб отримати такий же опір, тим більші габарити термометра.

Мідні термометри опору можуть застосовувати для тривалого виміру температури $-200 \dots +200 \text{ } ^\circ\text{C}$. Вони випускаються II і III класів. Номінальний опір при $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ відповідає 10, 50 і 100 Ом. Їм відповідно

привласнені умовні позначки номінально статичних характеристик перетворення: 10М, 50М і 100М (табл. 6.1 [3]).

Границя припустимої основної погрішності для термометрів II класу, як правило, складає 0,3 або 0,5 °С, а для III класу – 1 і 2 °С.

Нікелеві термометри опору застосовуються для виміру температури –60...+180 °С. Вони випускаються III класу. Номінальний опір при 0 °С складає 50 і 100 Ом. Нікель має високий температурний коефіцієнт $\alpha = 6,75 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ і великий питомий опір $\rho = 1,28 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, що дозволяє випускати досить малогабаритні термометри з великим коефіцієнтом перетворення (табл. 6.2 [3]).

Чиста платина є одним з найбільш розповсюджених металів, застосовуваних для виготовлення термометрів опору. Платинові термоперетворювачі застосовуються для виміру температури –260...+1100 °С. Для інтервалу температур 0...630 °С

$$R_t = R_0 (1 + At + Bt^2),$$

а від –183...0 °С

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 + Ct^3 (t - 100)].$$

Платинові термометри опору можуть мати такі опори при температурі 0 °С: 1, 5, 10, 50, 100, 500 Ом. Їм відповідно привласнені умовні позначки номінальної статичної характеристики перетворення: 1П, 5П, 10П, 50П, 100П и 500П (табл. 6.3 [3]). Недолік платини – забруднення її у відбудовному середовищі парами металів, окислами вуглецю та іншими речовинами. Особливо сильно це проявляється за високої температури.

Крім металів для виготовлення термометрів опору застосовуються також напівпровідникові матеріали: германій, окисли міді, марганцю, кобальту, магнію, титана та їх сплави. Більшість з них мають великий негативний температурний коефіцієнт опору і дуже великий питомий опір. Тому можна виготовити дуже малі за розмірами чутливі елементи (ч. е.) термоперетворювачів опору, що мають значний коефіцієнт перетворення. Залежність опору напівпровідникового термоперетворювача від температури виражається наступним чином:

$$R_T = R_0 \exp \left(B \frac{T_0 - T}{T_0 T} \right).$$

Значення R_0 визначається опором термометра при T_0 (як правило, $T_0 = 293$ К або 20 °С), а значення B залежить від матеріалу напівпровідника, з якого виготовлено термометр.

У зв'язку з тим, що технологія отримання напівпровідникових термоперетворювачів опору не дозволяє виготовляти їх із ідентичними характеристиками (вони не відповідають цілком вимозі відтворюваності), усі вони мають індивідуальні градуйовані характеристики. Особливо великого поширення набули германієві терморезистори для виміру температури від $1,5$ К і вище. В інтервалі $4,20 \dots 13,81$ К вони застосовуються для відтворення температурної шкали. Германієві терморезистори, застосовувані для технічних вимірів, мають границю допустимої погрішності $\pm(0,05 \dots 0,10)$ К; для еталонних германієвих терморезисторів стабільність градуйованої характеристики не нижче $\pm 0,001$ К.

Для виміру температури $-100 \dots 300$ °С застосовуються окисні напівпровідникові матеріали. Коефіцієнти перетворення напівпровідникових терморезисторів можуть бути на кілька порядків вище, ніж у термометрів опору з ч. е. з металевого дроту. Однак необхідність індивідуального градуювання істотно обмежує застосування напівпровідникових терморезисторів для виміру температури. Зате вони широко застосовуються в системах температурної сигналізації, тому що здатні змінювати свій опір стрибкоподібно в кілька разів при досягненні визначеної температури. Це викликає, відповідно, збільшення струму і включення системи сигналізації.

3.6.2. Будова термометрів опору

Ч. е. виконується у вигляді спіралі 2 (рис. 17), розташованої в чотиріканальному керамічному каркасі 1; для захисту від механічних ушкоджень і шкідливого впливу на вимірюване або навколишнє середовище ч. е. вміщено у захисну оболонку 3, ущільнено керамічною втулкою 10. Виводи 11 проходять через ізоляційну керамічну трубку 9. Усе це знаходиться в захисному керамічному чохлі 4, установ-

леному на об'єкті виміру за допомогою різьбового штуцера 8. На кінці захисного чохла розміщена сполучна головка 7 термометра. У головці знаходиться ізоляційна колодка 5 із гвинтами 6 для кріплення виводів термометра і підключення сполучних приладів. Головка закривається кришкою. Сполучні дроти виводяться через штуцер.

Для зменшення впливу зовнішніх електричних і магнітних полів ч. е. термометрів опору роблять з безіндуктивною обмоткою.

Ч. е. мідного термометра опору складається з ізольованого мідного дроту $d = 0,1$ мм, намотаного в декілька шарів на циліндричний каркас із пластмаси або метала. Шари дроту між собою і каркасом скріплюються лаком. До обох кінців дроту припаюються мідні виводи $d = 1,0 \dots 1,5$ мм, чутливий елемент поміщають у захисну оболонку. Крім каркасних, виготовляють безкаркасні ч. е. мідних термометрів опору.

Ч. е. платинових термометрів (рис. 18) опору складаються з двох або чотирьох платинових спіралей 3, розташованих у капілярних каналах керамічного каркаса 4. Канали каркаса заповнюються керамічним порошком 5, що служить ізолятором і створює підпружинювання спіралі. До кінців спіралі припаяні виводи 1 з платинового або іридієвого дроту. Ч. е. у керамічному каркасі герметизується спеціальною поливою 2.

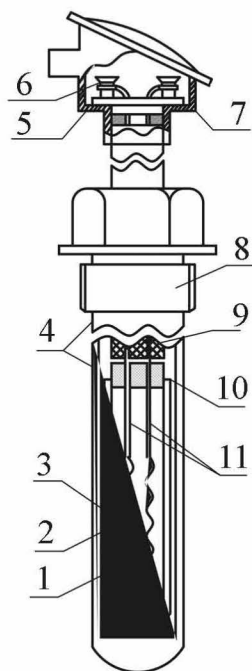


Рис. 17. Мідний термометр опору

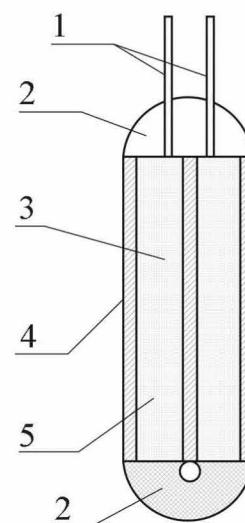


Рис. 18. Платиновий термометр опору

Така конструкція забезпечує високу герметичність через малу газопроникність кераміки каркаса і поливи. Закріплюють спіраль тільки у двох місцях, забезпечуючи незначну механічну напругу.

Внаслідок щільного засипання простору між спіралями і каркасом керамічним порошком ч. е. виявляються досить міцними і вібростійкими. Вони можуть застосовувати в інтервалі температур $-260 \dots 1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Германієві термометри опору (рис. 19) для низькотемпературних вимірів являють собою мідну луджену гільзу 2, що заповнена газоподібним гелієм і закрита герметичною пробкою 1. У середині гільзи знаходиться монокристал германію 3, легованого сурмою. До кристалу припаяно чотири золоті провідники 4, до яких припаяні платинові виводи 5. Кристал ізольований плівкою 6. Такі термометри застосовуються для виміру температури $1,5 \dots 50 \text{ K}$.

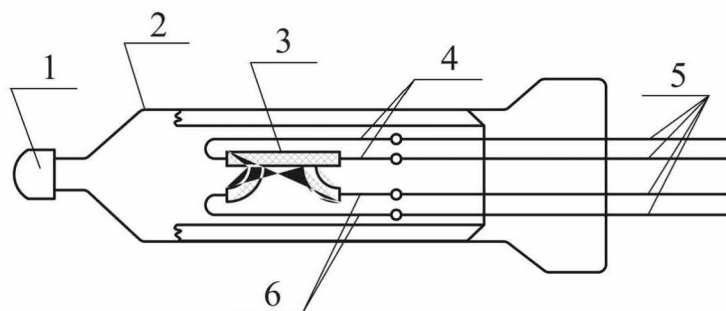


Рис. 19. Германієвий термометр опору

У лабораторній практиці іноді зустрічаються платинові термометри іноземного виробництва, що являють собою платиновий дріт або стрічку запаяну в скло. Вони можуть надійно працювати при температурі $500 \dots 600 \text{ }^{\circ}\text{C}$. При високих температурах скло стає електропровідним і, крім того, температурні напруги можуть істотно спотворити результати виміру.

3.7. Логометри

Магнітоелектричний логометр (МЕЛ) є одним із засобів виміру, який застосовують у комплекті з технічними термометрами опору виміру температури. Принцип дії логометра (від лат. логос – відно-

шення) заснований на вимірі відношення струмів у двох електричних ланцюгах. В одному із них включений термометр опору, а в іншому – постійний опір.

Магнітоелектричний логометр (рис. 20) складається з двох рамок 1 і 2, жорстко скріплених між собою зі стрілкою 3 і вміщених у повітряному зазорі між наконечниками 4 і 5 постійного магніту 6 і сердечником 7. Цей зазор зроблено нерівномірним, тому значення магнітної індукції в різних місцях зазору буде різним (при різному куті повороту рамок і стрілки). Обидві рамки логометра живляться від одного джерела постійного струму E і включені таким чином, що їх обертальний момент спрямований назустріч один одному:

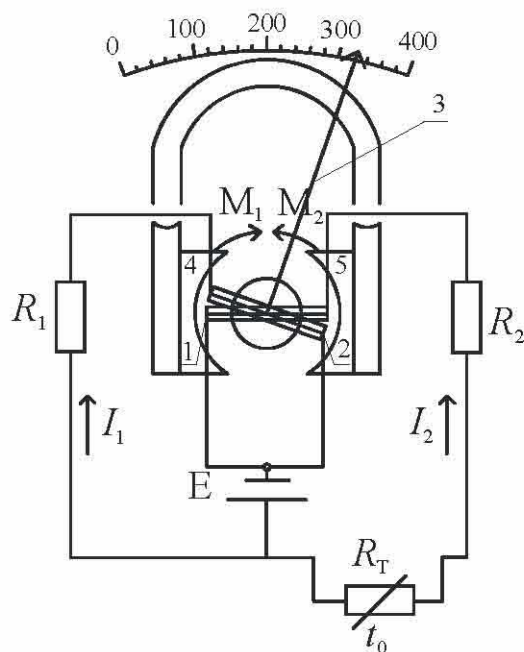


Рис. 20. Магнітоелектричний логометр

$$M_1 = 2r_1 n_1 l_1 B_1 I_1; \quad M_2 = 2r_2 n_2 l_2 B_2 I_2.$$

Рухома система буде в рівновазі, коли $M_1 = M_2$. Як правило, $r_1 = r_2$, $n_1 = n_2$, $l_1 = l_2$. Тоді $B_1 I_1 = B_2 I_2$, або $I_1 / I_2 = B_1 / B_2$.

Відношення магнітної індукції B_1 / B_2 для конкретної конструкції логометра залежить від положення рамок, тобто однозначно визначається кутом їх повороту φ : $B_1 / B_2 = f(\varphi)$. Відношення струмів I_1 / I_2 залежить від опору резисторів двох гілок.

Обидві гілки електричного ланцюга живляться паралельно від одного джерела живлення E . В опорі однієї з гілок виникає опір рамки R_{p1} і додаткового резистора R_1 .

$$\text{Струм в одній гілці: } I_1 = \frac{E}{R_{p1} + R_1}.$$

$$\text{Струм в іншій гілці: } I_2 = \frac{E}{R_{p2} + R_2 + R_T}.$$

$$\text{Співвідношення струмів } \frac{I_1}{I_2} = \frac{R_{p2} + R_2 + R_T}{R_{p1} + R_1}.$$

Якщо R_{p1} , R_{p2} , R_1 і R_2 залишаються постійними, то $\frac{I_1}{I_2} = \psi(R_T)$,

або $\varphi = F(R_T)$. Таким чином кут повороту рухомої системи залежить від R_T і не залежить від напруги живлення. Зміна температури призводить до зміни R_T , яке в свою чергу призводить до зміни I_2 і відношення I_1/I_2 . При цьому порушується рівновага рухомої системи. Напрямок магнітного поля і струму повинен бути підібраний таким чином, щоб при порушенні рівноваги рамка з більшим моментом поверталася в напрямку зниження магнітної індукції або збільшення повітряного зазору. При цьому рамка з меншим моментом буде пересуватись у бік підвищення магнітної індукції (зменшення повітряного зазору).

На практиці має місце певна залежність показань логометра від напруги живлення, тому що при виведенні рівняння не враховуються моменти тертя в опорах, моменти опору струмопідводів, момент інерції рухомої системи і ряд інших факторів.

Для підвищення чутливості логометра і можливості здійснення температурної компенсації застосовують логометр із симетричною мостовою вимірювальною схемою (рис. 21). Така схема має більшу чутливість, ніж розглянута раніше.

Резистор R_4 виробляється з міді і дозволяє понизити температурний коефіцієнт пристрою. $R_1 = R_2$; R_3 і R_5 служать для встановлення діапазону виміру. Резистор R_6 служить для підгонки опору з'єднувальних дротів до розрахункового (градуйованого) значення. Для цього R_T закорочується, а з R_K знімається закоротка. Опір резистора $R_K = R_T$ при температурі, визначеній на шкалі логометра червоною рисою. Тому при включенні R_K замість R_T показчик логометра повинен установитись на червоній рисці, якщо $R_{\text{дрот}}$ буде дорівнювати розрахунковому. Якщо $R_{\text{дрот}} \neq R_{\text{розр}}$, то підгінним резистором змінюється $R_{\text{ланц}}$ доти, поки показчик логометра не стане на червону позначку. Аналогічний спосіб припасування $R_{\text{з'єдн}}$ лінії може бути застосований і в автоматичних урівноважених мостах. При точних вимірах, а також при вимірах низьких температур у криогенній техніці, коли R_T мале, широко застосовується компенсаційний метод.

Сутність методу – довільне порівняння спадання напруги на вимірюваному резисторі і на зразковому, включеному послідовно з $R_{\text{вимір}}$. Вимір спадання напруги на резисторах здійснюється, як правило, потенціометром (рис. 22).

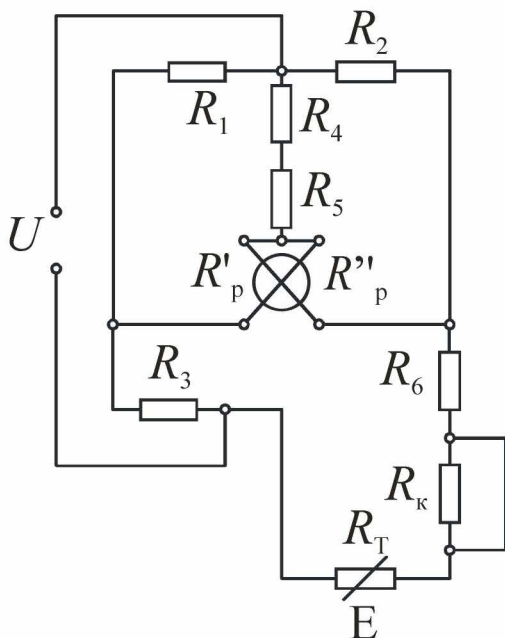


Рис. 21. Логометр із симетричною мостовою вимірювальною схемою

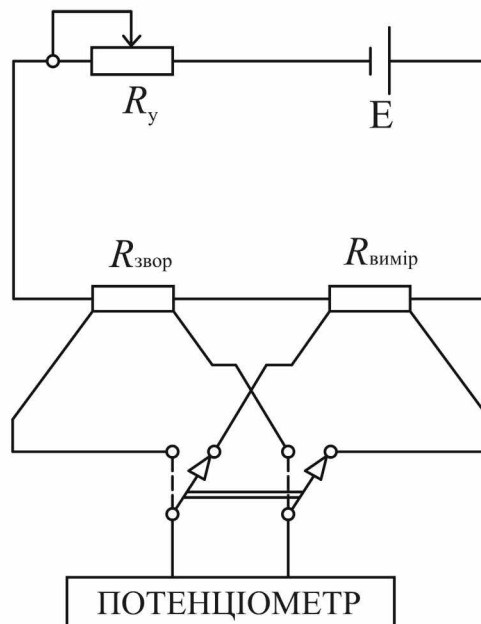


Рис. 22. Схема компенсаційного методу виміру опору

У цьому випадку напруга живлення не впливає на результати виміру, а також цілком виключається вплив $R_{\text{дрот}}$, тому що в момент виміру струм у дротах, які з'єднують потенціометр із вимірювальним резистором, дорівнює 0.

$$I = \frac{U_{\text{звор}}}{R_{\text{звор}}}; \quad I = \frac{U_{\text{вимір}}}{R_{\text{вимір}}}; \quad R_{\text{вимір}} = R_{\text{звор}} \frac{U_{\text{вимір}}}{U_{\text{звор}}}.$$

Для технічних вимірів малих опорів термометра розроблені автоматичні компенсаційні прилади, що мають позитивні властивості компенсаційного методу виміру опору. Чотиридротова схема включення термометра дозволяє цілком виключити вплив на результати виміру $R_{\text{дрот}}$.

3.8. Пірометри

3.8.1. Основи теорії виміру температури тіл за випромінюванням

Усі тіла випромінюють електромагнітні хвилі різної довжини λ і частоти γ . Електромагнітне випромінювання, порушуване тепловим рухом молекул, називається *тепловим випромінюванням*. Це випромінювання має місце при температурі до 4 000 °С як результат коливального або обертального руху молекул. При більш високих температурах випромінювання викликається в основному процесами дисоціації й іонізації.

Якщо випромінювання якого-небудь тіла попадає на інше, не прозоре для цього випромінювання тіло, то воно поглинається поверхнею і перетворюється на теплоту. Взагалі процеси поглинання і випромінювання взаємозворотні. Промені, що падають зовні на поверхню тіла, можуть цілком або частково відбиватись від поверхні, поглинатися тілом, проходити через тіло.

Відношення відбитого, поглиненого і пропущеного потоку випромінювання до падаючого на тіло потоку випромінювання називається відповідно:

– коефіцієнтом відбиття $\rho = \Phi_{\text{відб}} / \Phi_0$;

– коефіцієнтом поглинання $\alpha = \Phi_{\text{п}} / \Phi_0$;

– коефіцієнт пропусцення $\tau = \Phi_{\text{пр}} / \Phi_0$.

Для монохроматичного випромінювання (з визначеною довжиною хвилі) ці коефіцієнти називаються *спектральними*: ρ_λ ; α_λ ; τ_λ . Вони залежать від матеріалу тіла, способу обробки, стану поверхні, температури і ряду інших факторів. Між ними існує співвідношення: $\rho + \alpha + \tau = 1$ і $\rho_\lambda + \alpha_\lambda + \tau_\lambda = 1$.

Тіло, яке поглинає все падаюче на нього випромінювання, називається *абсолютно чорним*. За законом Кірхгофа за однакових довжин хвилі λ і температури T

$$\frac{B_{\lambda T}}{\alpha_{\lambda T}} = B_{0\lambda T} ,$$

де $B_{\lambda T}$ – спектральна енергетична яскравість будь-якого джерела теплового випромінювання;

$B_{0\lambda T}$ – спектральна енергетична яскравість абсолютно чорного тіла;

$\alpha_{\lambda T}$ – спектральний коефіцієнт поглинання.

Енергетична яскравість будь-якого тіла $B_T = \int_0^{\infty} B_{0\lambda T} d\lambda$.

У табл. 7.1 [3] наведені величини та постійні, що застосовуються в пірометрії випромінювання. За законом Планка

$$B_{0\lambda T} = \frac{C_1}{\pi} \lambda^{-5} \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1};$$

$$C_1 = 2\pi h c = 3,7415 \cdot 10^{-16} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2;$$

$$C_2 = \frac{hc}{k} = 1,43879 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К},$$

де λ – довжина хвилі, м;

T – абсолютна температура, К;

C_1 і C_2 – перша і друга постійні випромінювання.

Для малих значень $\lambda T < 2 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ формула Планка може бути замінена формулою Віна: $B_{0\lambda T} = \frac{C_1}{\pi} \lambda^{-5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda T}\right)$.

Для великих значень $\lambda T > 0,2 \text{ м} \cdot \text{К}$ формула Планка може бути замінена формулою Релея-Джинса: $B_{0\lambda T} = \frac{C_1}{\pi C_2} \lambda^{-4} T$.

Спектральна щільність випромінювання абсолютно чорного тіла

$$M_{0\lambda T} = B_{0\lambda T} \pi.$$

На рис. 23 ізотерми спектрального розподілу щільності випромінювання мають максимум, що залежить від температури. Відповідно до закону Віна положення максимуму визначається добутком:

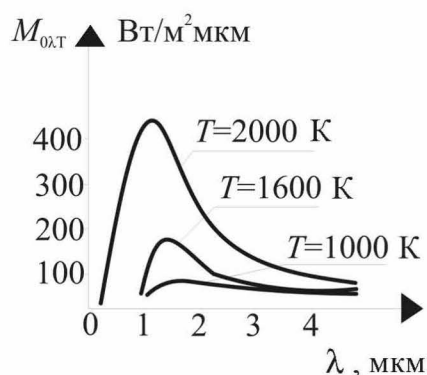


Рис. 23. Графічна залежність спектральної щільності випромінювання від довжини хвилі

$$\lambda_{\text{макс}} T = 0,28978 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К},$$

тому з підвищенням температури максимум випромінювання зміщується у бік більш коротких хвиль. У видимій області спектра (0,4...0,7 мкм) темп росту спектральної щільності випромінювання від температури дуже високий. Наприклад, при $\lambda = 0,4$ мкм підвищення температури до 1 000...2 000 К викликає зміну спектральної щільності випромінювання приблизно у 10^8 разів, а при $\lambda = 0,7$ мкм та ж сама зміна температури викликає зміну спектральної щільності випромінювання

вже тільки в 10^4 рази.

Із закону Планка легко одержати закон Стефана-Больцмана:

$$B_{0\lambda T} = \int_0^{\infty} B_{0\lambda T} d\lambda = \int_0^{\infty} \frac{C_1}{\pi} \lambda^{-5} \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1} d\lambda = \sigma T^4,$$

де $B_{0\lambda T}$ – інтегрована енергетична яскравість, що характеризує потужність випромінювання в тілесному куті, який дорівнює 1 стерadianу;

σ – постійна Стефана-Больцмана, $\sigma = 5,6697 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$.

Усі закони встановлені для абсолютно чорного тіла. Реальні тіла мають меншу випромінювальну здатність, яка визначається коефіцієнтом поглинання $\alpha_{\lambda T}$ або коефіцієнтом теплового випромінювання $\epsilon_{\lambda T}$, що залежать, як правило, від довжини хвилі випромінювання і температури тіла.

Багато реальних тіл за своїми випромінювальними здібностями близькі до сірих тіл. Сіре – це тіло, коефіцієнт поглинання якого $\alpha \neq 1$, але не залежить від довжини хвилі і температури.

3.8.2. Методи виміру температури тіл за випромінюванням

Для виміру високих температур у реальних технологічних процесах застосовують наступні типи пірометрів: квазімонохроматичний, спектрального співвідношення та повного і часткового випромінювання.

Квазімонохроматичний – це пірометр, принцип дії якого заснований на використанні залежності температури від спектральної енергетичної яскравості, описуваною формулою Планка.

Пірометр *спектрального співвідношення* – принцип дії його заснований на використанні залежності від температури тіла відношення спектральної енергетичної яскравості для двох (або більше) фіксованих довжин хвиль.

Пірометр *повного випромінювання* – принцип дії його заснований на використанні залежності температури від інтегральної енергетичної яскравості випромінювання, описуваної для абсолютно чорного тіла законом Стефана-Больцмана.

Пірометр *часткового випромінювання* – принцип дії його заснований на залежності від температури енергетичної яскравості випромінювання в обмеженому інтервалі довжин хвиль.

Практично всі пірометри градуують по чорному випромінювачу, випромінювальні здібності якого близькі до властивостей абсолютно чорного тіла. При вимірі температури реальних тіл такі пірометри показують якусь умовну псевдотемпературу, причому відмінність її від дійсної тим більше, чим більше відрізняються випромінювальні здібності реального тіла від випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла. Для квазімонохроматичного пірометра

$$T = \frac{T_{\text{я}}}{1 + \alpha T_{\text{я}}}, \quad (8)$$

де T – температура реального тіла;

$T_{\text{я}}$ – умовна псевдотемпература тіла, що називається яскравісною температурою тіла;

$\alpha = \frac{\lambda}{C_2} \ln \frac{1}{\varepsilon_{\lambda T}}$, де $\varepsilon_{\lambda T}$ – коефіцієнт теплового випромінювання.

Вираз (8) встановлює зв'язок між дійсною температурою тіла T і яскравісною температурою, яку показує пірометр.

Для визначення дійсної температури треба знати α і $\varepsilon_{\lambda T}$. Більшість квазімонохроматичних термометрів працює на довжині хвилі $\lambda = 0,65$ мкм.

У табл. 7.2 [3] наведені деякі значення $\varepsilon_{\lambda T}$. Із таблиці можна побачити як суттєво може змінюватись коефіцієнт чорноти ε_{λ} для одного й того самого матеріалу в залежності від ступеня окиснення поверхні.

У пірометрі спектрального випромінювання температура визначається за відношенням спектральних енергетичних яскравостей для двох довжин хвиль:

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\text{кол}}} = \frac{\ln \left(\frac{\varepsilon_{\lambda_1 T}}{\varepsilon_{\lambda_2 T}} \right)}{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)}, \quad (9)$$

де $T_{\text{кол}}$ – колірна температура тіла – це така температура абсолютно чорного тіла, при якій відношення спектральних енергетичних яскравостей абсолютно чорного тіла при λ_1 і λ_2 дорівнює відношенню спектральних яскравостей при тих же довжинах хвиль реального тіла з температурою T .

Для визначення дійсної температури тіла T за його $T_{\text{кол}}$, що показується пірометром, необхідно знати λ_1 і λ_2 і відношення $\frac{\varepsilon_{\lambda_1 T}}{\varepsilon_{\lambda_2 T}}$ при цих довжинах хвиль.

У пірометрі повного випромінювання температура тіла визначається за інтегральною енергетичною яскравістю випромінювання

$$T = T_p \sqrt[4]{\frac{1}{\varepsilon_T}},$$

де T_p – радіаційна температура тіла – це така температура абсолютно чорного тіла, при якій інтегральні енергетичні яскравості абсолютно чорного і реального тіл за температури T рівні між собою;

ε_T – інтегральний коефіцієнт теплового випромінювання.

Для визначення дійсної температури T за T_p необхідно знати тільки інтегральний коефіцієнт теплового випромінювання

$$\varepsilon_T = \int_0^{\infty} \varepsilon_T(\lambda) d\lambda.$$

Однак практичне визначення ε_T ускладнено. Тому похибки при визначенні T по T_p будуть значними.

Переваги методів виміру температур тіл за випромінюванням такі:

- не вимагають безпосереднього контакту з вимірюваним середовищем (безконтактно) і тому не спотворюють температурне поле об'єкта;

- верхня межа виміру не обмежена;

- усі методи дуже чутливі.

Недолік: усі методи при вимірі температури реальних тіл дають значення умовної псевдотемператури (яскравісної, колірної, радіаційної), а не дійсної температури тіла.

Найменше відхилення від даної температури має колірна, а найбільше радіаційна: $|T - T_{\text{кол}}| < T - T_{\text{я}} < T - T_p$. Відносна погрішність виміру температури за рахунок невизначеності ε_T для квазімонохроматичного методу може скласти 2–3 % і більше.

У пірометрах спектрального випромінювання погрішність виміру за рахунок невизначеності відношення $\frac{\varepsilon_{\lambda_1 T}}{\varepsilon_{\lambda_2 T}}$ буде значно меншою.

У пірометрах повного випромінювання відносна погрішність виміру температури за рахунок невизначеності ε_T може скласти 5...8 % і більше.

3.8.3. Будова пірометрів

У залежності від методу виміру пірометри поділяються на три типи (див. вище). У назві пірометра може вказуватися тип приймача випромінювання (фотоелектричний або термоелектричний – термобатарея). Іноді вказується спосіб порівняння випромінювання об'єкта

виміру з випромінюванням еталонного джерела (зі зникаючою ниткою або з оптичним клином) (рис. 24).

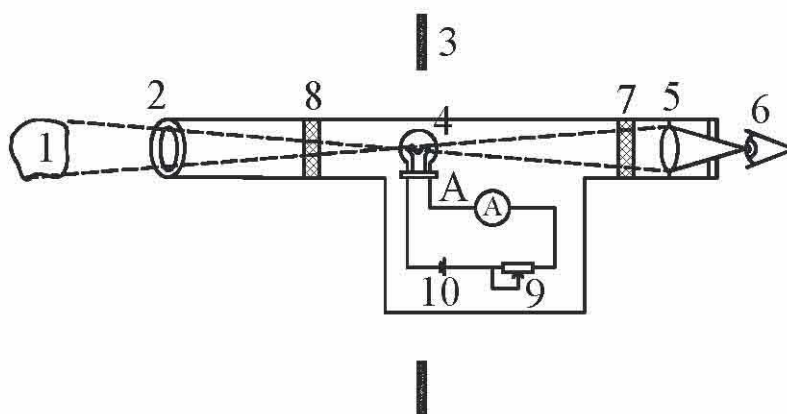


Рис. 24. Квазімонохроматичний пірометр зі зникаючою ниткою

Випромінювання від об'єкта випромінювання *1* проходить через об'єктив *2* і фокусується в площині *3*. У цій же площині розташована нитка пірометричної лампи *4*. Зображення об'єкта і нитки може бути розглянуте спостерігачем (пірометристом) через окуляр *5*. Між ниткою й окуляром розташований червоний світлофільтр *7*. Між об'єктивом і ниткою може встановлюватися поглинаюче скло *8*. Для зміни розжарення нитки застосовується реостат *9*, що живиться джерелом живлення *10*. Значення струму вимірюється приладом *11*, градуйованим в значеннях «яскравості» температури.

Перед початком вимірів проводиться настроювання оптичної системи (об'єктив–окуляр) таким чином, щоб зображення об'єкта виміру і нитка лампи знаходилися в одній площині. Це досягається переміщенням об'єктива. Крім того, необхідно, щоб нитка лампи на зображенні об'єкта виміру була видна спостерігачеві чітко, різко. Це досягається переміщенням окуляра.

Вимір температури здійснюється за випромінюванням при визначеній довжині хвилі. Для монохроматизації (виділення визначеної довжини хвилі) випромінювання в пірометрі встановлюється червоний світлофільтр (установлено, що через червоний світлофільтр людське око сприймає випромінювання у вузькій ділянці спектра з $\lambda = 0,65$ мкм). Принципово в пірометрі може бути встановлений будь-який світлофільтр (синій, зелений), що виділяє вузьку смугу довжин хвиль. Червоний світлофільтр зручний тим, що має різку границю пропускання ближче до краю видимого оком спектра. Крім то-

го, якщо порівняти спектральні енергетичні яскравості в червоному і синьому кольорі, то при температурах 800...1000 К вони розкладуться на 6–7 порядків. Тому з червоним світлофільтром можна вимірювати більш низькі температури, а значить можна понизити нижню межу виміру пірометра.

Процес виміру зводиться до зміни розжарення нитки лампи, а значить, і її яскравості доти, поки око спостерігача не перестане розрізняти нитку на фоні об'єкта виміру: нитка «зникає» на тлі (фоні) об'єкта виміру. У цей момент роблять відлік значення температури, тому що спектральна енергетична яскравість реального тіла (об'єкта виміру) і спектральна аналітична яскравість нитки пірометричної лампи рівні.

Струм розжарення в пірометрі не може бути більше визначеного значення, що відповідає «яскравій» температурі приблизно 1500 °С. Для можливості виміру більш високих температур у пірометрі встановлюється поглинаюче скло 8, що послабляє випромінювання від об'єкта випромінювання.

Квазімонохроматичні пірометри виконуються з різними верхніми межами вимірів до 5000 °С, застосовуючи поглинаюче скло з різними коефіцієнтами пропускання.

На даний час існує велика група автоматичних пірометрів, які називаються фотоелектричними. У них як світлочутливий елемент застосовуються: фотоелементи, фотодіоди, фототранзистори і фотомножники. У залежності від функції, виконуваний світлочутливим елементом, усі фотоелектричні пірометри можна розділити на дві групи: в одній – фотоелемент порівнює світлові потоки від двох джерел випромінювання і працює в режимі нуль-приладу, а в другій – фотоелемент виробляє сигнал однозначно залежний від світлового потоку, а значить від температури вимірюваного р. т. У першому випадку будова приладу є більш складною, але його показання не залежать від характеристик фотоелемента й електронної схеми або їх зміни в часі. У другому випадку будова приладу простіша, але його показання можуть істотно змінюватись в процесі експлуатації.

Його відмінна риса полягає у тім, що спектральні характеристики фотоелемента і червоного світлофільтра дозволяють одержати ефективну довжину хвилі (за якої пірометр сприймає випромінювання), близьку або практично рівну ефективній довжині хвилі квазімонохроматичного пірометра зі зникаючою ниткою. Тому яскравісна

температура, відлічена по ФЕП, і яскравісна температура, що визначається за пірометром зі зникаючою ниткою, будуть близькі, чи для пірометра з низькою межею виміру $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ – фактично рівні.

Випромінювання вимірюваного тіла 1 (рис. 25) через об'єтив 2 і діафрагму 3 направляється через червоний світлофільтр 4 на фотоелемент 5. На цей же фотоелемент надходить випромінювання від випромінювача 8. Фотострум, що виникає у фотоелементі, підсилюється у підсилювачі 6 і надходить на силовий блок 7, що змінює струм живлення випромінювача порівняння (лампи зворотного зв'язку) 8. Світлові потоки надходять на фотоелемент по черзі, що забезпечує електромагнітний вібратор 9 із заслінкою, яка відкриває світловий потік, то від вимірюваного тіла, то від випромінювача порівняння. Якщо світлові потоки не рівні, то й імпульси фотострумів у відповідні моменти часу будуть також не рівні. Підсилювач 6 і блок 7 будуть змінювати струм живлення випромінювача 8, поки фотоструми у фотоелементі в обох напівперіодах не будуть рівні. При рівності їх зміна струму живлення випромінювача не відбувається. Таким чином струм живлення випромінювача 8 однозначно визначається світловим потоком від вимірюваного тіла, що залежить від температури вимірюваного тіла. Струм живлення випромінювача порівняння 8 вимірюється автоматично потенціометром за спаданням напруги на зразковому резисторі 10.

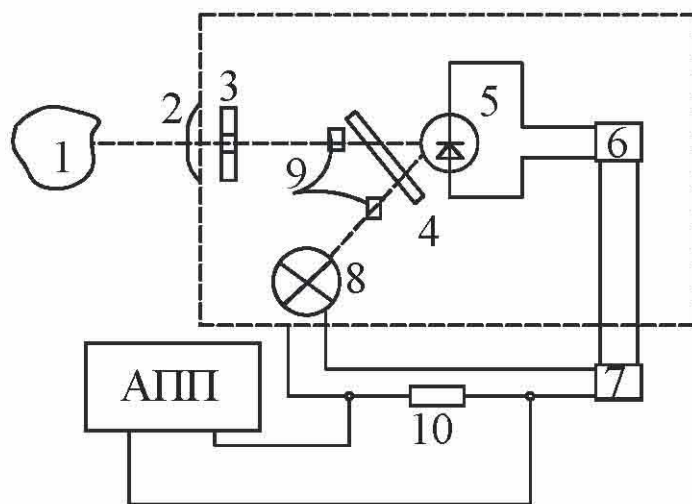


Рис. 25. Принципова схема квазімонохроматичного фотоелектричного пірометра типу ФЕП-4

Пірометри ФЕП градуують за випромінюванням абсолютно чорного тіла, тому температура, відлічена на автоматичному потенціометрі, при вимірі реальних тіл буде яскравісною температурою цього реального тіла. Перехід до дійсної температури може бути зроблений за формулою (9).

У пірометрах із діапазоном вимірів їхні показання порівняні з показаннями квазімонохроматичних пірометрів.

Пірометри типу ФЕП широко застосовуються для безперервного виміру температури у прокатному виробництві. Час установлення показань приладу ~ 1 с, основна погрішність 1 % при верхній межі виміру до 2000°C або 1,5 % при верхній межі виміру більше 2000°C . Переважна більшість іноземних ФЕП працюють як пірометри часткового випромінювання з шириною робочого діапазону довжин хвиль $0,2 \dots 2,0$ мкм.

3.9. Вимір температури розплавів (металів)

Виміри температури розплавів кольорових і легких металів також створюють великі труднощі через сильну корозію металевих захисних чохлах термометра. Кварцові чохла не придатні тому, що, з'єднуючись, наприклад, з окисом алюмінію, кварц перетворюється в низькоплавке скло. Рідкі мідні сплави відбирають у кварцу кисень, руйнуючи його структуру. Для деяких розплавів кольорових металів застосовуються чохла з хромистого чавуна. Для епізодичного виміру температури рідкої сталі і розплавів кольорових металів набули широкого застосування термоелектричні термометри короткочасного занурення зі змінними блоками (рис. 26).

Дуже тонка термопара 1 ($d = 0,08 \dots 0,10$ мм) розташована в кварцовій трубці 2 і за допомогою термоелектродів приєднана до

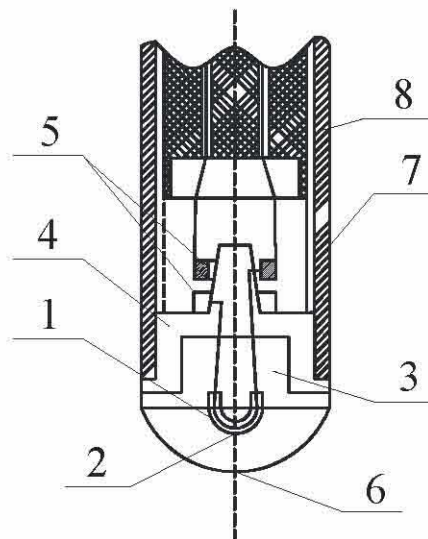


Рис. 26. Термоелектричний термометр короткочасного занурення зі змінними блоками

пружинних контактних кілець 5. Термопара з кварцовою трубкою захищена від механічних ушкоджень тонкостінним захисним ковпачком 6. Змінний блок, що складається з пластмасового блоку 4, термостійкої замазки 3, термопари 1, трубки 2 і захисного ковпачка 6, вставляються в захисний чохол із багатошарового паперу 7. Одночасно контакти блоку з'єднуються з контактами основного переносного чохла 8. При $t = 1600 \dots 1700$ °C такий термометр може знаходитися 10...15 с у рідкій сталі. При цьому частина паперового чохла обгоряє, розплавляється захисний ковпачок, але інтервал часу 10 с достатній для надійного і точного виміру температури. Після виміру змінний блок разом із паперовим захисним чохлом знімають з основного чохла і замінюють новим. Для таких вимірів застосовуються термометри платино-радій-платино-радієві (тип В) і вольфрам-рений-вольфрам-рений (тип ВР 5/20).

На ряді металургійних заводів у нас і за кордоном застосовують ТЕТ-и для безперервного виміру температури розплавленої сталі. Термометр поміщають у захисну форму, що охолоджується водою. Робочий спай вітчизняних термометрів захищений тришаровим наконечником: зовнішній шар – з металокераміки, внутрішній – з окису алюмінію; у проміжках – засипання з окису алюмінію; термоелектроди платино-радій-платино-радієві (ПР 30/6). У закордонних конструкціях застосовуються газощільні капіляри з глинозему і металокерамічний чохол.

Термометри для безперервного виміру температури плавлення сталі часто оснащуються спеціальним приводом і можуть вводитися у вимірювальне середовище або виводитися з нього у процесі роботи сталеплавильного або сталерозливного агрегату.

У зв'язку з малою надійністю контактних термометрів для виміру температури рідкої сталі й інших розплавів часто застосовуються пірометри. Однак температура металу в цьому випадку вимірюється безпосередньо в зоні реакції С з O_2 і тому вона менша, ніж середня температура металу в конверторі. Практикують одночасні виміри дійсної температури розплаву ТЕТ-м і яскравісної температури розплаву квазімонохроматичним пірометром, що дозволяє за температурою і коефіцієнтом теплового випромінювання робити висновок про якість сталі або розплаву, та їх хімічний склад.

Контрольні завдання і запитання

1. Що називають термометром?
2. Дайте характеристику рідинним скляним термометрам.
3. Дайте характеристику манометричним термометрам.
4. Дайте характеристику термоелектричним термометрам.
5. Назвіть основні типи термопар ТЕТ.
6. Дайте характеристику термометрам опору.
7. Дайте характеристику магнітоелектричному логометру.
8. Що називають пірометром?
9. Сформулюйте принципову різницю між термометром та пірометром.
10. Назвіть основні типи пірометрів.

Вимірювальні перетворювачі і схеми дистанційної передачі

Більшість сучасних пристроїв для виміру теплотехнічних параметрів являють собою системи, що складаються з первинного перетворювача, вторинного приладу і з'єднуючої їх лінії зв'язку.

Первинний перетворювач установлюється біля місця виміру. Він (або частина його) безпосередньо контактує з контрольованим середовищем і призначений для перетворення вимірюваної величини в сигнал іншої фізичної природи (звичайно, електричний, рідше – пневматичний), зручний для передачі по лінії зв'язку до вторинного приладу, установленому на щиті керування.

У загальному вигляді первинний перетворювач містить ч. е. і передавальний вимірювальний перетворювач. Ч. е. безпосередньо сприймає вимірюваний параметр і перетворює його в сигнал іншої фізичної природи. Якщо цей сигнал зручний для передачі на відстані, то він по лінії зв'язку передається до вторинного приладу і вимірюється ним. Якщо ч. е. перетворює вимірювану величину у фізичну, котру не можна передати на відстань (наприклад, переміщення або посилення), то виникає необхідність у застосуванні проміжного передатного перетворювача. Він перетворює проміжну величину в електричний або пневматичний сигнал, що потім по лінії зв'язку передається до вторинного приладу.

На схемі (рис. 27) в якості ч. е. використовується мембрана 1. При зміні тиску P мембрана буде прогинатися, причому зсув її центрів однозначно зв'язаний з тиском у відповідності зі статичною характеристикою $x = f(p)$. Якби такий прилад був тільки показувальним, то для визначення тиску було б достатньо з'єднати стрілку з центром мембрани за допомогою кінематичного зв'язку. При дистанційному вимірі тиску виникає необхідність у перетворенні механічної величини – переміщення x у пропорційний електричний сигнал для передачі його по лінії зв'язку 4 до вторинного приладу 5. Це перетворення

здійснюється передавальним перетворювачем 2. Для перетворення лінійного переміщення в уніфікований вихідний сигнал мембранний розподіл одержує перетворювачі диференційно-трансформаторні з магнітною компенсацією. ДП – додатково показуючий прилад 6, що дублює показання вторинного приладу 5. Для перетворення кутових переміщень зручними є перетворювачі феродинамічні і частотні, для перетворення зусилля – перетворювачі із силовою компенсацією (електричні і пневматичні). Тип перетворювача вибирається залежно від виду перетворюваного механічного сигналу (лінійне або кутове переміщуюче зусилля) і заданого виду сигналу, що передається по лінії зв'язку (струм, напруга тиск та ін.).

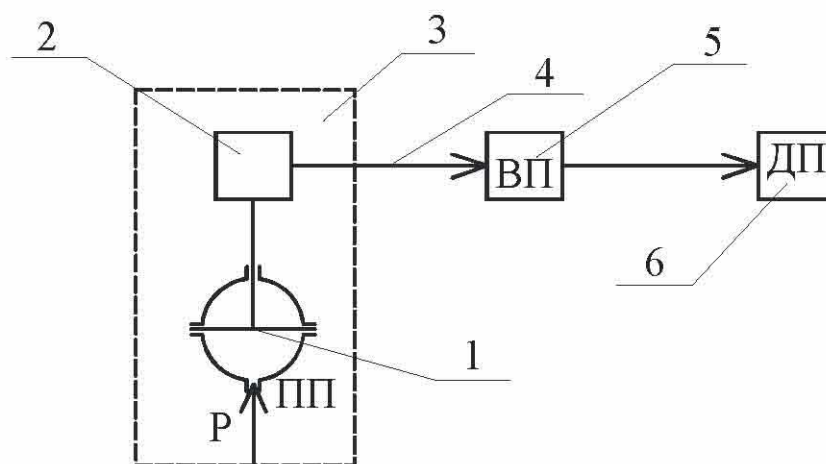


Рис. 27. Схема вимірювального комплексу для вимірювання тиску

Важливою особливістю сучасних вимірювальних перетворювачів і приладів є уніфікація їхніх вихідних сигналів, що забезпечує взаємозамінність засобів вимірів, зручність централізованого контролю і дозволяє скоротити номенклатуру вторинних приладів.

Найбільш перспективними є перетворювачі з уніфікованим вихідним сигналом постійного струму $0 \dots 5$, $0 \dots 20$ і $4 \dots 20$ мА; застосовуються також перетворювачі з вихідним сигналом напруги постійного струму ($0 \dots 10$, $0 \dots 5$ В), частотним електричним вихідним сигналом ($4 \dots 8$ кГц). Широко застосовуються перетворювачі з вихідним сигналом змінного струму. Цей сигнал подається або у вигляді зміни взаємної індуктивності ($0 \dots 10$ мГн), або у вигляді зміни напруги змінного струму ($-1 \dots +1$ В, $0 \dots 2$ В, $1 \dots 3$ В), причому зміна знака означає зміну фази. У деяких галузях промисловості використовуються також

перетворювачі з уніфікованим пневматичним вихідним сигналом, що змінюється в межах $20 \dots 100$ кПа ($0,2 \dots 1,0$ кг/см²).

Вторинні перетворювачі часто оснащуються додатковими вихідними перетворювачами, які перетворюють кутові або лінійні переміщення вихідних кінематичних пристроїв приладів в електричний сигнал, що по лінії зв'язку може передаватися додатковим показувальним приладам 6, які дублюють показання вторинного приладу 5, або іншим пристроям (наприклад, інтеграторам). Вихідні перетворювачі можуть бути аналогічними передавальним вимірювальним перетворювачам, але можуть мати і специфічну конструкцію.

4.1. Диференціально-транспортні перетворювачі (ДТП) і схеми дистанційної передачі

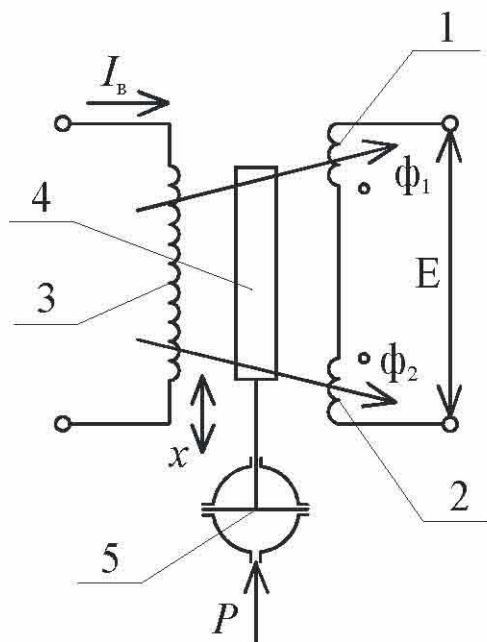


Рис. 28. Диференціально-транспортний перетворювач

ДТП призначені для перетворення лінійного переміщення сердечника (зв'язаного з ч. е.) у вихідний електричний сигнал. Принцип дії їх заснований на залежності взаємної індуктивності між обмоткою збудження і вторинною обмоткою від положення сердечника.

Перетворювач являє собою трансформатор (рис. 28), що має обмотку збудження 3 і дві секції 1 і 2 вторинної обмотки, які включаються зустрічно, диференціально (звідси ДТП). Створюваний струмом збудження $I_{зб}$ магнітний потік обмотки збудження пронизує обидві секції вторинної обмотки. Частина цього потоку Φ_1 пронизує секцію 1 та індукує в ній ЕРС l_1 , частина потоку Φ_2 пронизує секцію 2 та індукує l_2 . Значення цих ЕРС (за модулем) можуть бути визначені через взаємні індуктивності M_1

і M_2 між обмотками збудження і секціями 1 і 2 (потоки Φ_1 і Φ_2 однозначно зв'язані з M_1 і M_2):

$$l_1 = 2\pi f I_{36} M_1; \quad l_2 = 2\pi f I_{36} M_2,$$

де f – частота;

I_{36} – струм збудження.

При зміні тиску P прогинається мембрана 5, яка переміщує феромагнітний сердечник (плунжер) 4. При переміщенні сердечника вгору знижується опір магнітного потоку між обмотками 3 і 1 і, навпаки, підвищується між обмотками 3 і 2. Це приводить до підвищення Φ_1 і l_1 і зниження Φ_2 і l_2 . При переміщенні сердечника вниз знижується l_1 і підвищується l_2 . Оскільки секції вторинної обмотки включені зустрічно, то ЕРС E усієї вторинної обмотки буде визначатися як різниця l_1 і l_2 :

$$E = l_1 - l_2 = 2\pi f I_{36} (M_1 - M_2) = 2\pi f I_{36} M,$$

де M – взаємна індуктивність між обмоткою збудження і вторинною обмоткою перетворювача.

У середньому положенні сердечника (коли він порівну перекриває обидві секції) $\Phi_1 = \Phi_2$, $M_1 = M_2$. Отже $M = 0$ і $E = 0$. При зсуві сердечника від середнього положення вгору E буде підвищуватися, при зсуві вниз – також E буде підвищуватися (за модулем), але фаза її буде зворотна (рис. 29).

Через допуски прийняті при виготовленні звичайно виявляється, що ЕРС E вторинної обмотки для різних екземплярів ДТП рівна при однакових переміщеннях X .

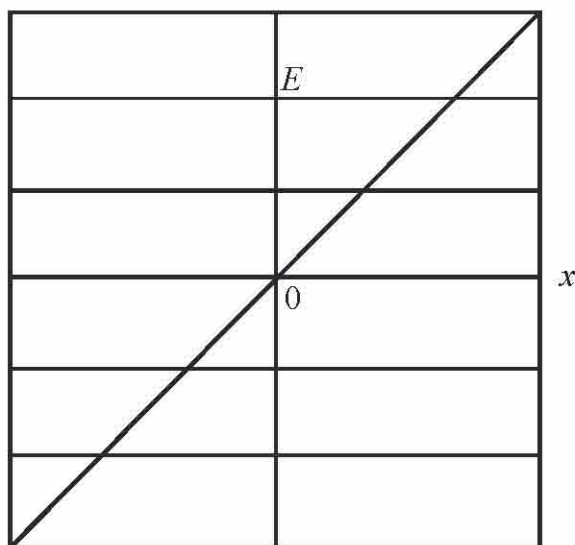


Рис. 29. Залежність ЕРС вторинної обмотки від положення сердечника

Для уніфікації вихідних сигналів, строго визначених для усіх перетворювачів (залежність вихідного сигналу $U_{\text{вих}}$ від вхідного X), у ланцюг вторинної обмотки введений дільник R_1, R_2 (рис. 30).

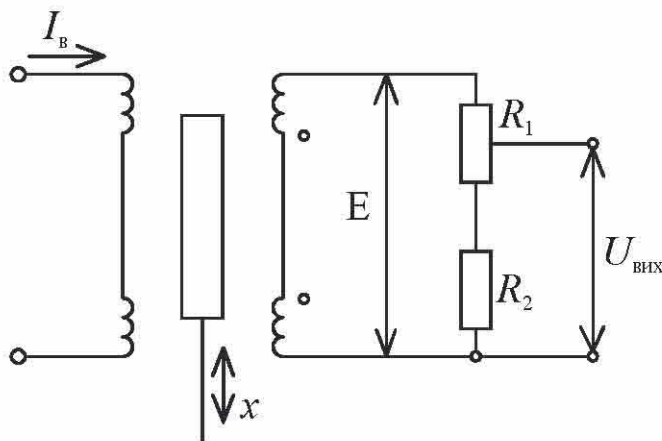


Рис. 30. Схема взаємозамінного ДТП

Зсувом движка резистора R_1 можна досягти однакової залежності $U_{\text{вих}} = f(x)$. Звичайно $U_{\text{вих}}$ виражається через взаємну індуктивність $M_{\text{вих}}$ між обмотками збудження і вихідним ланцюгом, а не між обмотками збудження і вторинною обмоткою, що використана у виразі для E :

$$U_{\text{вих}} = 2\pi f I_{\text{зб}} M_{\text{вих}}.$$

При розгляді метрології ДТП звичайно користуються відносним переміщенням сердечника $\frac{X}{X_{\text{н}}}$, де $X_{\text{н}}$ – номінальне переміщення сердечника (при значенні вимірюваного параметра, що відповідає верхній межі виміру приладу). Для різновидів ДТП $X_{\text{н}} = (1,6; 2,5; 4 \text{ мм}) \pm 25 \%$. Для уніфікованих ДТП за умови відсутності магнітних втрат

$$M_{\text{вих}} = M_{\text{н}} \frac{X}{X_{\text{н}}},$$

де $M_{\text{н}}$ – номінальна (відповідна $X_{\text{н}}$) взаємна індуктивність між обмоткою збудження і вихідним ланцюгом. Отже

$$U_{\text{вих}} = 2\pi f I_{\text{зб}} M_{\text{н}} \frac{X}{X_{\text{н}}}. \quad (10)$$

Очевидно, що для уніфікованих ДТП залежність для $M_{\text{вих}}$ і $U_{\text{вих}}$ повинна бути однаковою, що досягається встановленням однакових значень $M_{\text{н}} = 10$ мГн для всіх перетворень. При цьому графіки залежності $M_{\text{вих}}$ і $U_{\text{вих}}$ для всіх перетворювачів повинні співпадати.

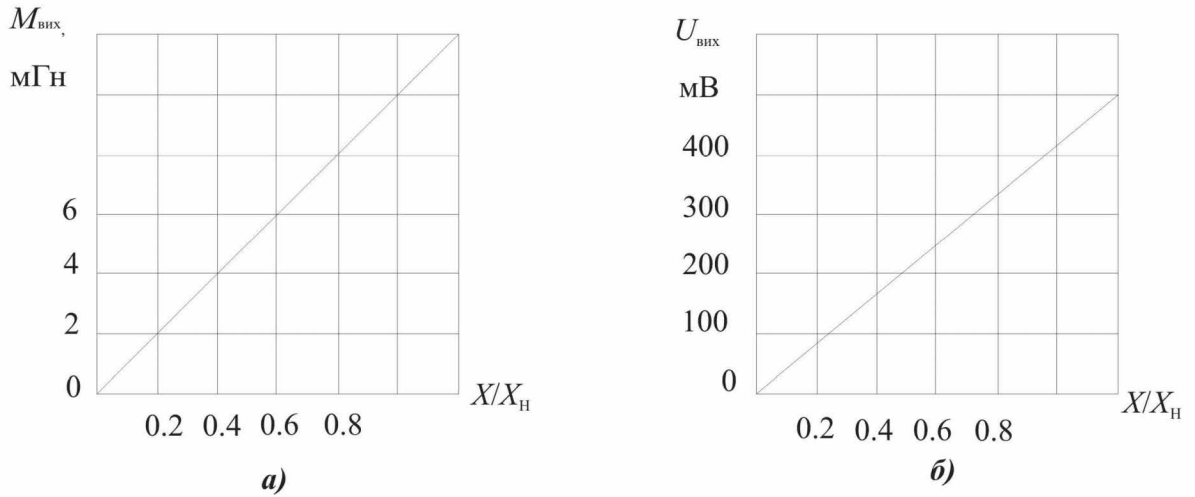


Рис. 31. Статичні характеристики перетворювачів

У приладах із взаємозамінними ДТП при початковому значенні вимірюваної величини плунжер встановлюється в середньому положенні і з її підвищенням переміщається вгору, тобто при зміні вимірюваної величини в межах діапазону виміру фаза вихідного сигналу не змінюється.

Як статичні характеристики ДТП можна було б прийняти залежність (10), тобто при перевірці ДТП експериментально визначити $U_{\text{вих}} = f\left(\frac{X}{X_{\text{н}}}\right)$ і порівняти її з ідеальною (рис. 31, б). Однак при цьому необхідна стабілізація частоти f і струму збудження $I_{\text{зб}}$, що створює деякі труднощі. Тому практично виявляється більш доцільним в якості статичної характеристики прийняти залежність (10), тому що взаємна індуктивність від f і $I_{\text{зб}}$ не залежить. При цьому за вихідний сигнал перетворювачів приймається взаємна індуктивність $M_{\text{вих}}$ між

вихідним ланцюгом і обмоткою збудження, що змінюється в межах $0 \dots 10$ мГн.

Вторинний прилад (рис. 32) містить ДТП, сердечник якого переміщується профільюючим кулачком (лінійним або квадратичним), що повертається реверсивним двигуном РД. Двигун зміцнюється підсилювачем УС, підключеним між обмотками ДТП первинного перетворювача і вторинного приладу. У схему приладу включений коректор нуля КН, що складається з обмотки ДО, намотаної поверх вторинної обмотки ДТП, і регульованого резистора R_3 . ДТП первинного перетворювача звичайно називається передавальним перетворювачем, а ДТП вторинного приладу – компенсуючим перетворювачем. При розгляді дії схеми будемо вважати, що сигнал коректора нуля дорівнює 0. Вторинна обмотка ДТП передавальних і компенсуючого перетворювачів включені зустрічно і, отже, на вхід підсилювача надходить сигнал $\Delta U = U_{\text{вих1}} - U_{\text{вих2}}$.

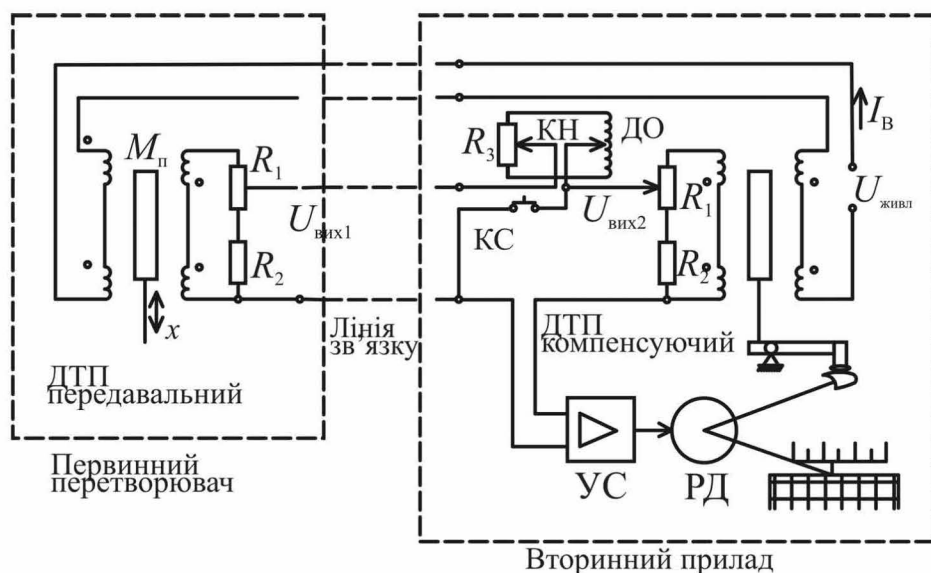


Рис. 32. Схема дистанційної передачі з використанням уніфікованих ДТП

Припустимо, що в початковий момент сердечники обох ДТП знаходяться в середнім положенні, тобто $U_{\text{вих1}} = U_{\text{вих2}} = 0$.

При цьому $\Delta U = 0$ і показчик приладу стоїть на початковій обмотці. При підвищенні вимірювальної величини $U_{\text{вих1}}$ почне підвищуватися, з'являється на вході сигнал небалансу ΔU , що підсилюється і надає руху РД. Повертаючи кулачок, двигун переміщує сердечник ДТП вторинного приладу, що буде встановлений в таке положення,

при якому $U_{\text{вих1}} = U_{\text{вих2}}$; $\Delta U = 0$, і двигун зупиниться. Очевидно, що при однакових статичних характеристиках (див. рис. 31, б) у момент компенсації відносні переміщення $\frac{X}{X_{\text{н}}}$ перетворювачів будуть рівні

(при цьому $M_{\text{П}} = M_{\text{К}}$ відповідно до рис. 31, а). Це означає, що кожному положенню сердечника ДТП первинного перетворювача відповідає визначене положення сердечника ДТП вторинного приладу і жорстко зв'язаного з ним показчика.

Оскільки положення сердечника первинного перетворювача визначається значенням вимірюваної величини, то положення показчика вторинного приладу також буде однозначно визначатися значенням вимірюваної величини. Шкали таких приладів градуюють в одиницях вимірюваної величини.

Застосування коректора нуля КН не змінює принципу дії приладу, але в цьому випадку відносне положення $\frac{X}{X_{\text{н}}}$ сердечників вже не бу-

дуть рівними. З формули (10) видно, що статичні характеристики перетворювачів (див. рис. 31, б) будуть однаковими за однакових f і $I_{\text{зб}}$. Для забезпечення цього обмотки збудження передавального і компенсуючого ДТП включають послідовно (рис. 32). У цьому випадку змінювання f і $I_{\text{зб}}$ не вплине на стан компенсації вимірювальної схеми, тому що вони в однаковій мірі змінять $U_{\text{вих1}}$ і $U_{\text{вих2}}$, тобто $\Delta U = 0$ залишиться.

Кнопка КС служить для контролю справності приладу. При натисканні її закорочується ДТП первинного перетворювача і коректор нуля, і на вхід підсилювача надходить сигнал тільки з вторинної обмотки ДТП вторинного приладу. При справному приладі стрілка повинна стати на початкову позначку шкали. Існують декілька типів взаємозамінних вторинних приладів з диференційно трансформованою схемою, що розрізняються розмірами, типом кулачка, видом діаграми. Однак усі вони мають схему аналогічну тій, що на рисунку. Квадратичний кулачок використовується тільки у вторинних приладах-витратомірах, для яких положення показчика пропорційне квадратному кореню з переміщення сердечника передавального перетворювача. У приладах-рівнемірах, перепадамірах, манометрах установлюються лінійні кулачки, тобто установлюється лінійна

залежність між положенням покажчика і переміщенням сердечника передавального первинного перетворювача.

Випускають наступні типи приладів: мініатюрні показувальні КПД 1, ВМД і показувальні та самописні КСД 1; малогабаритні показувальні з обертовим циліндричним циферблатом КВД 1, і показувальні та самописні КВД 2; прилади з дисковою діаграмою КСД 3. Прилади КСД 1 і КСД 2 мають прямокутну шкалу, ширина діаграми відповідно 100 і 160 мм. Клас усіх приладів I. Прилади можуть бути укомплектовані або додатковими вихідними перетворювачами (феродинамічними, частотними, пневматичними, реостатними), або регулюючими пристроями. У приладах-витратомірах часто використовується вбудований інтегруючий пристрій. В експлуатації також знаходяться прилади з невзаємозамінними ДТП. Електрична схема таких приладів представлена (див. рис. 31, *а*). Особливістю таких перетворювачів є те, що при нульовому значенні вимірюваної величини сердечник знаходиться не в середньому положенні (як у взаємозамінних ДТП), а в крайньому нижньому, у більшому ступені перекриваючи секцію 2. При значенні вимірюваної величини, що відповідає верхній межі виміру, сердечник, що знаходиться в крайньому верхньому положенні, більшою мірою перекриває секцію 1. В обох випадках вихідний сигнал максимальний за значенням, але фази його протилежні (див. рис. 31, *б*). Крім того, у таких перетворювачах відсутній вихідний діляник напруги, у силу чого статичні характеристики окремих екземплярів перетворювачів не співпадають. Це викликає необхідність індивідуального градування вимірювального комплекту, що складається з первинного перетворювача і вторинного приладу, які устатковані невзаємозамінними приладами. При заміні, наприклад, первинного вимірювального перетворювача необхідно перенастроювати кінематичну схему вторинного приладу.

Невзаємозамінні перетворювачі використовуються в автоматичних показувальних приладах типу ДП, ЕІВ (з обертовим циліндричним циферблатом), в показувальних і самописних приладах ДСМ (мініатюрні), ДС (малогабаритні), ЕПД.

Переваги ДТП: прості за будовою; надійні в роботі; через компенсаційний принцип дії система дистанційної передачі показань з їх використанням має малу погрішність від зміни напруги живлення й активного опору лінії зв'язку (якщо воно менше або дорівнює 5 Ом).

Недоліки ДТП: до первинного ДТП можна підключати одночасно тільки один вторинний прилад; при використанні ДТП із керуючими машинами виникає необхідність застосування проміжних нормуючих перетворювачів, які перетворюють сигнал $0...10$ мГц у сигнал $0...5$ мА. Крім того, система дистанційної передачі з ДТП, як і всі системи передач на змінному струмі, піддається впливу зовнішніх магнітних полів і сусідніх ліній зв'язку (наприклад, при спільній прокладці їх в одному кабелі). Результатом такого впливу може бути значна додаткова погрішність. У системах передач на змінному струмі накладаються обмеження на місткість між кожною парою проводів, тому що їхнє надмірне підвищення також приводить до появи додаткової погрішності. Зазначених недоліків позбавлені перетворювачі з магнітною компенсацією, які наділені передачею сигналів на постійному струмі.

4.2. Передавальні перетворювачі з магнітною компенсацією (ППМК)

ППМК призначені для перетворення лінійного переміщення ч. е. первинного приладу в уніфікований вихідний сигнал постійного струму. Принцип дії таких перетворювачів полягає в тому, що керуючий магнітний потік, створюваний у спеціальному пристрої – індикаторі магнітних потоків, – при переміщенні рухомого елемента – постійного магніту (переміщуваного чуттєвим елементом первинного перетворювача) компенсується магнітним потоком зворотного зв'язку, створеним в цьому ж індикаторі струмом зворотного зв'язку. При цьому усувається визначена залежність між вихідним струмом і переміщенням рухомого елемента (постійного магніту), а отже – і значенням вимірюваної величини.

Пружний ч. е. 1 первинного перетворювача перетворює вимірювану величину y в лінійне переміщення x постійного магніту 2 перетворювача (рис. 33). При переміщенні магніту змінюється керуючий магнітний потік Φ_m , який в індикаторі магнітних потоків 3 порівнюється з магнітним потоком зворотного зв'язку $\Phi_{\text{звор.зв.}}$. На виході індикатора з'являється напруга U , пропорційна різниці магнітних потоків

$\Delta\Phi = \Phi_m - \Phi_0$, яке посилювачем 4 перетворюється у вихідний струмовий сигнал $I_{\text{вих}}$. Вихідний струм $I_{\text{вих}}$ поступає в лінію дистанційної передачі і одночасно в пристрій зворотного зв'язку 5, вихідний струм якого $I_{\text{звор.зв}}$ створює магнітний потік $\Phi_{\text{звор.зв}}$, компенсуючий магнітний потік Φ_m . Таким чином, при збільшенні вимірюваної величини y збільшується зсув магніту x , збільшується Φ_m і, отже, необхідні величини $I_{\text{вих}}$ і $I_{\text{звор.зв}}$ для створення $\Phi_{\text{звор.зв}}$, що компенсує Φ_m .

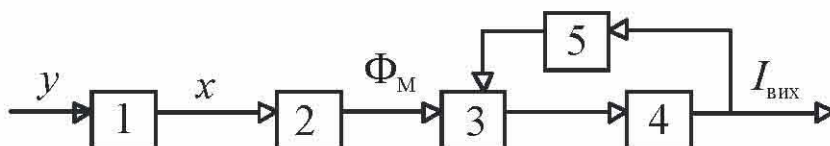


Рис. 33. Схема ППМК

Пристрій зворотного зв'язку 5 дозволяє встановлювати необхідний закон перетворення $I_{\text{вих}} = f(y)$. Ця залежність може бути або лінійною (в приладах для вимірювання тиску, різниці тиску, рівня), або квадратичною (в витратомірах по перепаду тиску на звужуючому пристрої).

Магнітна система перетворювача складається з двох магнітопроводів, двох індикаторів магнітних потоків і розташованого між ними рухомого магніту. Для спрощення розгляду принципу утворення магнітного потоку Φ_m розглянемо схему магнітних потоків лише в одному магнітопроводі (рис. 34), оскільки схема потоків в іншому магнітопроводі аналогічна. Основний магнітний потік Φ_1 постійного магніту 1 замикається через магнітопровід 2. Менші потоки Φ_2 і Φ_3 замикаються через магнітопровід індикатора магнітних потоків 3. Потоки Φ_2 і Φ_3 направлені назустріч один одному. Магнітний потік Φ_m представляє різницю Φ_2 і Φ_3 , тобто результуючий потік, що протікає по магнітопроводу індикатора $\Phi_m = \Phi_2 - \Phi_3$.

У середньому положенні магніту $\Phi_2 = \Phi_3$ і протилежно за напрямком, тому $\Phi_m = \Phi_2 - \Phi_3 = 0$ (практично). При зсуві магніту вправо від нейтрального положення $\Phi_2 > \Phi_3$ стає і по магнітопроводу індикатора 3 $\Phi_m = \Phi_2 - \Phi_3$ певного напрямку. Інтенсивність цього потоку залежить від ступеня зсуву магніту від нейтрального положення. Оскільки магніт зміщується чутливим елементом і, отже, цей зсув визнача-

ється значенням вимірюваної величини, потік Φ_M також залежить від цього значення. На магнітопроводі індикатора розміщені обмотка збудження, що живиться пульсуючим струмом, і обмотка зворотного зв'язку, по якій протікає постійний струм зворотного зв'язку.

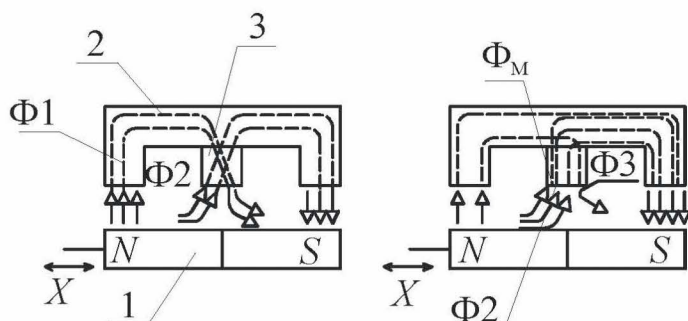


Рис. 34. Магнітна система перетворювача

Вже наголошувалося, що перетворювач з магнітною компенсацією містить один рухомий магніт, два допоміжні магнітопроводи і два індикатори магнітних потоків *I* і *II* (рис. 35). Таким чином, електрична схема перетворювача містить по дві обмотки збудження і зворотного зв'язку, розташованих на двох різних індикаторах магнітних потоків.

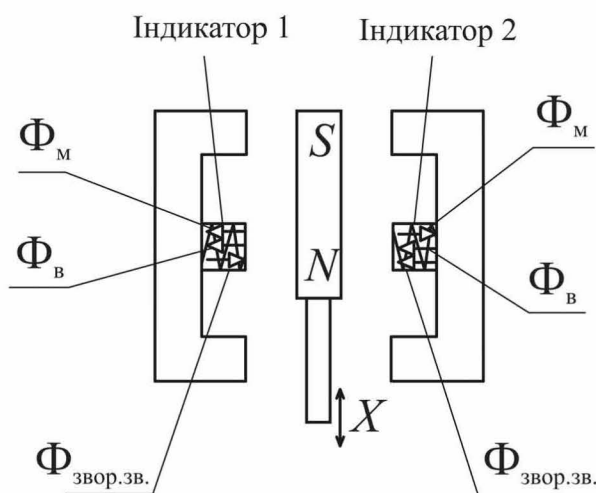


Рис. 35. Перетворювач із магнітною компенсацією

Магнітні потоки постійного магніту Φ_M і обмотки зворотного зв'язку $\Phi_{\text{звор.зв}}$ в кожному індикаторі спрямовані назустріч один одному, а магнітний потік обмотки збудження $\Phi_{\text{зб}}$ в одному індикаторі (наприклад, *I*) складаються з Φ_M , а в іншому – віднімаються.

Розглянемо перетворення магнітного потоку Φ_m у постійний вихідний струм, використовуючи електричну схему перетворювача (рис. 36). Обмотки збудження $W_{зб}$ індикаторів I і II і резистори R_1 і R_2 утворюють вимірювальний міст.

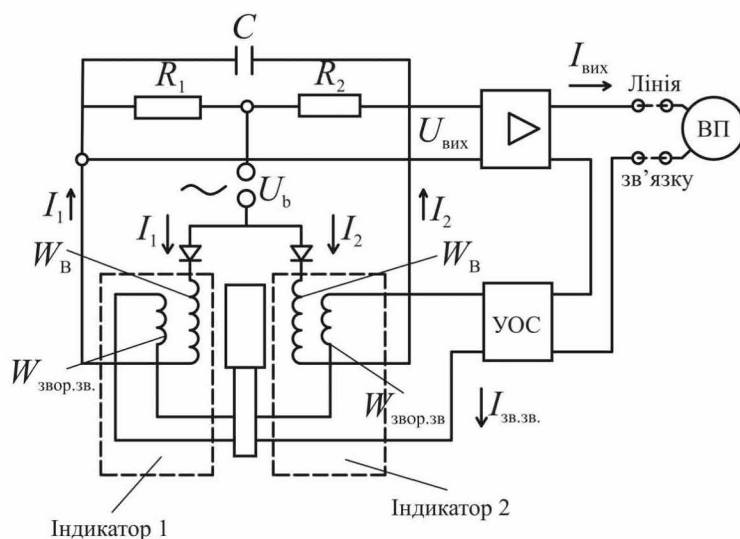


Рис. 36. Електрична схема перетворювача

До однієї діагоналі цього моста підводиться напруга $U_{зб}$, а з іншої знімається вихідний сигнал $U_{вих}$.

Робота перетворювача заснована на використанні явища магнітного насичення матеріалу магнітопроводу індикатора магнітних потоків. Передбачається, що спочатку $\Phi_{звор.зв} = \Phi_m = 0$. В цьому випадку в магнітопроводі індикатора присутні тільки магнітні потоки $\Phi_{зб}$, створювані струмами збудження I_1 і I_2 . Розглянемо зміну цих струмів у часі. Через наявність діодів струми I_1 і I_2 проходять через обмотку збудження тільки в позитивний напівперіод напруги $U_{зб}$. У проміжках $t_0 - t_1$ (рис. 37, а, б) з підвищенням $U_{зб}$ підвищуються I_1 і I_2 , а звідси підвищується $\Phi_{зб}$. У момент t_1 магнітні потоки $\Phi_{зб}$ насичують магнітопроводи індикаторів і повний опір обмоток різко падає, а значення струмів різко підвищується. В інтервалі $t_1 - t_2$ струми змінюються за синусоїдою, в інтервалі $t_2 - t_3$ струми дорівнюють нулю через запирання діодів, у момент t_3 процес зміни струмів повторюється. Таким чином в будь-який момент часу $I_1 = I_2$, тому сигнал

$U_{\text{вих}}$, що знімається з баластних опорів R_1 і R_2 , також дорівнює нулю у будь-який момент часу (оскільки $U_{\text{вих}} = I_1 R_1 - I_2 R_2$ і $R_1 = R_2$).

При зсуві магніту в обох магнітопроводах з'являється потік Φ_m постійного магніту. Передбачається, що в індикаторі I він складається з потоком $\Phi_{3б}$ обмотки збудження, а в індикаторі II віднімається. Це приводить до того, що в магнітопроводі індикатора I стан насичення настає раніше (момент t_1 на рис. 37, в), ніж в магнітопроводі індикатора II (момент t_2 на рис. 37, в).

Внаслідок цього різке підвищення I_1 наступить раніше I_2 , і в інтервалі $t_1 - t_2$ струм $I_1 > I_2$; отже, падіння напруги буде на R_1 більше, ніж на R_2 , тобто $U_{\text{вих}} \neq 0$. Ця напруга усереднюється ємністю C і поступає на вхід підсилювача, який перетворює його у вихідний струм $I_{\text{вих}}$. Пропорційний струму $I_{\text{вих}}$ струм $I_{\text{звор.зв}}$ викличе появу потоку $\Phi_{\text{звор.зв}}$, компенсуючого Φ_m . При цьому відновиться $I_1 \approx I_2$ для будь-якого моменту часу.

Неважко помітити, що підвищення Φ_m (при підвищенні значення вимірюваної величини) вимагає підвищення $\Phi_{\text{звор.зв}}$, що забезпечується підвищенням $I_{\text{вих}}$ і $I_{\text{звор.зв}}$. Таким чином встановлюється однозначна залежність між значеннями вимірюваної величини і вихідного струму.

Статична характеристика перетворювача $I_{\text{вих}} = f(x)$ визначається видом залежності $I_{\text{звор.зв}} = f(I_{\text{вих}})$. Якщо $I_{\text{звор.зв}} = K_1 I_{\text{вих}}$, то $I_{\text{вих}} = K_2 x$; якщо $I_{\text{звор.зв}} = K_3 I_{\text{вих}}^2$, то $I_{\text{вих}} = K_4 \sqrt{x}$ (тут $K_1 \dots K_4$ – постійні коефіцієнти; x – зсув магніту). Вихідний сигнал перетворювачів (уніфікований струм 0...5 мА) через лінію дистанційної передачі поступає до вторинних приладів або інших пристроїв.

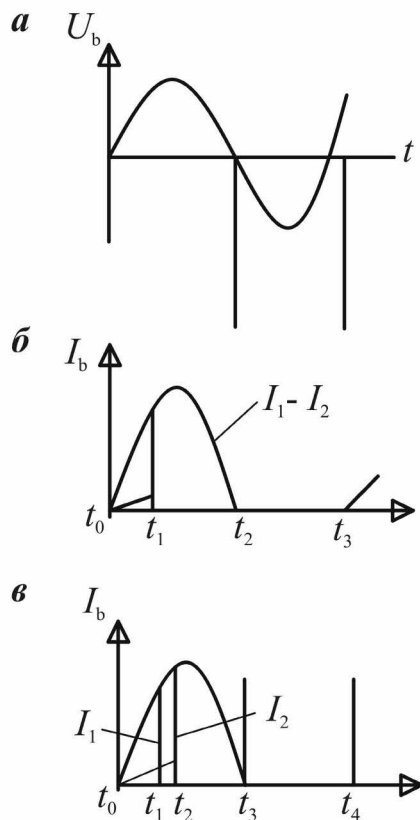


Рис. 37. Графік залежності зміни струмів у часі

Переваги ППМК: можливість підключення декількох вторинних приладів до одного перетворювача, достатньо висока надійність і вібробостійкість.

Недоліки: досить висока температурна погрішність; неможливість роботи в середовищі, що шкідливо впливає на елементи електронної схеми підсилювачів (знаходяться в корпусі первинного перетворювача); великий вплив на погрішність первинного перетворювача погрішностей ч. е. і індикатора магнітних потоків, оскільки вони не охоплені зворотним зв'язком. Це обмежує можливість створення точних приладів з такими перетворювачами. Перетворювачі цього типу мають клас 1 і 1,5.

В якості вторинних приладів використовуються міліамперметри з відповідним діапазоном вимірювання або багат шкальні вузько-профільні прилади системи АСК, що мають клас 1 і 1,5 (наприклад, М1530, М1741 та ін.).

4.3. Феродинамічні перетворювачі (ФДП)

ФДП застосовуються для перетворювача кутових переміщень в уніфікований вихідний електричний сигнал. Вони можуть бути використані як передаючі в тому випадку, якщо значення величини, що вимірюється, може бути перетворене у пропорційне кутове переміщення рухомого елемента перетворювача – рамки.

ФДП не знайшли широкого застосування як передаючі. Найбільше розповсюдження вони отримали в металургії як засоби вимірювання, які одночасно можуть виконувати найпростіші арифметичні операції у вимірювальних пристроях, що використовують непрямий метод вимірювання (наприклад, в тепломірах).

Перетворювач (рис. 38) має магнітопровід, що складається з шихтованого ярма 4, сердечника 3, нерухомого плунжера 1 і рухомого плунжера 6 з контргайкою. В сердечнику 3 вміщені агатові підп'ятники, в яких на кернах встановлена рухома рама 2 з обмоткою. На магнітопроводі вміщена катушка 5 з обмотками збудження $W_{зб}$ і зсуву $W_{зс}$.

Принцип дії: обмотка $W_{зб}$ живиться змінним струмом промислової частоти напругою 12 або 60 В. При цьому в магнітопроводі, утвореним шихтованим ярмом, сердечником, рухомих і нерухомих плунжерами, виникає магнітний потік Φ . У повітряному зазорі, в якому розташована рамка, створюється радіальний потік. Якщо рамка розташована по нейтралі NN , значення наведеної в ній ЕРС дорівнює 0, оскільки магнітний потік не перетинає площини рамки. При повороті рамки на деякий кут α в рамці індукується ЕРС:

$$E_p = \frac{\omega}{\sqrt{2}} \psi = \frac{\omega}{\sqrt{2}} B_c l R_c \alpha,$$

де ω – кутова частота живлячого струму;

ψ – число токощепленої рамки;

B_c – амплітудне значення середньої індукції в зазорі;

l – активна довжина рамки;

R_c – середній радіус рамки.

Із формули видно, що при $\omega = \text{const}$ і при $B_c = \text{const}$ значення ЕРС, що наводиться, пропорційне куту повороту рамки α . Фаза ЕРС E_p змінюється на 180° при повороті рамки в одну або іншу сторону від нейтралі.

Робочий кут повороту рамки складає $\pm 20^\circ$ від нейтралі. Характеристики, якими можуть володіти перетворювачі, залежать від їх модифікації (рис. 39). Характеристика «а» має місце у перетворювачах без обмотки зсуву $W_{зс}$. Вихідні напруги цих перетворювачів змінюються від $E_p = -1$ (при $\alpha = -20^\circ$) до $E_p = +1$ В (при $\alpha = +20^\circ$).

На практиці часто необхідно отримувати нульове значення ЕРС (E_p) не в середині її робочого кута повороту, а в одному з її крайніх

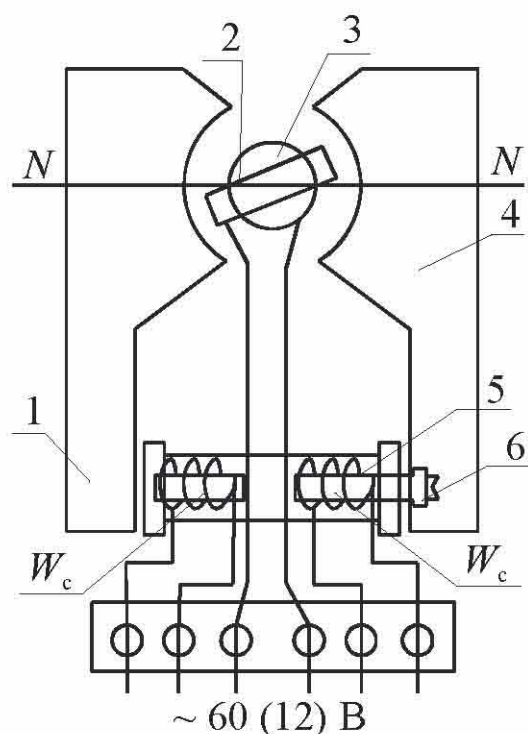


Рис. 38. Феродинамічний перетворювач (ФДП)

положень (наприклад, при $\alpha = -20^\circ$, характеристика «в»). Для цього ЕРС рамки підсумовується з ЕРС, створюваною обмоткою зсуву $W_{зс}$. Характеристика «с» відповідає послідовному підключенню з рамкою подвоєною обмоткою зсуву.

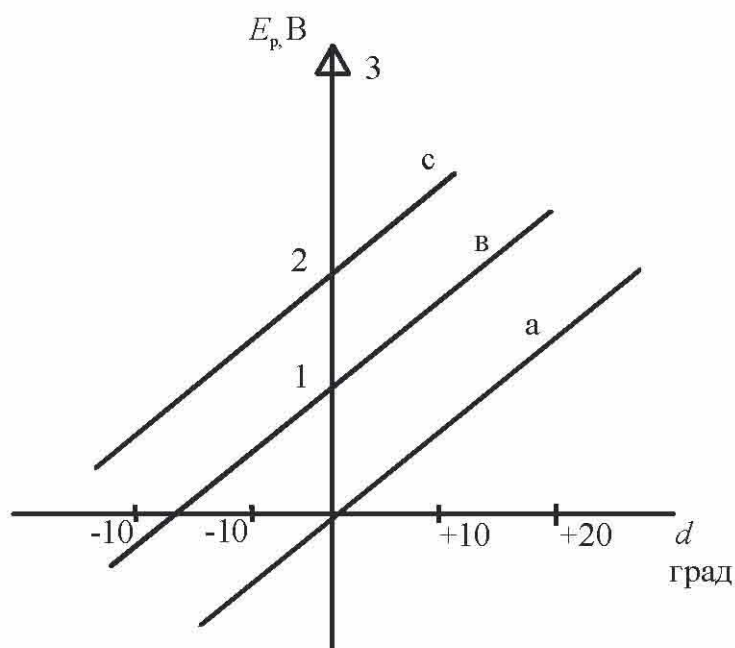


Рис. 39. Характеристики перетворювачів

Зміна кута нахилу характеристик при налаштуванні перетворювачів здійснюється переміщенням плунжера 6. ФДП має ті ж недоліки, що і ДТП.

4.4. Електросилові перетворювачі (ЕСП)

ЕСП призначаються для перетворення зусилля чутливого елемента первинного приладу в уніфікований сигнал постійного струму 0...5 або 0...20 мА.

Дія ЕСП заснована на принципі силовій компенсації: зусилля на чутливий елемент, що розвивається під дією величини, яка вимірюється, врівноважується зусиллям, діючим на цей же чутливий елемент з боку пристрою зворотного зв'язку.

4.4.1. Тензоперетворювачі

Дія вимірювальних тензоперетворювачів базується на зміні електричного опору чутливого елементу (дроту або стрічки з тензочутливого матеріалу) при його деформації. Звичайно вони використовуються як передаючі перетворювачі для вимірювання деформацій елементів конструкцій або чутливі як елементи первинних приладів. Так, тензоперетворювачі можуть бути використані для дистанційного вимірювання тиску, якщо їх механічно з'єднати з манометровою пружиною або мембраною, які деформуються під дією тиску.

Основні вимоги до тензочутливих матеріалів: стабільність характеристик, малий температурний коефіцієнт електричного опору, висока чутливість. Звичайно використовуються як матеріали константан, сплави Cu і Ni, Ni і Cr і т. д.

Знаходять застосування і напівпровідникові тензоперетворювачі, які мають більш високу тензочутливість у порівнянні з металевими, малих розмірів і масою.

За будовою металеві тензоперетворювачі підрозділяються на наклеювані і несклеювані. Найбільше розповсюдження отримали наклеювані тензорезистори, які випускаються із зигзагоподібно укладеного і приклеєного клеєм на підкладку 1 (з паперу або пластмаси) дроту 2 діаметром 0,01...0,05 (рис. 40, а). До кінців дроту приварені вивідні провідники $3d = 0,5$ мм. На рис. 40, б показано устрій фольгового тензоперетворювача. Ці перетворювачі виготовляються з металевої фольги завтовшки 0,001...0,01 мм витравлюванням.

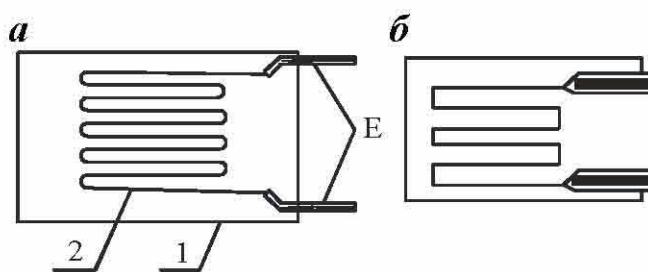


Рис. 40. Тензоперетворювачі:

а – тензорезистор, який наклеюється; б – фольговий тензоперетворювач

Тензоперетворювач наклеюється на елемент, що деформується. При його деформації змінюються розміри і електричний опір дроту, причому ця зміна залежить від ступеня деформації. Зміна опору

звичайно вимірюється за допомогою мостової схеми. Відносна зміна опору тензоперетворювачів невелика (для металевих вона $\leq 1\%$), тому температурний коефіцієнт матеріалу дроту повинен бути близьким до нуля. Крім того, для зменшення впливу температури застосовуються спеціальні схеми термокомпенсації.

Контрольні завдання і запитання

1. Сформулюйте призначення та склад вимірювальних перетворювачів.
2. Дайте характеристику первинному перетворювачу.
3. Назвіть основні типи первинних перетворювачів.
4. Що розуміють під уніфікацією сигналів?
5. Дайте характеристику диференційно-трансформаторним перетворювачам.
6. Дайте характеристику передавальним перетворювачам з магнітною компенсацією.
7. Дайте характеристику феродинамічним перетворювачам.
8. Дайте характеристику електросиловим перетворювачам.

Методи і засоби вимірювання тиску
і різниці тиску

5.1. Загальні відомості

Тиск відноситься до числа поширених фізичних величин, що вимірюються. Контроль за перебігом більшості технологічних процесів у тепловій і атомній енергетиці, металургії, хімії пов’язаний з вимірюванням тиску або різниці тиску газових і рідинних середовищ.

Тиск є широким поняттям, що характеризує нормально розподілену силу, діючу з боку одного тіла на одиницю поверхні іншого. Якщо діюче середовище – рідина або газ, то тиск, характеризуючи внутрішню енергію середовища, є одним із основних параметрів стану. Одиницею вимірювання тиску є Паскаль $\text{Па} = 1 \text{ Н/м}^2$, широко застосовуються кратні одиниці кПа, МПа. Допускається використання кгс/см^2 і $\text{кгс/см}^2 = 1 \text{ мм вод. ст.}$ (див. табл. 5).

Таблиця 5

Переклад фізичних величин зі старої системи в систему SI

Одиниця	Па	Бар	кгс/см ²	кгс/см ² (мм вод.ст.)	мм рт. ст.
1 Па	1	10 ⁻⁵	1,0197·10 ⁻⁵	0,10197	7,5006·10 ⁻³
1 Бар	10 ⁵	1	1,0197	1,0197·10 ⁴	750,06
1 кгс/см ²	9,8066·10 ⁴	0,98066	1	10 ⁴	735,56
1 кгс/см ² (мм вод.ст.)	9,8066	0,98066·10 ⁻⁴	10 ⁻⁴	1	7,3556·10 ⁻²
1 мм рт.ст.	133,32	1,3332·10 ⁻³	1,3595·10 ⁻³	13,595	1

Відтворення одиниці вимірювання тиску з найвищою точністю в області надмірного тиску $10^6 \dots 2,5 \cdot 10^8$ Па здійснюється державним первинним еталоном, що включає вантажопоршневі манометри, спеціальний набір мір маси і установку для підтримки тиску.

Для відтворення одиниці тиску зовні вказаного діапазону $10^{-8} \dots 4 \cdot 10^5$ і $10^9 \dots 4 \cdot 10^9$ Па, а також різниці тиску до $4 \cdot 10^4$ Па використовуються спеціальні еталони. Передача одиниць вимірювання тиску від еталонів робочим засобам вимірювання здійснюється багатоступінчато: від первинного і спеціального еталонів – вторинним еталонам, потім послідовно – зразковим засобам (1...4-й розряди включно) і врешті робочим засобам вимірювання.

При вимірюваннях розрізняють абсолютний (P_a), надмірний (P) і вакууметричний ($P_{\text{вак}}$) тиски:

$$P_a = P + P_{\text{ат}}; P_a = P_{\text{ат}} + P_{\text{надл}}; P_a = P_{\text{ат}} - P_{\text{вак}}; P_B = P_{\text{ат}} - P_a,$$

де $P_{\text{ат}}$ – атмосферний тиск;

$P_{\text{надл}}$ – надлишковий тиск;

P_B – тиск, нижчий за атмосферний.

Засоби вимірювання призначені для вимірювання тиску і різниці тиску називаються *манометрами*. Останні підрозділяються на барометри, манометри надмірного тиску, вакууметри і манометри абсолютного тиску залежно від того, що вимірюється ними відповідно до атмосферного, надмірного, вакууметричного і абсолютного тиску. Манометри призначені для вимірювання тиску або розрідження в діапазоні до 40 кПа (0,4 кгс/см²) називаються напоромірами і тягомірами. Тягонапороміри мають двобічну шкалу з межами вимірювання до ± 20 кПа ($\pm 0,2$ кгс/см²). Диференціальні манометри застосовують для вимірювання різниці тиску.

Залежно від принципу, що використовується для перетворення силової дії на чутливий елемент у показання або пропорційні зміни іншої фізичної величини, засоби вимірювання тиску розділяються на рідинні, деформаційні, вантажопоршневі, електричні, іонізаційні і теплові. Устрій перерахованих приладів тиску різноманітний. Серед них виділяють 5 основних груп загальнопромислових вимірювальних приладів і перетворювачів ДСП:

– механічні;

- з ДТП-ми;
- з компенсацією магнітних потоків;
- з силовою компенсацією;
- з тензоперетворювачами.

Кожна з груп за загальної елементної бази і настановних розмірів забезпечує вимірювання і перетворення тиску в уніфікований сигнал в межах, що регламентуються ГОСТ 18140-77, 2405-72, 2648-78.

5.2. Рідинні манометри і дифманометри

У рідинних манометрах тиск, що вимірюється або різниця тиску, врівноважується тиском стовпа рідини. У приладах використовується принцип судин, що сполучаються, в яких рівні робочої рідини співпадають за рівності тиску над ними, а за нерівності займають таке положення, коли надмірний тиск в одній з судин врівноважується гідростатичним (стовпом) тиском.

Схема двотрубного манометра надмірного стовпа рідини полягає в іншому. Більшість рідинних манометрів мають видимий рівень робочої рідини, за яким проводиться безпосереднє зняття показань. Ці прилади використовуються в лабораторній практиці і при проведенні промислових випробувань. Існує група рідинних дифманометрів, в яких рівень робочої рідини безпосередньо не спостерігається. Зміна рівня викликає переміщення поплавка або зміну характеристик іншого пристрою, що забезпечують або безпосереднє показання величини, що вимірюється, за допомогою відлікового пристрою, або перетворення і передачі її значення на відстань.

Двотрубні рідинні манометри (рис. 41) часто називають U-подібними. Дві скляні трубки 1 і 2, що установлюються вертикально, закріплені на металевій або дерев'яній підставці 3, до якого прикріплена шкальна пластина 4. Трубки заповнюються робочою рідиною до нульової позначки. У трубку 1 подається тиск, що вимірюється, а трубка 2 сполучена з атмосферою. При вимірюванні різниці тиску до обох трубок подається тиск. Стовп рідини заввишки h врівноважує різницю тиску $P_1 - P_2 = \rho g h$, $h = \frac{1}{\rho g} (P_1 - P_2)$.

В якості робочої рідини використовується вода, ртуть, спирт, транспортне масло. Таким чином робоча рідина виконує функції чутливого елемента, який сприймає зміни величини, що вимірюється. Вихідною величиною є різниця рівнів, вхідною – тиск або різниця тиску. Як видно з формули, крутизна статичної характеристики залежить від ρ рідини, зі зростанням якої чутливість (коефіцієнт передачі) зменшується, оскільки $S = \frac{\Delta h}{\Delta P} = \frac{1}{\rho g}$.

Якщо густина середовища над робочою рідиною дорівнює $\rho_{\text{рід}}$, то формула буде мати вигляд: $P_1 - P_2 = (\rho_1 - \rho_2)gh = g(\rho_1 - \rho_2)(h_1 + h_2)$, оскільки $h = h_1 + h_2$.

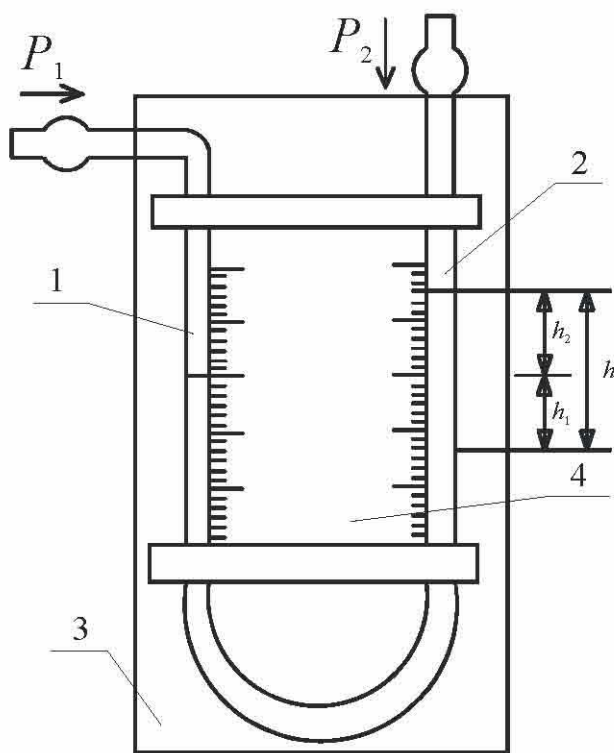


Рис. 41. Двотрубний манометр

Подвоєння h_1 або h_2 неприпустимо, оскільки через непостійність внутрішнього діаметра d скляних трубок 1 і 2 висоти h_1 і h_2 можуть розрізнятися. Для виключення впливу капілярних сил в манометрах використовуються скляні трубки з внутрішнім діаметром 8...10 мм. Якщо ж робочою рідиною є спирт, то $d_{\text{вн}}$ зменшується. Двотрубні манометри з водяним заповненням використовуються для вимірю-

вання тиску, розрідження, різниці тиску повітря і неагресивних газів до ± 10 кПа. При заповненні ртуттю межі вимірювань розширюються до 0,1 Мпа. Середовищем, що при цьому вимірюється, може бути вода, неагресивні рідини і газ.

Однотрубні (чашкові) манометри використовуються для підвищення точності відліку різниці висот рівнів. У них одна трубка замінена широкою судиною, в яку подається більший тиск з тих, що вимірюється. Трубка, прикріплена до шкальної пластинки, є вимірювальною і сполучається із атмосферою; при вимірюванні різниці тиску до неї підводиться менший тиск. Робоча рідина заливається в манометр до нульової позначки. Під дією тиску частина робочої рідини з широкої судини перетікає у вимірювальну трубку. Оскільки об'єм рідини, витисненої з широкої судини рівний об'єму рідини, що надійшов у вимірювальну трубку, то $h_1 F = h_2 f$ при $f \ll F > h_1 \ll h_2$ і якщо $\frac{F}{f} \geq 400$, то рівність справедлива. Зміною рівня в широкій судині нехтують і при вимірюванні враховується лише зміна рівня у вимірювальній трубці. Якщо для збільшення точності вимірювання необхідно врахувати цю зміну, то шкала градується в одиницях тиску відповідно до рівняння

$$P_1 - P_2 = \rho g (h_1 + h_2) = \rho g h \left(1 + \frac{f}{F} \right).$$

Вимірювання в однотрубних манометрах висотного стовпа (одного) робочої рідини приводить до погрішності прочитування, яке з урахуванням погрішності градуйованої шкали $\leq \pm 1$ мм при ціні розподілу 1 мм.

У дво- і однотрубних манометрах основною погрішністю є погрішність прочитування різниці рівнів. При збільшенні меж вимірювання манометрів наведена погрішність вимірювання тиску зменшується за однієї і тієї ж абсолютної погрішності.

Мікроманометри використовуються для вимірювання тиску і різниці тиску до 3 кПа (300 кг/м^2). Вони є різновидом однотрубних манометрів і забезпечені спеціальними пристосуваннями або для зменшення ціни розподілу шкали, або для збільшення точності прочитування висоти рівня за рахунок використання оптичних чи інших

пристроїв. Найбільш поширені ММН з похилою вимірювальною трубкою. Приведена погрішність $\leq 0,5 \%$.

Більш точними є мікроманометри ММ, так звані компенсаційні. Погрішність прочитуваної висоти рівня $\leq 0,05$ мм у результаті використання оптичної системи для установки початкового рівня і мікрометричного гвинта для вимірювання $h_{\text{рід}}$, рівневого вимірювання тиску або різниці тиску.

5.3. Деформаційні манометри і дифманометри

У деформаційних манометрах використовується залежність деформації ч. е. або силою, що ним розвивається, від тиску, що вимірюється. Пропорційна останньому деформація або сила перетвориться в свідчення або відповідну зміну вихідного сигналу. Більшість деформаційних манометрів і дифманометрів містять пружні ч. е., здійснюючи перетворення тиску в пропорційне переміщення робочої точки.

Найбільш поширені ч. е. – це трубчасті пружини (рис. 42, а), сильфони (рис. 42, б), плоскі і гофровані мембрани (рис. 42, в, г), коробки (рис. 42, д) мембран, м'які мембрани з жорстким центром (рис. 42, е).

Статистичній (пружній) характеристиці ч. е., який зв'язаний переміщенням робочої точки з тиском, властива наявність початкової зони пропорційних переміщень робочої точки, в якій має місце пружна деформація і нелінійної області, в якій виникають пластичні деформації.

Форма і крутизна статистичної характеристики залежать від конструкції ч. е., матеріалу і температури. Робочий діапазон вибирається в області пружних деформацій із забезпеченням запасу на випадок перевантаження ч. е. елемента тиском. Коефіцієнт жорсткості за силою ч. е.

$$K_F = \frac{F}{h} = \frac{PS_e}{h},$$

де F – сила на ч. е.;

h – переміщення робочої точки;

S_e – ефективна площа елемента.

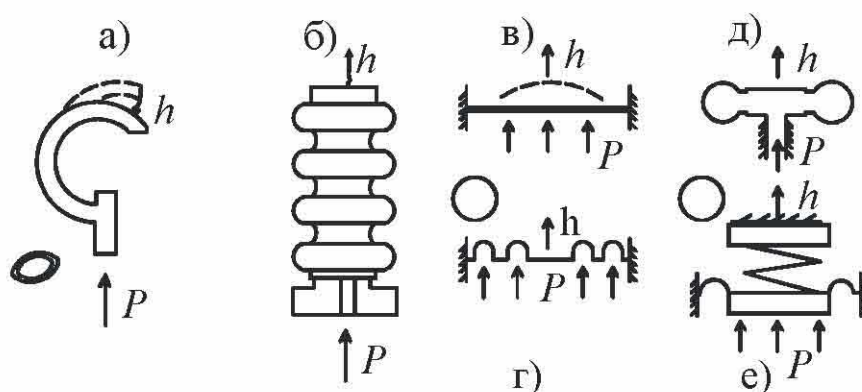


Рис. 42. Чутливі елементи

Для тиску до 5 МПа трубчасті пружини виготовляють з латуні, бронзи, а для більш високого тиску – з легованих сталей і сплавів нікелю.

Сильфони бувають суцільнотягнутими і зварними. Завдяки значному прогресу в технології виготовлення сильфонів вони отримали широке застосування в манометрах і дифманометрах ДСП.

Мембранні ч. е. є найбільш різноманітними за конструкцією, а саме: плоскі, гофровані, мембрани-коробки (блоки з них), м'які мембрани.

Пружні властивості матеріалів ч. е. залежать від температури, що викликає необхідність захисту приладів від дії високих температур середовища, що вимірюється.

Відповідно до використання у приладах ч. е. деформаційні манометри поділяються на трубчато-пружинні, сильфонні і мембранні.

Трубчато-пружинні показуючі манометри випускаються з верхньою межею вимірювання 0,1 Мпа (1 кгс/см²)...103 Мпа (104 кгс/см²) відповідно до стандартного ряду.

Зразкові показуючі пружинні манометри мають клас точності 0,15; 0,25; 0,4; а робочі – 1,5; 2,5 і 4; робочі підвищеної точності – 0,6 і 1.

Промисловістю випускаються механічні показуючі і самописні манометри з одновитковою (типа МТ) і витковою (МТМ) трубчастою пружиною. Клас їх точності 1; 1,5. Вони відносяться до числа багатогабаритних приладів, розміри яких визначаються діаметром дискової діаграми.

Як показуючі, так і самописні манометри можуть містити додаткові пристрої, що здійснюють замикання кінця трубчастої пружини в пропорційний електричний або пневматичний сигнал (електроконтактні манометри типу ЕКМ, МЕД із ДТП, з компенсацією магнітних потоків типу МПЕ, з силовою компенсацією типу МПЕ).

Сильфонні ч. е. використовуються в механізмах показових і самописних приладів наступних типів: МСП, МСС (манометри), МВСС (мановакуметри), (напороміри), ТмСП, ТмСС (тягоміри), ТНСП, ТНСС (тягонапороміри). У цих приладах усередині сильфона знаходиться пружина, що визначає діапазон вимірювань приладу, який у сильфонних манометрів більш вузький, ніж у пружинних. Клас точності манометрів 1; 1,5.

Сильфонні ч. е. є основними в електричних і пневматичних перетворювачах тиску з силовою компенсацією.

Мембранні пружинні ч. е. (частіше у вигляді коробок мембран) використовуються в приладах для вимірювання тиску і розрідження; в перетворювачах тиску як з прямим перетворенням величини, що вимірюється, так і статичним урівноваженням (професійні напороміри, клас точності 1,5; 2,5 НМП, дифманометри ДМ, ДМЕ, ДМЕР клас точності 1,5 з компенсацією магнітних потоків; клас точності дифманометрів 1; 1,5).

Ч. е. у вигляді коробки мембрани використовуються в електричних манометрах ММЕ мембран із компенсацією магнітних потоків і в манометрах абсолютного тиску МАДМЕ.

У дифманометрах із силовою компенсацією електричних і пневматичних типу ДМЕ, П, ДМЕР як ч. е. використовується м'яка мембрана із жорстким центром і пружною гвинтовою пружиною. Клас точності – 1; 1,5.

У вантажопоршневих манометрах тиск, що вимірюється, врівноважується силою тягара неушільненого поршня з вантажами. Вони використовуються як зразкові засоби відтворення одиниці тиску $10^{-1} \dots 10^{13}$ Па, а також для точних вимірювань тиску в лабораторних умовах. Клас їх точності 0,02 і 0,05 (МП-60, МВП – 2,5). Низька погрішність обумовлена високою точністю завдання маси вантажів, площею перетину поршня і прискоренням вільного падіння $P = \frac{Mg}{S}$, де S – площа торця поршня і зазору.

Принцип дії п'єзоелектричних манометрів (рис. 43) ґрунтується на п'єзоелектричному ефекті, сутність якого полягає у виникненні електричних зарядів на поверхні стислої кварцової пластини, яка вирізується перпендикулярно електричній осі кристалів кварцу $Q = kF = kSP$, де k – п'єзоелектрична постійна, Кл/Н. Кварц на відміну від інших сегнетоелектриків, які володіють п'єзоелектричним ефектом, є механічно міцним і має високу жорсткість, що виключає вплив пружної характеристики мембрани 1 на коефіцієнт передачі п'єзоелектричного перетворювача. Частота власного комбінованого перетворювача досягає десятків кГц, унаслідок чого вони широко застосовуються при випробуванні двигунів і на інших технологічних об'єктах, що характеризуються змінами тиску. П'єзоелектрична постійна кварцу до $2 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н відрізняється стабільністю і слабою залежністю від температури, що дозволяє використовувати п'єзоперетворювачі для вимірювання тиску високотемпературних середовищ. Через витік заряду п'єзоелектричні перетворювачі не використовуються для вимірювання статичного тиску. З метою збільшення чутливості декілька кварцових пластин включаються паралельно. Верхня межа вимірювання тиску у цих приладів досягає 100 МПа (1000 кгс/см²).

Манометри з тензорезистивними перетворювачами за швидкодією наближаються до п'єзоелектричних манометрів. Вони є мембранними і на них розміщені дрітjanі, фольгові або напівпровідникові резистори, опір яких змінюється при деформації мембрани під дією тиску.

Дрітjanі тензорезистори простіші у виготовленні, але їх коефіцієнт тензочутливості на порядок менше, ніж у напівпровідникових. У приладах тиску «Сапфір-22» для перетворювача силової дії тиску в електричний сигнал використовується сапфірова мембрана з напиленими кремнієвими резисторами. Передбачувана погрішність – 0,25...0,5 %. Модифікації приладів: ДН (надлишковий), ДВ (вакуумний), ДІВ, ТА (абсолютний тиск), ДД (різниця тиску), ДГ (гідростатичний).

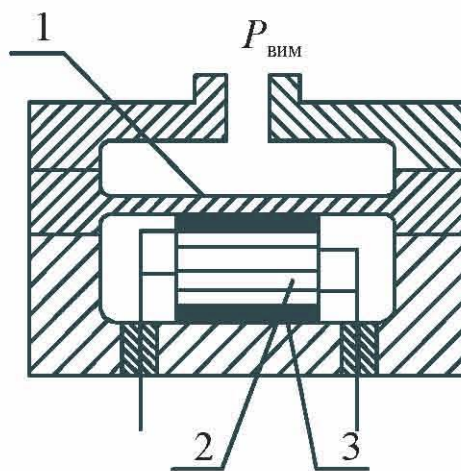


Рис. 43. П'єзоелектричний манометр:

1 – металева мембрана; 2 – кварцова пластина; 3 – металізована поверхня

Для вимірювання високого тиску 250...1600 Мпа використовуються манометри опору манганінові, в яких ч. е. є котушка з манганінового дроту. Передбачувана погрішність їх – $\leq 1\%$.

Для вимірювання тиску в діапазонах $10^{-1}...10^{-8}$ Па ($10^{-3}...10^{-10}$ мм рт. ст.) використовуються іонізаційні манометри (рис. 44). Основним елементом манометра є скляна манометрова лампа, що містить катод 1, яка знаходиться усередині анодної сітки 2, оточеної циліндровим іонним колектором 3.

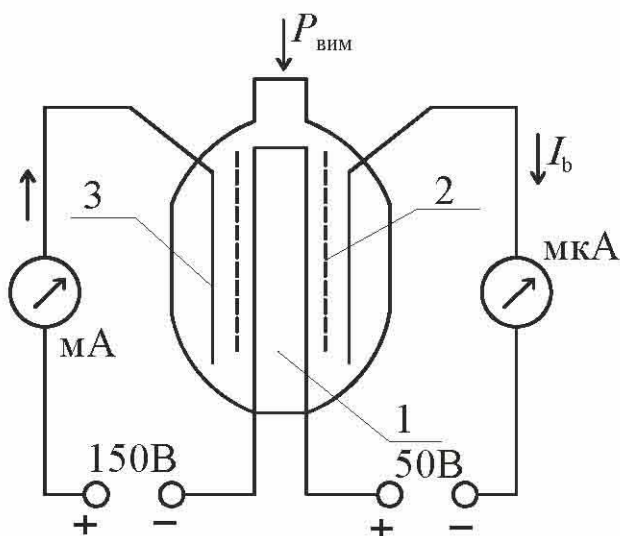


Рис. 44. Іонізаційний манометр

Ежектовані розпеченим катодом електрони пришвидшують позитивну напругу, яка виникає між анодом і катодом. При русі електрони іонізують молекули розрідженого газу. Позитивні іони потрапляють на негативно заряджений колектор. При постійній анодній напрузі і електронній емісії величина струму колектора I_k залежить від тиску, що вимірюється. Нижня межа вимірювань іонізаційних манометрів обмежена фоновим струмом, викликаним м'яким рентгеновським випромінюванням анода і фотоелектронною емісією колектора. Вакууметри відносяться до групи магнітних електророзрядних манометрів ВМБ-2,3 з манометричними ММ-8, ММ-3м4 і ВІМ із ММ-14 з використанням зовнішнього магнітного поля збільшення пробігу електронів.

Для вимірювання тиску $1...10^4$ Па ($10^{-2}...10^2$ мм рт. ст.) використовуються теплові манометри, які так само як іонізаційні включають манометричний перетворювач і вимірювальний блок. Схема є неврів-

новаженим мостом (рис. 45), на який напруга подається від стабілізуючого джерела живлення ВП. Три плеча моста містять постійні резистори R_1 , R_2 і R_3 , а четверте нагріте до $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ вольфрамовою ниткою, що знаходиться в камері, куди подається тиск, що вимірюється. При вказаному низькому тиску внаслідок числа молекул довжина їх вільного пробігу стає співмірною з відстанями між теплопередаючими поверхнями вимірювальних камер приладу. У зв'язку з цим теплопровідність при тиску 10^3 Па (10 мм рт. ст.) і нижче лінійно зменшується у міру зниження тиску P . Тепловіддача від вольфрамової нитки залежить як від кількості молекул, що беруть участь в перенесенні теплоти, так і від температури стін камери. Для зменшення впливу на показання приладу коливань температури навколишнього середовища, яка визначає температуру стін камери, а плече моста, яке прилягає до R_4 вміщується у вакуумірну камеру, аналогічну вимірювальній.

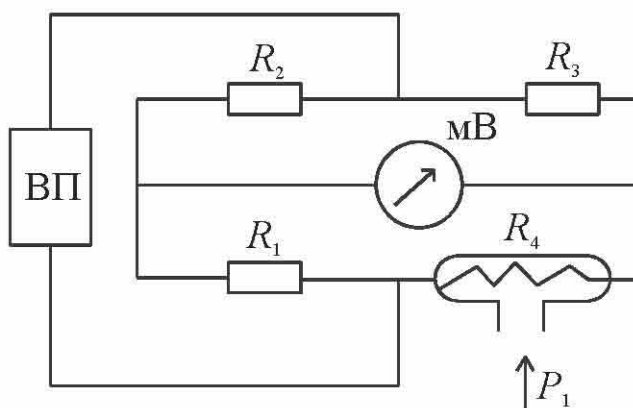


Рис. 45. Схема теплового манометра

Нижня межа застосування манометрів обмежується збільшенням у міру зменшення теплопровідності ролі променистого теплообміну, який стає визначальним за тиску $<10^{-1}\text{ Па}$ (10^{-3} мм рт.ст.).

Для вимірювання температури нитки можуть використовуватися термопари, і тоді теплові манометри називаються термопарними.

Теплові манометри можуть працювати в режимі підтримки постійного струму через нагрівач. Тоді вимірювання тиску пропорційне різниці між температурами нагрівача і стін лампи. При роботі в режимі підтримки постійної різниці температур за рахунок зміни струму величина його характеризує тиск, що вимірюється.

За стабільного тиску, що вимірюється, його значення повинно складати $3/4$ діапазону вимірювання приладу, а в разі змінного тиску – $2/3$ діапазону.

Контрольні завдання і запитання

1. Що називають манометром?
2. Назвіть основні типи манометрів.
3. Що називають рідинним манометром та дифманометром?
4. Що називають деформаційним манометром і дифманометром?
5. Дайте характеристику вантажо-поршневим манометрам.
6. Дайте характеристику п'єзоелектричним манометрам.
7. Дайте характеристику іонізаційним манометрам.
8. Дайте характеристику тепловим манометрам.

Вимірювання рівня

6.1. Вимірювання рівня рідин

Вимірювання рівня рідин відіграє важливу роль при автоматизації технологічних процесів, особливо якщо підтримка рівня пов'язана з умовами безпечної роботи устаткування.

Залежно від умов вимірювання, характеру контролюваного середовища використовуються різні методи вимірювання рівня. Якщо немає необхідності в дистанційній передачі показань, рівень рідини можна виміряти рівнемірами з візуальним відліком (на покажчиках скла). За необхідності дистанційного вимірювання рівня використовуються складніші рівнеміри: гідростатичні (дифманометричні і барботажні), буйкові і поплавкові, ємнісні, індуктивні, радіоізотопні, хвильові, акустичні, термокондуктометричні.

6.1.1. Рівнеміри з візуальним відліком

Рівнеміри з візуальним відліком засновані на візуальному вимірюванні висоти рівня рідини (рис. 46). За невисокого тиску середовища висота рівня вимірюється у скляній трубці (вказівному склі), що сполучена з рідинним і газовим просторами контролюваного резервуару. За підвищеного тиску застосовується плоске скло, на поверхні якого з боку рідини нанесені вертикальні грановані канавки. За умовами міцності рекомендується застосовувати вказівне скло висотою $\leq 0,5$ м, тому при великому діапазоні зміни рівня встановлюється декілька скляних пластин в шаховому порядку таким чином, щоб їх діапазони вимірювання перекривалися.

Основним джерелом додаткової погрішності таких рівнемірів є різниця густини рідини в контролюваному резервуарі ρ_1 і в склі ρ_2 ,

викликана відмінністю температур (особливо, якщо рідина в резервуарі має високу температуру, а вказівне скло знаходиться на значній відстані). Відмінність ρ приводить до відмінності h_1 і h_2 (рівень у склі іноді називають «ваговим» рівнем). При цьому абсолютна погрішність $\Delta h = h_2 - h_1 = h_2 \left(1 - \frac{\rho_2}{\rho_1} \right)$.

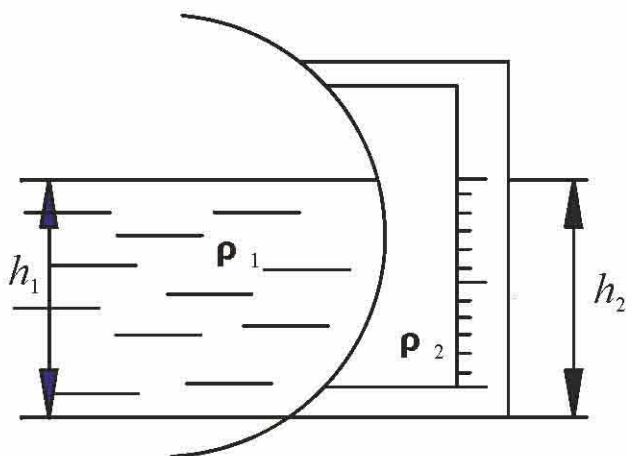


Рис. 46. Візуальне вимірювання висоти рівня рідини

Погрішність може досягати суттєвих значень, тому з метою її зменшення необхідна або теплова ізоляція рівнеміра, або продування його рідиною з резервуару перед відліком.

6.1.2. Гідростатичні рівнеміри

У гідростатичних рівнемірах вимірювання рівня рідини постійної густини ρ зводиться до вимірювання гідростатичного тиску P , створюваного рідиною, причому $P = H\rho g$.

Гідростатичний рівнемір, в якому встановлений тиск рідини вимірюється дифманометром, називається дифманометричним.

Гідростатичний рівнемір, в якому встановлено тиск рідини, що перетворюється в тиск повітря, називається пневморівнеміром. Різновидом його є барботажний рівнемір, в якому повітря, що подається від стороннього джерела, барботує через шар рідини.

На рис. 47 показана схема підключення дифманометра до відкритого резервуару, що знаходиться під атмосферним тиском. Обидві імпульсні трубки ДМ заповнюються контрольованою рідиною (якщо вона неагресивна). ДМ вимірює різницю P_1 і P_2 , які дають на його чутливий елемент:

$$P_1 = (H + h_1) \rho_1 g; \quad P_2 = h_2 \rho_2 g;$$

$$\Delta P = P_1 - P_2 = (H + h_1) \rho_1 g - h_2 \rho_2 g.$$

Якщо $\rho_1 = \rho_2$ та $h_1 = h_2$, то $\Delta P = H \rho g$, де $\rho = \rho_1 = \rho_2$.

Звідси видно, що показання ДМ рівнеміра будуть змінюватися при зміні густини контрольованого середовища. Погрішність у показаннях з'явиться також, якщо $\rho_1 \neq \rho_2$ в імпульсних трубках (для виключення цієї погрішності імпульсні трубки розташовують поряд). Остання формула справедлива, якщо рівень рідини в трубці буде незмінним при зміні контрольованого рівня.

Для забезпечення цього на імпульсній трубці встановлюють зрівняльну посудину (як правило, великого діаметра для зменшення Δh , оскільки один і той же об'єм рідини, що виштовхнула з мінусової камери ДМ, в широкій посудині викличе меншу зміну рівня, ніж в тонкій імпульсній трубці).

У разі вимірювання рівня агресивної рідини на імпульсних лініях встановлюються розділові пристрої. При цьому ДМ та імпульсні трубки нижче за розділові пристрої заповнюються неагресивною рідиною.

На рис. 48 зображена найпростіша схема вимірювального рівня рідини в резервуарі під тиском – в барабані парового казана – з використанням однокамерної зрівняльної посудини. Зрівняльна посудина 1 під'єднується до парового простору, причому і посудина, і трубка 2 тепловою ізоляцією не покривається.

Трубка 3 безпосередньо підключається до водяного простору барабана. Різниця ΔP ДМ, що вимірюється, становить: $P_1 = (H + H_0) \rho_v g$, де ρ_v – густина води у зрівняльній посудині й імпульсній трубці 2.

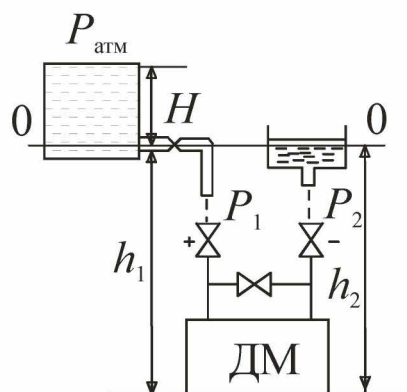


Рис. 47. Схема підключення дифманометра до відкритого резервуару

Тиск P_2 є сумою встановленого тиску стовпа рідини h у барабані, що має густину ρ' , стовпа H_0 в імпульсній трубці 3 густиною $\rho_{\text{в}}$ і стовпа пари в барабані заввишки $(H - h)$ і густиною ρ'' :

$$P_2 = H_0 \rho g + h \rho' g + (H - h) \rho'' g.$$

Тоді перепад ΔP , діючий на ДМ, дорівнюватиме:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = (H + h_1) \rho_1 g - h_2 \rho_2 g,$$

$$\Delta P = P_1 - P_2 = [H \rho_{\text{в}} - h \rho' - (H - h) \rho''] g = [H (\rho_{\text{в}} - \rho'') - h (\rho' - \rho'')] g.$$

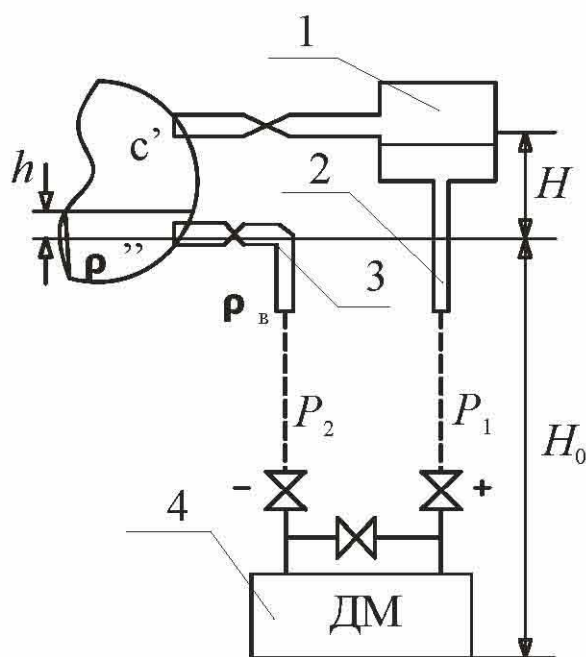


Рис. 48. Схема вимірювального рівня рідини в резервуарі під тиском

Звідси видно, що показання рівнеміра залежать не тільки від поточного значення H , але і від густини води $\rho_{\text{в}}$ і пара ρ'' , які у свою чергу залежать від тиску і температури в барабані. Тому розрахунок шкали ДМ-рівнемірів проводять за робочим (номінальним) тиском у барабані. Крім того, на результат вимірювання впливатиме вимірювання $\rho_{\text{в}}$ в імпульсній трубці 2, тоді як P_1 повинен залишатися

постійним. Це може відбуватися при зміні температури навколишнього середовища або температури середовища в барабані.

На рис. 49 представлені графіки, які ілюструють зміну показань рівнеміра при відхиленні тиску пари в барабані від розрахункового значення 16 МПа при температурі води в трубці 2, яка дорівнює 20 °С.

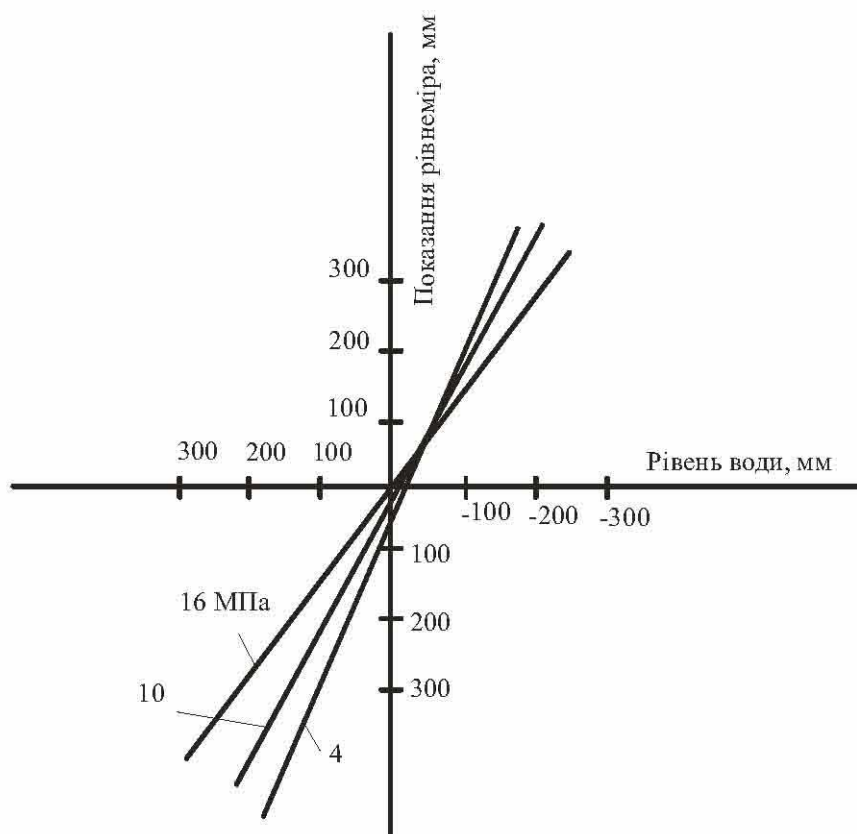


Рис. 49. Графіки залежності показань рівнеміра від рівня води в барабані

Рівнемір вимірює відхилення рівня в барабані від номінального в інтервалі ± 315 мм, отже номінальний рівень на рисунку відповідає позначці 0. Виникає необхідність використання двокамерної зрівняльної посудини і навіть комбінованого рівня посудин (імпульсна трубка 2 проходить не через всю судину 3, а виведена збоку).

6.1.3. Поплавковий та буйкові рівнеміри

Поплавцем називають рівнемір, який базується на вимірюванні положення поплавця, частково занурюваного в рідину, причому ступінь занурення поплавця (осідання) за незмінної густини незмінний.

Про рівень судять за положенням покажчика, сполученого з поплавцем гнучким (стрічка, трос) або жорстким механічним зв'язком. Поплавець переміщається вертикально разом з рівнем рідини і за його положенням визначають значення рівня. Найбільшого розповсюдження отримали рівнеміри з механічним зв'язком поплавця і вимірювальною схемою, причому цей зв'язок може бути утворений як гнучкими елементами (тросом, стрічкою), так і жорсткими (важелем, рейкою). Незначне розповсюдження мають рівнеміри з немеханічним зв'язком. Наприклад, поплавець може нести ампулу з радіоактивним ізотопом, а встановлений у верхній частині судини детектор реєструє інтенсивність випромінювання, пропорційно видаленню поплавця з детектора. В інших конструкціях поплавець може нести перемичку, яка закорочує у міру зміни рівня дві струни з високоомного матеріалу, що розташовані по висоті судини.

Можливий також індуктивний спосіб визначення положення поплавця.

Переваги рівнемірів-поплавців:

- простота пристрою;
- великий діапазон вимірювання;
- достатньо висока точність;
- можливість вимірювання рівня агресивних і в'язких середовищ;
- широкий температурний діапазон вимірювання.

Недоліки:

- наявність поплавця в резервуарі;
- труднощі вимірювання рівня в резервуарах під тиском.

Буйковими називають рівнеміри засновані на законі Архімеда: залежність виштовхуючої сили, діючої на буйок, від рівня рідини. Ч. е. є масивне тіло (наприклад, циліндр) – буйок – підвішене вертикально усередині посудини і частково занурене в контрольовану рідину.

Ємнісними називають рівнеміри засновані на залежності електричної місткості конденсаторного перетворювача (утвореного одним або декількома стрижнями, циліндрами або пластинами, частково введеними в рідину) від рівня рідини. Конструкція конденсаторних перетворювачів різна для електропровідних і неелектропровідних рідин. Електропровідними вважаються рідини, що мають питомий опір $\rho < 10^6$ Ом·м, а діелектрична проникність $\xi \geq 7$. Відмінність перетворювачів полягає в тому, що один з електродів рівнемірів для електропровідникових рідин покритий ізоляційним шаром; електроди пере-

творювачів для неелектропровідних рідин не ізолювані. Рівнеміри місткостей знайшли широке розповсюдження через дешевизну, простоту обслуговування, зручність монтажу первинного перетворювача на резервуарі, відсутність рухомих елементів, можливості використання в достатньо широкому інтервалі температур (від криогенних до $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$) і тиску (до 6 МПа).

До числа недоліків слід віднести:

- непридатність для вимірювання рівня в'язких (динамічна в'язкість більше $1\text{ Па}\cdot\text{с}$), плівкоутворюючих, що кристалізуються, і рідин, що випадають в осад;

- висока чутливість до зміни електричних властивостей рідини і зміни місткості кабелю, що сполучає первинний перетворювач із вимірювальним приладом.

Принцип дії *індуктивних* рівнемірів заснований на залежності індуктивності одиночної котушки або взаємної індуктивності двох котушок від глибини занурення їх в електропровідну рідину. Така залежність обумовлена виникненням в рідині під дією магнітного поля змінного струму збудження вихрових струмів, магнітне поле яких розмагнічує поле струму збудження.

Найбільшого застосування знайшли рівнеміри *дискретної дії*, в якій фіксується досягнення певних значень рівня, тобто показчик переміщується на сусідню позначку лише при зміні рівня на певне значення – крок дискретності.

Плюси дискретності індуктивних рівнемірів: незалежність показань від зміни температури середовища і наявності на чохлі плівок розплаву або оксидів (при вимірюванні рівня металу). У наш час випускаються дискретні індуктивні рівнеміри «Квант», призначені для вимірювання рівня розплавлених металів із температурою до $680\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Радіохвильовими називаються рівнеміри, які базуються на залежності параметрів коливань електромагнітних хвиль від висоти рівня рідини (рідкого металу). До радіохвильових методів відносяться радіолокаційний, радіоінтерференційний, ендовібраторний та резонансний.

Акустичні рівнеміри за принципом дії розділяють на локаційні, поглинання і резонансні. Найбільшого розповсюдження отримали локаційні рівнеміри.

Термокондуктометричні рівнеміри – це такі, елементом електроланцюга яких є резистор, що нагрівається струмом, з великим темпе-

ратурним коефіцієнтом електричного опору, який залежить від рівня рідини. Принцип дії їх заснований на відмінності умов теплообміну в рідинах і газах. Основна область їх застосування – криогенна техніка, де вони використовуються для вимірювання рівня зріджених газів. Для вимірювання рівня рідкого гелію застосовують рівнеміри, що використовують явище надпровідності, яке полягає в тому, що при температурі металу $< T_{\text{кр}}$ його $R = 0$ стає. Ч. е. перетворювачів виготовляють з танталу ($T_{\text{кр}} = 4,3 \text{ K}$), сплаву 65-БТ ($T_{\text{кр}} \approx 10 \text{ K}$), сплавів ніобію з титаном ($T_{\text{кр}} = 9,7 \text{ K}$) і ніобію з цирконієм ($T_{\text{кр}} = 10,8 \text{ K}$).

6.2. Вимірювання рівня сипких матеріалів

Є ряд обставин, що ускладнюють задачу вимірювання рівня сипких матеріалів у порівнянні з рідиною:

- неоднорідність речовин в об'ємі пов'язана з наявністю простору між твердими частинками заповненого газом. Ступінь неоднорідності залежить від розмірів частинок і безпосередньо впливає на фізичні властивості матеріалу, що ускладнює застосування методів вимірювання рівня, які враховують певні фізичні властивості;

- обмежена рухливість частинок через дію сил тертя і зчеплення між частинками, результатом чого є відсутність горизонтальної площини розподілу газ – матеріал. Поверхня сипкого матеріалу розташована до горизонталі під кутом природного ухилу, причому цей кут при заповненні або спорожненні ємності може бути різним. Обмежена поверхня частинок призводить також до склепіннеутворення, порушуючи нормальну роботу вимірювальних пристроїв;

- здатність сипких матеріалів до налипання і абразивна дія;

- запорошеність газового виробництва, що впливає на електричні властивості середовища, а також висуває підвищені вимоги до забезпечення вибухобезпечності.

Найпростішими за принципом дії рівнемірами є масові, засновані на зважуванні бункера разом із заповнюючим його матеріалом. У якості перетворювача тут може бути використана гідравлічна месдоза, яка є опорою однієї з лап бункера. Месдоза є сталевим корпусом, герметично закритим мембраною із закріпленим на ній

поршнем, на який спирається лапа бункера. Внутрішня порожнина корпусу (під мембраною) заповнена рідиною, яка сполучається з манометром. Тиск рідини в системі месдоза–манометр дорівнює силі тягара бункера з матеріалом, поділеного на площу поршня. Манометр градується в одиницях маси або рівня. Погрішність таких рівнемірів досягає $\pm 10\%$. У масових рівнемірах замість месдозы можуть застосовуватися і досконаліші магнітопружні перетворювачі, що забезпечують більш високу точність вимірювань (їх погрішність $\leq \pm 5\%$). Основним елементом таких перетворювачів є металевий ч. е., магнітна проникність якого змінюється при пружній механічній деформації. Магнітопружні перетворювачі встановлюються під опори бункера і включаються в схему неврівноваженого моста, вихідний сигнал якого буде залежати від ступеня деформації перетворювача, тобто від кількості матеріалу в бункері.

Зі всіх електричних методів вимірювання рівня найбільш вживаним є метод ємності. Це пояснюється як простотою конструкції перетворювача ємності, так і малою чутливістю його до неоднорідних. Як правило, перетворювачі застосовуються одноелектродними у вигляді зондів або ізольованих тросів, другим електродом є стіна бункера або допоміжний електрод. Основні експлуатаційні труднощі застосування таких рівнемірів: руйнування ізоляційного покриття перетворювача, налипання матеріалу, залежність показань від зміни електричних властивостей матеріалу, викликаних, наприклад, зміною його складу або вогкості.

Специфічним рівнеміром для сипких матеріалів є лотовий (рис. 50). Ч. е. таких рівнемірів є масивне тіло (лот) 1, підвішене на гнучкому тросі 2. На початку циклу вимірювальний лот зафіксований в граничному верхньому положенні. Цикл вимірювання рівня починається з моменту розгальмовування лота. При цьому під дією власної ваги лот починає опускатися. Одночасно сигнальний пристрій 3, реагуючи на натягнення троса, включає відліковий пристрій 4, реєструючи зсув лота щодо первинного граничного положення. У момент торкання

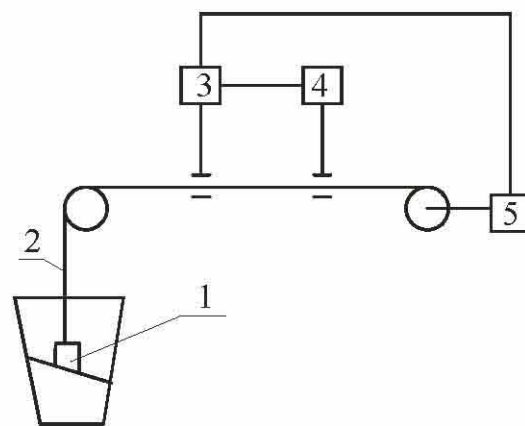


Рис. 50. Лотовий рівнемір

лотом поверхні натягнення троса зменшується і сигнальний пристрій 3 відключає відліковий пристрій, одночасно включаючи механізм підйому лота 5, який піднімає лот у початкове положення, після чого цикл вимірювання повторюється. Показання відлікового пристрою дозволяє визначити поточне значення рівня. Перед початком наступного циклу вимірювання показання відлікового пристрою повинні бути скинуті.

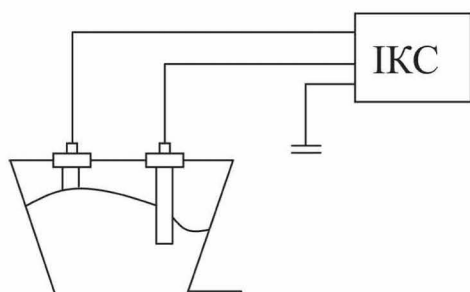


Рис. 51. Сигналізатор рівня

(застосовуються два електроди). Принцип дії таких сигналізаторів полягає в замиканні електричного ланцюга «стіна бункера–матеріал–електрод» при торканні поверхнею матеріалу електрода.

Основні недоліки при експлуатації: механічне руйнування електродів під дією матеріалу; можливість помилкових спрацьовувань у зв'язку зі втратою через заповнене середовище (звичайно, щоб уникнути цього на електроди встановлюють охоронні кільця).

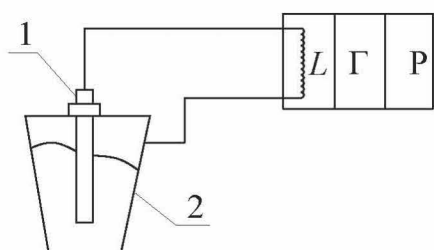


Рис. 52. Резонансна схема вимірювання

резонансна частота якого визначається місткістю перетворювача, тобто поточним значенням рівня. При збігу резонансної частоти контура з частотою напруги генератора Г (відповідний граничному значенню рівня) реле Р включає схему сигналізації.

Для сигналізації завантаження або спорожнення бункерів застосовується сигналізатори рівня (рис. 51). Для електропровідних матеріалів найбільш простими є кондуктометричні сигналізатори рівня (типа ІКС). Сигналізатор може контролювати або лише верхній рівень сипкого матеріалу в бункері (в цьому випадку застосовується лише один електрод), або верхній і нижній рівні

Для надійної роботи сигналізатори повинні бути встановлені в місцях, де виключена можливість утворення порожнин. В якості сигналізаторів рівня можуть використовуватися ємності з резонансною схемою вимірювання (рис. 52). Перетворювач ємності, що оснащений електродами 1 і стіною бункера 2, спільно з котушкою індуктивності L утворює коливальний контур,

Контрольні завдання і запитання

1. Дайте характеристику рівнемірам рідини з візуальним відліком.
2. Назвіть основні типи гідростатичних рівнемірів.
3. Дайте характеристику поплавковим та буйковим рівнемірам.
4. Дайте характеристику ємнісним рівнемірам.
5. Дайте характеристику індуктивним рівнемірам.
6. Дайте характеристику термокондуктометричним манометрам.
7. Назвіть основні особливості, які необхідно враховувати при вимірюванні рівня сипучих матеріалів.

Витратоміри

7.1. Вимірювання витрати рідин, газу і пару за перепадом тиску в звужуючому пристрої

При вимірюваннях, пов'язаних з обліком кількості речовини, найважливішими початковими поняттями є витрата і кількість речовини.

Витрата – кількість речовини, що протікає через перетин трубопроводу за одиницю часу. Відповідно до вибраних одиниць може проводитись вимірювання масової витрати Q_m (кг/с, кг/год, т/год) або об'ємної витрати Q_o (м³/с, л/с, м³/год).

Вимірювальний прилад, що служить для вимірювання витрати речовини, називається *витратоміром*, а прилад для вимірювання кількості речовини – *лічильником* (лічильником кількості).

Найбільшого розповсюдження отримали наступні різновиди витратомірів:

- змінного перепаду тиску зі звужуючими пристроями (відносяться до загальної групи витратомірів змінного перепаду);
- постійного перепаду тиску (відносяться до групи витратомірів обтікання);
- тахометричні;
- електромагнітні;
- ультразвукові.

Метод вимірювання витрати за перепадом тиску в звужуючому пристрої заснований на залежності перепаду тиску в нерухомому звужуючому пристрої, встановленому в трубопроводі, від витрати вимірювального середовища. Цей пристрій слід розглядати як первинний перетворювач витрати.

Створений в звужуючому пристрої перепад тиску вимірюється дифманометром, шкала якого градується в одиницях витрати, тому їх називають дифманометрами-витратомірами. Виходячи з необхід-

ності дистанційної передачі показань, дифманометр повинен бути забезпечений перетворювачем, який лінією зв'язку з'єднується з повторним приладом, що градує в одиницях витрати.

Даний принцип вимірювання полягає в тому, що при протіканні потоку через отвір звужуючого пристрою збільшується швидкість потоку в порівнянні зі швидкістю до звуження. Витрата може бути за перепадом тиску ΔP виміряна дифманометром відповідно до градуйованої характеристики $\Delta P = f(Q)$. Використання даного методу вимірювання вимагає виконання певних умов: характер потоку до і після звужуючого пристрою, що рухається, повинен бути турбулентним і стаціонарним; потік повинен повністю заповнювати весь перетин трубопроводу; фазовий стан потоку не повинен змінюватися при його течії через звужуючий пристрій; у внутрішній площині трубопроводу до і після звужуючого пристрою не утворюються осідання й інші види забруднень; на поверхнях звужуючого пристрою не утворюються відкладення, що змінюють його геометрію; пар є перегрітим, при цьому для нього справедливі всі положення, що стосуються вимірювання витрати газу.

Звужуючі пристрої умовно підрозділяються на стандартні і нестандартні. В якості стандартних звужуючих пристроїв для вимірювання витрати рідин, газів і пару використовуються діафрагми, сопла і, зокрема, сопла Вентурі (зрідка).

Діафрагма – це тонкий диск із круглим отвором, вісь якого розташована на осі труби (рис. 53). Стандартні діафрагми встановлюються на трубопроводах діаметром ≥ 50 мм.

Сопло (рис. 54) має спрофільовану вхідну частину, яка потім переходить в циліндрову ділянку діаметром d . Торцева частина сопла має циліндрову виточку $d_v > d$ для запобігання вихідної кромки циліндрової частини сопла від пошкодження. При вимірюванні витрати газу стандартні сопла встановлюють на трубопроводах діаметром ≥ 50 мм, а у випадку рідин ≥ 30 мм.

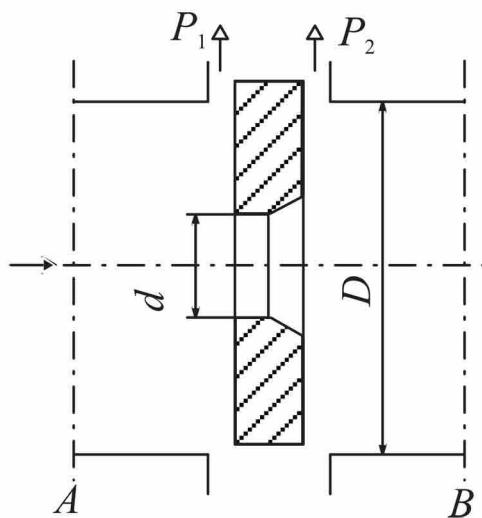


Рис. 53. Діафрагма

Сопло *Вентурі* (рис. 55) має вхідну частину з профілем сопла, який переходить в циліндрову частину, і вихідний конус (може бути довгим або укороченим). Мінімальний діаметр трубопроводу складає 65 мм. Символами P_1 і P_2 позначені точки відбору тиску на дифманометр.

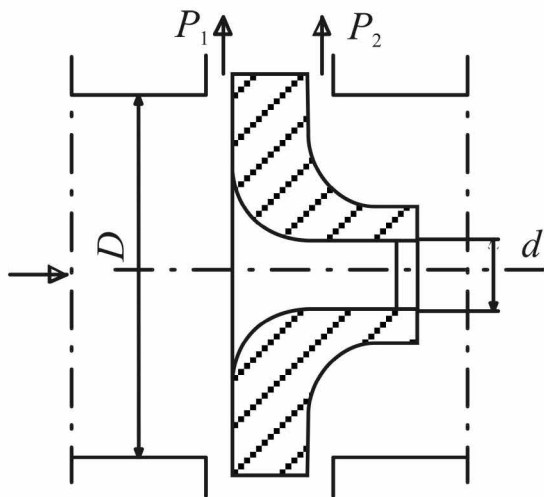


Рис. 54. Сопло

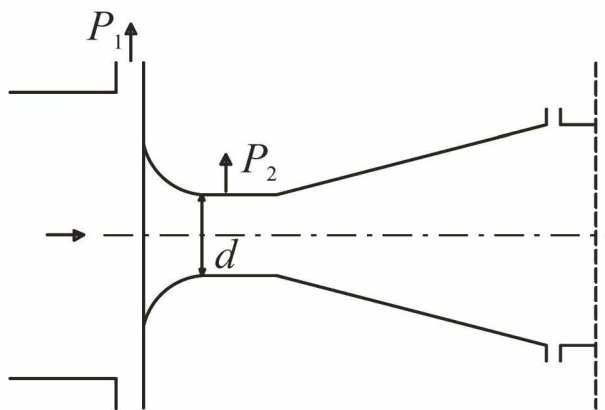


Рис. 55. Сопло Вентурі

Переваги витратомірів зі звужуючими пристроями:

- прості, дешеві і надійні засоби вимірювальних витрат;
- звужуючі пристрої універсальні, тобто можуть застосовуватися для вимірювання витрати практично будь-яких однофазних (іноді двофазних) середовищ у широкому діапазоні тиску, температур, витрат і діаметрів трубопроводів;
- градуйована характеристика стандартних звужуючих пристроїв може бути визначена розрахунковим шляхом, тому відпадає необхідність у зразкових витратомірних установках;
- можливість використання для різних умов вимірювання однотипних за устроєм дифманометрів і повторних приладів (індивідуальним для кожного витратоміра є тільки звужуючий пристрій).

Недоліки витратомірів зі звужуючими пристроями:

- нелінійна залежність між витратами і перепадом, що не дозволяє виміряти витрати $< 0,3Q_{в.п}$ через високу погрішність вимірювань;
- необхідність індивідуального градуювання звужуючих пристроїв при вимірюванні витрат з малими числами Re або в трубах малого діаметра;

– мають обмежену точність, причому погрішність вимірювання коливається в широких межах (1,5...3 %) залежно від стану звужуючого пристрою, діаметру трубопроводу, сталого тиску і температури середовища, що вимірюється;

– обмежена швидкодія (інерційність) через наявність довгих імпульсних трубок і у зв'язку з цим труднощі при вимірюванні швидкозмінних витрат.

Формули для розрахунків масових та об'ємних витрат мають вигляд:

$$Q_m = \alpha \varepsilon F_0 \sqrt{2\rho(P_1 - P_2)}; \quad (11)$$

$$Q_o = \alpha \varepsilon F_0 \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_1 - P_2)}, \quad (12)$$

де α – коефіцієнт витрати;
 ε – поправочний множник;
 F_0 – площа каналу діаметром d , м²;
 ρ – густина вимірюваного середовища до діафрагми;
 P_1, P_2 – тиск на вході (більш високий) та виході (більш низький) відповідно.

Це основна умова витрати для витратомірів зі звужуючими пристроями.

Коефіцієнт витрати матиме вигляд:

$$\alpha = \frac{\mu \sqrt{\Psi}}{\sqrt{\xi + K_e - K_a \mu^2 m^2}},$$

де μ – коефіцієнт звуження струменя, $\mu = F_b / F_0$ (F_b – площа труби якнайменшого перетину після d , $F_b < F_0$);
 ψ – коефіцієнт, $\psi = \frac{P_a - P_e}{P_1 - P_2}$;
 ξ – коефіцієнт опор на ділянці виміру;
 K_e, K_a – коефіцієнти;

m – модуль звужуючого пристрою, $m = \frac{F_0}{F} = \left(\frac{d}{D}\right)^2$ (F – площа каналу діаметром D ; d і D – відповідно діаметри звужуючого пристрою і труби).

Швидкість у найбільш вузькому перетині

$$U_{\epsilon} = \frac{1}{\sqrt{\xi + K_{\epsilon} - K_a \mu^2 m^2}} \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_a - P_{\epsilon})}.$$

Після перетворення формули (11) і (12) набувають вигляду:

$$Q_m = \alpha \epsilon F_0 \sqrt{2\rho (P_1 - P_2)} = \frac{\mu \sqrt{\Psi}}{\sqrt{\xi + K_{\epsilon} - K_a \mu^2 m^2}} F_0 \sqrt{2\rho (P_1 - P_2)},$$

$$Q_o = \frac{Q_m}{\rho} = \alpha F_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_1 - P_2)}.$$

Ці рівняння для визначення Q_m і Q_o придатні для стиснутого і нестиснутого середовищ, причому для нестиснутого $\epsilon = 1$.

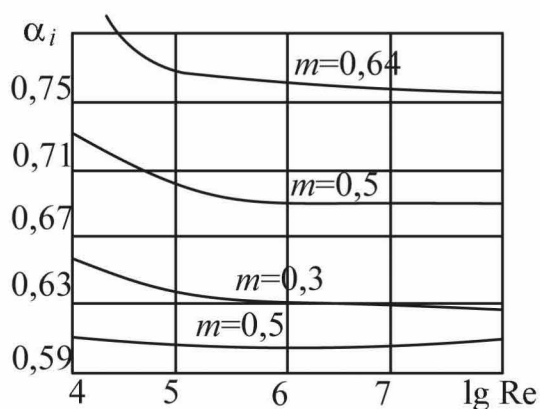


Рис. 56. Графіки залежності коефіцієнта α від числа Re

Використання цих формул припускає, що значення ρ , F_0 і α від витрати не залежать. Тоді $Q_m = K_m \sqrt{\Delta P}$, $Q_o = K_o \sqrt{\Delta P}$, де K_m , K_o – постійні коефіцієнти.

Коефіцієнт α залежить від числа Re ($Re > Re_{\min}$) (рис. 56). Поправний множник α_i залежить (для конкретного середовища) від відношення $\Delta P/P_1$, а оскільки $\Delta P = P_1 - P_2$ змінюється зі зміною витрати, то і α_i змінюється. Для практичного використання форму-

ли Q_m та Q_o як правило представляються в іншій формі:

$$Q_m = 0,01252 \alpha \varepsilon d^2 \sqrt{\rho \Delta P} = 0,01252 \alpha \varepsilon m D^2 \sqrt{\rho \Delta P};$$

$$Q_o = 0,01252 \alpha \varepsilon m D^2 \sqrt{\Delta P / \rho}.$$

Тут: d , мм; ΔP , Па; ρ , кг/м³; Q_m , кг/год; Q_o , м³/год.

Для визначення об'ємної витрати газу у нормальному стані Q_n за виміряною об'ємною витратою газу Q_o в робочих умовах при температурі T_n і тиску P_n використовують формулу

$$Q_n = Q_o \frac{P T_n}{T P_n K},$$

де K – коефіцієнт стисливості газу.

Розрахунок градуйованої характеристики звужуючого пристрою припускає обчислення чисельного значення α , ε , d , ρ в робочих умовах за відомого діаметра прохідного отвору звужуючого пристрою d_{20} і труби D_{20} в нормальних умовах (тобто відомому m). Після встановлення кількісного співвідношення між Q і ΔP по виміряному в реальних умовах за допомогою певного дифманометра перепаду тиску на даному звужуючому пристрої може бути обчислена витрата через нього.

Коефіцієнт витрати $\alpha = f(Re, m)$. На гідродинаміку потоку впливає шорсткість трубопроводу, причому ступінь цього впливу визначається діаметром труби. Окрім того, для реальних діафрагм вхідні крайки не є ідеально прямокутними (існує притуплення вхідної крайки). Коефіцієнт витрати початковий α_i – коефіцієнт витрати звужуючого пристрою ідеальної форми (якщо це діафрагма, то з ідеально прямокутною вхідною крайкою) – визначається в гладкому трубопроводі при $Re > Re_{min}$. Таким чином α_i залежить від m і Re , і не залежить від шорсткості трубопроводів і ступеня притупленості вхідної крайки діафрагми. Причому α збільшується зі зростанням m і зменшенням числа Re (для діафрагми при великих m із зміною Re від Re_{min} до 10^8 зменшення α_i може доходити до 8 %).

Коефіцієнт витрати α (в розрахункових формулах) називається розрахунковим. Він характеризує реальні умови роботи звужуючого пристрою: наявність шорсткості труби і притуплення вхідної крайки

(для діафрагм). Значення α можна розрахувати за α_i з використанням поправочних множників на шорсткість трубопроводу і притуплення вхідної крайки діафрагми. Реально існуюча шорсткість трубопроводів загострює профіль швидкостей і дещо збільшує α , особливо при малих діаметрах труб. Це вираховується множенням α_i на поправочний множник $K_{\text{ш}}$. Для всіх типів звужуючих пристроїв $K_{\text{ш}}$ зростає зі зменшенням діаметра трубопроводів і зростанням m . Труби діаметром $D \geq 300$ мм мають малу відносну шорсткість (за властивостями наближеними до гладких), тому $K_{\text{ш}} = 1$.

Значення поправочного множника $K_{\text{п}}$ на притуплення вхідної крайки залежить від D трубопроводів і відносної площі діафрагми (коефіцієнт $K_{\text{ш}}$ зменшується зі зростанням D і m). Таким чином розрахунковий коефіцієнт α через α_i при $Re > Re_{\text{min}}$ визначається за формулами:

– для діафрагм $\alpha = \alpha_i K_{\text{ш}} K_{\text{п}}$;

– для сопел $\alpha = \alpha_i K_{\text{ш}}$.

При розрахунку градуйованої характеристики $\Delta P = f(Q)$ доцільно задаватися значеннями Q , за якими слід визначати α (при відомому значенні m). При цьому коефіцієнти $K_{\text{м}}$ і $K_{\text{о}}$ виявляться залежними від витрати, тобто шкала витратоміра буде нерівномірною. Якщо не потрібна висока точність вимірювання, то можна обчислити α при середній витраті, надалі вважаючи α постійним при будь-якій витраті. Значення α можна підраховувати тільки для тих витрат, при яких $Re > Re_{\text{min}}$ (для діафрагм при $0,05 \leq m \leq 0,20$ $Re_{\text{min}} = 5 \cdot 10^3$; при $0,20 < m \leq 0,59$ $Re_{\text{min}} = 10^4$; для $0,5 \leq m \leq 0,64$ $Re_{\text{min}} = 2 \cdot 10^4$; для сопел при $0,05 \leq m \leq 0,20$ $Re_{\text{min}} = 7 \cdot 10^4$; $0,20 \leq m < 0,60$ $Re_{\text{min}} = 2 \cdot 10^4$). Практично зручніше визначати число Re не за швидкістю, а за витратою речовини, що вимірюється:

$$Re = 0,354 \frac{Q_{\text{о}}}{D \nu} = 0,0361 \frac{Q_{\text{о}} \rho}{D \mu};$$

$$Re = 0,354 \frac{Q_{\text{м}}}{D \rho \nu} = 0,0361 \frac{Q_{\text{м}}}{D \mu},$$

де D – внутрішній діаметр трубопроводу, мм;
 μ – динамічна в'язкість середовища, Н·с/см²;
 ν – кінематична в'язкість, м²/с.

Поправочний множник ε на розширення середовища, що вимірюється, вводиться в рівняння витрати унаслідок зміни густини газу при проходженні через звужуючий пристрій. В загальному випадку

$\varepsilon = f\left(\frac{\Delta P}{P}, m, k\right)$, де k – показник адіабати середовища. При однако-

вих $\frac{\Delta P}{P}$ для діафрагм ε завжди більше, ніж для сопла, унаслідок радіального розширення струменя, що приводить до збільшення F її звуженої частини. Ступінь зміни ε визначається $\frac{\Delta P}{P}$, причому при зрос-

танні $\frac{\Delta P}{P}$ значення ε зменшується. При малих значеннях $\frac{\Delta P}{P}$ $\varepsilon \approx 1$.

У більшості випадків $\frac{\Delta P}{P} \leq 0,05$; при цьому $\varepsilon > 0,94$ – для сопла та $\varepsilon > 0,97$ – для діафрагм.

При зміні витрати змінюється ΔP на звужуючому пристрої і $\frac{\Delta P}{P}$ та ε . При розрахунку залежності $\Delta P = f(Q)$ величина ε може бути підрахована для заданої витрати. Проте в розрахункових формулах часто використовується $\varepsilon_{\text{сер}}$ відповідно $Q_{\text{сер}}$. При цьому необхідне $\frac{\Delta P_{\text{сер}}}{P}$ знаходиться за формулою (для всіх дифманометрів, окрім дзвонових)

$$\frac{\Delta P_{\text{сер}}}{P} = \frac{\Delta P_{\text{н}}}{P} \left(\frac{Q_{\text{сер}}}{Q_{\text{в.м}}} \right),$$

де $\Delta P_{\text{н}}$ – граничний номінальний перепад тиску дифманометра (перепад, відповідний витраті);

$Q_{\text{сер}}$ – середня витрата;

$Q_{\text{в.м}}$ – верхня межа вимірювального витратоміру.

При використанні останньої формули слід пам'ятати, що ΔP і P повинні мати одну вимірність.

Очевидно, що при такому способі визначення $\varepsilon_{\text{сер}}$ при всіх витратах, відмінних від $Q_{\text{сер}}$, з'явиться додаткова погрішність через відхилення дійсної ε від $\varepsilon_{\text{сер}}$. Ця погрішність залежить від $\frac{\Delta P_{\text{сер}}}{P}$, причому із зменшенням $\frac{\Delta P_{\text{сер}}}{P}$ погрішність зменшується.

Діаметри звужуючого пристрою і трубопроводу звичайно задаються значеннями при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ і позначаються d_{20} та D_{20} . При $t_{\text{роб}}$ вони визначаються за формулами:

$$d = d_{20} K'_t; \quad D = D_{20} K''_t,$$

де K'_t і K''_t – поправочні множники на розширення матеріалу звужуючого пристрою і трубопроводу. Ці множники залежать від матеріалу і $t_{\text{сер}}$ та визначаються за формулами й таблицями. При $t_{\text{сер}} = -20 \dots + 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ $K'_t = K''_t = 1$.

Густина вимірювального середовища, що входить в рівняння витрати, визначається за станом потоку до звужуючого пристрою (до початку звуження), тому термодатчик, який вимірює $t_{\text{сер}}$, встановлюється до звужуючого пристрою і на такій відстані від нього, щоб не було спотворення ним профілю потоку на вході у звужуючий пристрій (на відстані 5...20 діаметрів труби D_{20} в залежності від m і діаметра чохла термодатчика). Установка термодатчика за звужуючим пристроєм допускається у випадку повної упевненості в незмінності температури потоку при проходженні через звужуючий пристрій. В цьому випадку термодатчик встановлюється на відстані $(5 \dots 10) D_{20}$ від звужуючого пристрою.

За «Правилами вимірювання витрат газу і рідин стандартними звужуючими пристроями» надмірний тиск середовища $P_{\text{н}}$ необхідно виміряти безпосередньо біля вхідного торця звужуючого отвору, який не повинен використовуватися для вимірювання перепаду тиску. Абсолютний тиск середовища P визначається як

$$P = P_{\text{н}} + P_{\text{бар}},$$

де $P_{\text{бар}}$ – барометричний тиск. Для рідин $P_{\text{бар}} = 0,1$ МПа, для газів також $P_{\text{бар}} = 0,1$ МПа, якщо $\frac{1 - P_{\text{бар}}}{P_{\text{н}}} \leq 0,001$.

При вимірюванні температури і тиску відома густина $\rho_{\text{н}}$ при температурі $t_{\text{н}}$ визначається за таблицями або за формулою

$$\rho = [1 - \beta(t - t_{\text{н}})] \rho_{\text{н}},$$

де β – середній коефіцієнт об'ємного теплового розширення рідини в інтервалі $t_{\text{н}} \dots t$;

t – робоча температура середовища.

Густина сухого газу за температури T і робочим тиском P може бути визначена за нормальних умов ($t_{\text{н}} = 20$ °С, $P_{\text{н}} = 101325$ Па, відносна вологість $\varphi = 0$) за формулою

$$\rho = \frac{\rho_{\text{н}} P T_{\text{н}}}{T P_{\text{н}} K}.$$

Обчислені $\alpha, \varepsilon, d, \rho$ після підстановки у формули для визначення $Q_{\text{м}}$ та $Q_{\text{о}}$ дозволяють отримати статичну характеристику $\Delta P = f(Q)$ звужуючого пристрою, за допомогою якої визначають витрату за виміряним перепадом тиском ΔP . За вказаними «Правилами вимірювання витрат газу і рідин стандартними звужуючими пристроями» може бути проведений розрахунок звужуючого пристрою, метою якого є визначення d_{20} . В цьому випадку градуйована характеристика звужуючого пристрою задається вибором верхньої межі вимірювання $Q_{\text{в.м}}$ за витратою і відповідним їм $\Delta P_{\text{н}}$ на звужуючому пристрої.

Викладена методика розрахунку градуйованих характеристик застосовується тільки для стандартних звужуючих пристроїв. Нестандартні звужуючі пристрої повинні градуюватися експериментально.

7.2. Оцінка погрішності вимірювання витрати

Рівняння витрати (11) і (12) показують, що значення витрати є результатом непрямих вимірювань. За відомими середніми квадратними погрішностями $\delta_\alpha, \delta_\xi, \delta_d, \delta_\rho, \delta_{\Delta P}$ можна визначити середню квадратну погрішність вимірювання Q_m за відсутності кореляційної залежності між погрішностями δ_i :

$$\sigma_{Q_m} = \left[\left(\frac{\delta Q_m}{\delta \alpha} \delta_\alpha \right)^2 + \left(\frac{\delta Q_m}{\delta \xi} \delta_\xi \right)^2 + \left(\frac{\delta Q}{\delta d} \delta_d \right)^2 + \left(\frac{\delta Q}{\delta \rho} \delta_\rho \right)^2 + \left(\frac{\delta Q_m}{\delta \Delta P} \delta_{\Delta P} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}.$$

У попередніх формулах витрат є дві групи величин, що розрізняються способом отримання їх значень. До першої групи відносяться α і ξ , значення яких знайдені шляхом обробки великого числа вимірювань і для яких відомі середні квадратні погрішності δ_α і δ_ξ .

До другої групи відносяться d , ρ , ΔP , які визначаються за наслідками однократних вимірювань і для яких відомі максимальні погрішності δ_d , δ_ρ , $\delta_{\Delta P}$. Для цієї ж групи величин береться середня квадратна погрішність вимірювання, що дорівнює половині максимальної (віддають перевагу нормальному закону розподілу окремих погрішностей при вибірковій довірчій імовірності 0,95).

Таким чином будемо мати $\delta_d/2$, $\delta_\rho/2$, $\delta_{\Delta P}/2$. Як правило дифманометри-витратоміри забезпечуються пристроями добування квадратного кореня з ΔP (що вимірюється) для отримання рівномірної шкали за витратою. В цьому випадку клас манометра характеризує точність вимірювання $\sqrt{\Delta P}$, а не ΔP і доданок $\left(\frac{\delta Q_m}{\delta \Delta P} \delta_{\Delta P} \right)^2$ слід замі-

нити на $\left(\frac{\delta Q_m}{\delta \sqrt{\Delta P}} \delta_{\sqrt{\Delta P}} \right)^2$.

Для відносної погрішності одержуємо:

$$\delta_{Q_m} = \left[\delta_\alpha^2 + \delta_\xi^2 + (2\delta_d)^2 + \left(\frac{\delta_\rho}{2} \right)^2 + \delta_{\sqrt{\Delta P}}^2 \right]^{\frac{1}{2}}.$$

Через δ_d виключають остаточно:

$$\delta_Q = \sqrt{\delta_\alpha^2 + \delta_\xi^2 + \frac{\delta_p^2}{4} + \delta_{\sqrt{\Delta P}}^2}.$$

Гранична відносна погрішність вимірювання витрати $\delta_Q = 2\delta_Q$. Неправильно δ_Q визначати через клас вторинного приладу $K_{в.п}$ і його верхню межу вимірювання $Q_{в.м}$ за формулою $\delta_Q = K_{в.п} \frac{Q_{в.м}}{Q}$. Клас вторинного приладу визначає граничну погрішність, з якою змінюється вхідна величина повторного приладу. Ця погрішність є частиною погрішності $\delta_{\sqrt{\Delta P}}$ вимірювання перепаду, що входить в останню формулу δ_Q .

7.3. Витратоміри постійного перепаду. Ротаметри

Ці прилади використовуються у промислових лабораторних умовах для вимірювання невеликих об'ємних витрат рідин (верхні межі вимірювання ротаметрів по воді знаходяться в межах від 0,04 до 16 м³/год) або газів (верхня межа вимірювання по повітрю знаходиться від 0,063 до 40 м³/год) у вертикальних трубопроводах діаметром 4...100 мм.

У найпростішому вигляді ротаметр (рис. 57) представляє вертикальну конічну (розширюється догори) скляну трубку 1, у середині якої розташовується поплавць 2. Поплавці можуть мати різну форму. Однією з форм є циліндрова з нижньою конічною частиною і верхнім бортом з вирізаними на ньому косими канавками. Контрольоване середовище при протіканні через ці канавки забезпечує обертання поплавця. При цьому він центрується по осі трубки і усувається його тертя об стінки. Між бортом поплавця і стінкою трубки утворюється кільцевий зазор f_k ,

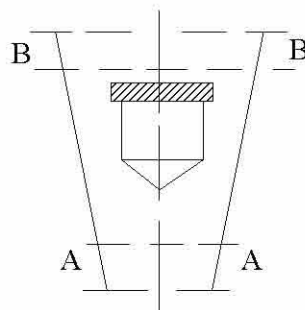


Рис. 57. Ротаметр

при проходженні через який рідина звужується і таким чином виникає різниця між тиском P_1 в перетині $A-A$ до початку звуження і тиску P_2 в найвужчому перетині $B-B$ кільцевого струменя. З підйомом поплавця f_k зростає, що за незмінної витрати приведе до зменшення $(P_1 - P_2)$.

Принцип дії ротаметра ґрунтується на урівноваженні при будь-якій витраті сили тягара поплавець силами, які діють на нього з боку рідини. При цьому вертикальне положення поплавця буде однозначно пов'язано з витратою.

На поплавець об'ємом V , що має найбільший перетин f , середню густину ρ_n , зверху вниз діє сила тягара $G = V\rho_n g$.

Знизу вгору на поплавець діють:

– сила, обумовлена різницею статичного тиску $(P_1 - P_2)$, яка виникає унаслідок прискорення потоку в кільцевому зазорі між стіною і поплавцем, $F = (P_1 - P_2)f$;

– динамічний натиск $W = \phi \frac{\rho v^2}{2}$, де ϕ – коефіцієнт опору поплавця залежний від його форми; ρ – густина середовища; v – її швидкість в перетині $A-A$.

– сила тертя потоку об бічну поверхню поплавця $N = k v_k^n f_\delta$, де k – коефіцієнт залежний від числа Re і ступені шорсткості поплавця; v_k – середня швидкість потоку в кільцевому зазорі; n – показник ступені залежний від швидкості; f_δ – площа бічної поверхні поплавця.

Поплавець буде нерухомо знаходитися в потоці рідини або газу, якщо буде збережено рівність сил, які діють на нього зверху і знизу:

$$G = (P_1 - P_2)f + W + N \rightarrow F = P_1 - P_2 = \frac{G - W - N}{f}.$$

Якщо нехтувати силами W та N , то $P_1 - P_2 = G/f$, тобто перепад тиску на поплавці виявиться незалежним від витрати (насправді через зростання W та N перепад $(P_1 - P_2)$ дещо зменшується зі зростанням витрати). Тому ротаметри відносять до групи витратомірів постійного перепаду.

Пояснимо дію ротаметра. Припустимо, що при початковій витраті Q_0 поплавець займає початкове положення, що характеризується площею кільцевого зазору f_k . У даному випадку на поплавець діє перепад $(P_1 - P_2)$, при якому виконується рівність $P_1 - P_2 = G/f$. При зростанні витрати в перший момент положення поплавця і f_k незмінні, через що $(P_1 - P_2)$ почне зростати. При цьому порушиться рівність і поплавець підніметься вгору. При цьому f_k збільшиться (через конусність профілю трубки), що приведе до зменшення $(P_1 - P_2)$. Підйом поплавця буде здійснюватися до тих пір, поки не відновиться вказана рівність. Очевидно, що будь-якій витраті буде відповідати визначене f_k , тобто певне положення поплавця:

$$Q_0 = \alpha f_k \sqrt{2g \nu \frac{\rho_{\pi} - \rho}{\rho f}}.$$

Із рівняння витікає, що при $\alpha = \text{const}$ існує лінійна залежність між Q_0 та f_k . Проте при конічній формі трубки лінійної залежності між Q_0 і переміщенням поплавця H не буде через нелінійну залежність $f_k = \varphi(H)$. Крім того, в реальних умовах при переміщенні поплавця дещо змінюється α . Тому використання рівномірної шкали для ротаметрів обумовлює певну частку в загальній погрішності вимірювання.

З вищенаведеної рівності впливає також, що положення поплавця залежить не лише від витрати, але і густини контрольованого середовища, тобто градування ротаметра повинно проводитися з її урахуванням.

Через більшу різноманітність контрольованих середовищ ротаметри поділяються на дві групи: для рідин, які градуються на воді, і для газів, які градуються на повітрі.

Якщо такі ротаметри використовуються для вимірювання витрати інших середовищ, то їх показання потрібно перемножити на поправочний множник K . Якщо в'язкості середовищ, що вимірюються,

і градуйованої близькі, то $K = \sqrt{\frac{\rho_{\text{гр}} (\rho_{\pi} - \rho)}{\rho (\rho_{\pi} - \rho_{\text{гр}})}}$, де $\rho_{\text{гр}}$ та ρ — густина

градуйованого і дійсного середовища відповідно. Звичайно для газів $\rho \ll \rho_{\text{п}}$, тоді $K = \sqrt{\rho_{\text{гр}}/\rho}$.

Переградування ротаметра відповідно до рівняння для Q_0 може бути здійснено зміною $\rho_{\text{п}}$ (шляхом виготовлення поплавця з іншого матеріалу або порожнистим).

Найбільший вплив на погрішність вимірювання витрати ротаметрам дає зміна α (наприклад, через зміну структури потоку унаслідок турбулентності), погрішність визначення густини середовища, відмінність дійсних розмірів трубки і поплавця від розрахункових. Ці погрішності мають достатньо високі значення, причому деякі з них зростають до початку шкали. Це обумовлено наступним:

- невисоким класом ротаметрів загальнопромислового призначення (звичайний клас 2,5);
- мінімальною витратою, що вимірюється, $Q_{\text{мін}} = 0,2 Q_{\text{в.м}}$, як правило, діапазон вимірювання дорівнює $(0,2 \dots 1,0) Q_{\text{в.м}}$.

Погрішність ротаметрів може бути зменшена у 2–3 рази індивідуальним градуванням. Звичайно в ротаметрах використовуються скляні конічні трубки, на зовнішній поверхні яких нанесена шкала. Показчиком служить верхня горизонтальна площина поплавця. Такі ротаметри застосовують до тиску газів або прозорих рідин 0,6 МПа (6 кг/см^2).

Для вимірювання витрати середовищ під надмірним тиском до 6,4 МПа використовуються ротаметри з металевою конічною трубкою. Звичайно, такі ротаметри забезпечуються ДТП (диференціально-трансформаторними перетворювачами) або пневматичними для дистанційної передачі показань. Клас ротаметрів із ДТП в комплекті з повторним приладом складає 2,5. Ротаметри з вихідним пневматичним сигналом $0,2 \dots 1,0 \text{ кг/см}^2$ випускаються класів 1,5 і 2,5.

Матеріал поплавців: сталь, Al, бронза, ебоніт, пластмаси – не повинні піддаватися корозії в контрольованому середовищі.

Переваги ротаметрів:

- простота пристрою;
- можливість вимірювання малих витрат і на трубопроводах малих діаметрів;
- практично рівномірна шкала.

Недоліки ротаметрів:

- необхідність установки лише на вертикальних ділянках трубопроводів;
- труднощі дистанційної передачі показань і запису;
- непридатність для вимірювання витрати середовищ із високим тиском і температурою.

7.4. Тахометричні витратоміри

Тахометричні витратоміри – це витратоміри, в яких швидкість руху робочого тіла (надалі – р. т.) пропорційна об’ємній витраті середовища, що вимірюється. У більшості випадків р. т. – перетворювач витрати (турбіна, кулька тощо) – під впливом потоку обертається. Залежно від устрою тахометричні витратоміри підрозділяються на турбінні, кулькові і камерні.

Тахометричні перетворювачі витрат можуть використовуватися як у лічильниках кількості, так і у витратомірах. У першому випадку перетворювач витрат (наприклад, турбіна) пов’язаний з рахунковим механізмом. Тахометричні витратоміри за допомогою електричних тахометричних перетворювачів частоти перетворюють обертання чутливого елемента в електричний сигнал, що вимірюється потім показуючим приладом. Такі електричні перетворювачі швидкості надають незначну гальмуючу дію на рухливий елемент (у порівнянні з механічною передачею в лічильниках), через що точність тахометричних витратомірів вища за точність лічильників із механічним редуктором.

Тахометричні прилади виміряють об’ємні витрати. За необхідності вимірювання масових витрат вони повинні забезпечуватися відповідними мірами та обчислювальним пристроєм.

Тахометричні витратоміри застосовують для вимірювання витрати різних рідин (рідше газів), причому деякі їх різновиди можуть використовуватися на забруднених рідинах.

Погрішність вимірювання і втрати статичного тиску на витратомірі залежать від витрати і в’язкості рідини. Тому важливими технічними даними таких приладів є мінімальна витрата (нижня межа вимірювання), що вимірюється, і втрата тиску на них.

Турбінні витратоміри застосовують для вимірювання витрати різних рідин за винятком дуже в'язких і забруднених. Для них важливою є змащувальна здатність середовища, що вимірюється, тому найбільш доцільно їх використовувати на нафтопродуктах. Для вимірювання витрати газу турбінні витратоміри застосовують рідко. Це пов'язано з тим, що через малу густину газу достатньо великий обертаючий момент виходить тільки при великих витратах. У свою чергу це зменшує діапазон вимірювання витратоміра і збільшує поріг чутливості. Крім того, в газовому середовищі швидшає спрацювання підшипників.

На рис. 58 корпус 1 є відрізком труби з двома фланцями для кріплення його до трубопроводу. У середині корпусу встановлені струменеподібні випрямлячі 2 і 3, сполучені нерухомою віссю, на якій розташована турбіна 4. У витратомірах частота обертання турбіни, пропорційна об'ємній витраті, за допомогою тахометричного перетворювача 5 (див. рис. 58, а) перетворюється в частоту вихідної напруги і потім за допомогою спеціальної схеми – в аналоговий вихідний сигнал. У лічильниках кількості частота обертання турбіни, пропорційна кількості речовини, що протекла, вимірюється рахунковим механізмом, сполученим з віссю турбіни шестерним редуктором і магнітною муфтою.

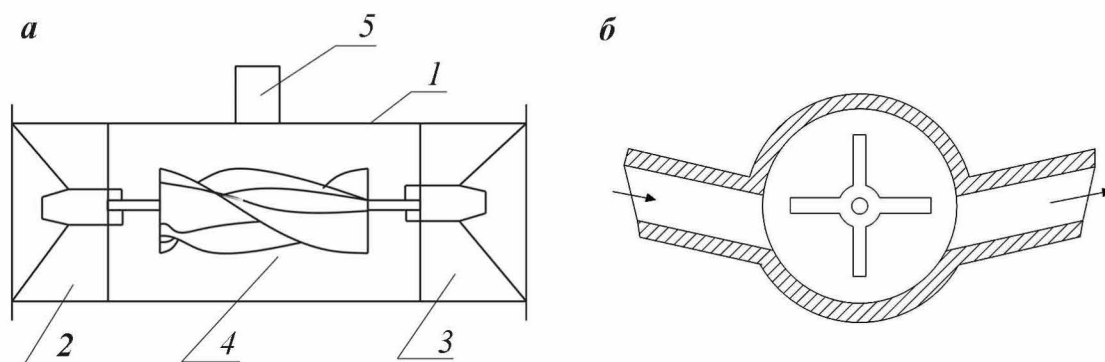


Рис. 58. Турбінні витратоміри

Турбінки тахометричних витратомірів підрозділяються на аксіальні і тангенціальні. У перших вісь співпадає з напрямом потоку, у других – вона перпендикулярна потоку.

Аксіальні турбіни мають лопаті гвинтової форми. При малому діаметрі турбін число лопатей мале (4...6), але вони мають велику

довжину. При великих діаметрах турбіни кількість лопатей велика (до 20), але їх висота і довжина невелика (щодо діаметра).

На рис. 58, б показана турбінка одноструменевих водолічильників.

При незначних навантаженнях на турбіну її частота обертання ω пропорційна об'ємній витраті Q_0 ; проте на характер цієї залежності впливають в'язкість ν і густина середовища ρ , що вимірюється, момент опору M_c від тертя в опорах і реакції тахометричного перетворювача частоти обертання 5 (див. рис. 58, а) або механічного лічильника, конструктивні параметри турбінок.

Прикладом турбінного тахометричного витратоміру, який можна використовувати на ТЕС, є витратомір топкового мазуту ТМ-1. Вони мають ДТП (тахометричний), сигнал від якого поступає до нормуючого перетворювача з вихідним сигналом 0...5 мА. Перетворювачі витрат таких витратомірів виготовляють з діаметрами умовних проходів 32...200 мм для P до 6,4 МПа та t 50...150 °С. Витратоміри можуть мати шкали з верхніми межами 6,3...240 м³/год. Діапазони вимірювання таких витратомірів $(0,2...1,0)Q_{в.м}$. У діапазоні $(0,3...1,0)Q_{в.м}$ гранична основна погрішність складає $\pm 2\%$, а в діапазоні $(0,2...0,3)Q_{в.м}$ – $\pm 2,5\%$.

На сьогодні турбінні витратоміри є одними з найбільш точних. Існують витратоміри, що випускаються серійно, з основною погрішністю 0,5 %, яка може бути зменшена індивідуальним градуванням.

Переваги турбінних витратомірів:

- можливість вимірювання витрат у широкому діапазоні $(5 \cdot 10^{-9} \dots 2 \text{ м}^3/\text{с})$ на трубопроводах $D = 4 \dots 750$ мм при P до 250 МПа і $t - 240 \dots + 700$ °С;
- великий діапазон вимірювання (при великих швидкостях і діаметрах труб діапазон вимірювання досягає 15...20, при малих швидкостях і малих діаметрах труб – 5...10);
- мала інерційність.

Недоліки турбінних витратомірів:

- вплив в'язкості контрольованого середовища;
- спрацювання опор (не можна, наприклад, виміряти витрати середовищ, що містять зважені частинки, особливо, якщо вони володіють абразивними властивостями).

Кульковими називають тахометричні витратоміри, рухливим елементом яких є кулька, що безперервно рухається в одній площині по

внутрішній поверхні трубки під впливом заздалегідь закрученого потоку (рис. 59). Швидкість руху кульки по колу трубки пропорційна об’ємній витраті рідини.

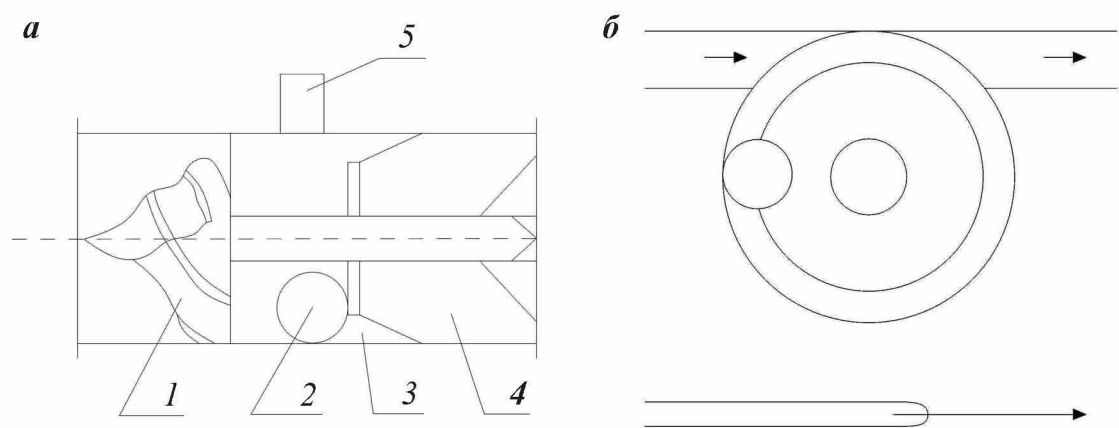


Рис. 59. Кулькові витратоміри:
а – для великих витрат; *б* – для малих витрат

Потік рідини (рис. 59, *а*), закручений формувачем 1 у гвинтовому напрямі, викликає рух кульки 2 по колу. Від переміщення уздовж трубки кулька утримується обмежувальним кільцем 3, за яким розташовується струмовипрямовувач 4 для випрямлення закрученого потоку. На зовнішній стороні немагнітного корпусу розташований тахометричний перетворювач 5 для перетворення частоти обертання в частотний електричний сигнал.

Для невеликих витрат застосовується конструкція, яка зображена на рис. 59, *б*. Тут немає спеціального формувача для закручування потоку, а рух кульки по колу викликається тангенціальним підведенням рідини. В кулькових витратомірах застосовуються тахометричні перетворювачі швидкості, аналогічні перетворювачам турбінних витратомірів. Кулька (див. рис. 59, *а*) під дією відцентрової сили притискається до внутрішньої поверхні труби, а під дією осьової складової швидкості потоку – до обмежувального кільця, тобто кульки, окрім сил в’язкого тертя рідини необхідно подолати сили тертя об поверхні трубки і обмежувальні кільця. Це викликає відставання кола швидкості кульки $v_{ш}$ від кола швидкості потоку v . Швидкість оцінюється

коефіцієнтом ковзання $s = \frac{v - v_{ш}}{v}$, звідси $v_{ш} = v(1 - s)$.

Частота імпульсів тахометричного перетворювача пов'язана зі швидкістю кульки $f = \frac{v_{ш}}{2\pi r}$, де r – радіус обертання центру кульки. Враховуючи, що $v = k Q_0$, де k – коефіцієнт пропорційності, отримаємо $f = k Q_0 \frac{1-s}{2\pi r}$.

Таким чином, для забезпечення однозначної залежності між f і Q_0 треба мати $s = \text{const}$. Коефіцієнт s менш за все змінюється в області $Re\ 10^3 \dots 10^5$, тому кулькові витратоміри проектуються для роботи в цьому діапазоні. Крім того, для зменшення ковзання маса кульки робиться по можливості малою. Згідно стандарту кулькові витратоміри можуть застосовуватися для вимірювання витрати рідин з $\rho = 700 \dots 1400\ \text{кг/м}^3$, в'язкістю $0,3 \dots 12\ \text{сст}$ $\left[(0,3 \dots 12) \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}} \right]$. За відсутністю опор у рухливого елемента витратоміри можуть використовуватися на рідинах з твердими включеннями обмеженої крупності і агресивних. Діапазон вимірювання кулькових витратомірів звичайно рівний $(0,2 \dots 1,0) Q_{в.м}$, проте в діапазоні $(0 \dots 0,3) Q_{в.м}$ вони володіють підвищеною погрішністю в порівнянні з діапазоном $(0,3 \dots 1,0) Q_{в.м}$. Приведена погрішність звичайно рівна $\pm 1,5\ %$ в інтервалі $(0,3 \dots 1,0) Q_{в.м}$ і $\pm 2,5\ %$ в інтервалі $(0,2 \dots 0,3) Q_{в.м}$.

На АЕС використовуються кулькові витратоміри двох модифікацій: ШТОРМ-32М і ШТОРМ-8А (верхня межа вимірювань відповідно 50 і $8\ \text{м}^3/\text{год}$). Основна погрішність їх $\pm 1,5 \dots 2,5\ %$.

Камерними називаються тахометричні витратоміри та лічильники, що мають один або декілька рухливих елементів, які при русі відміряють певні об'єми рідини. Зазвичай ці елементи рухаються безперервно зі швидкістю пропорційною об'ємній витраті. У промисловості в більшості випадків застосовують камерні лічильники.

Переваги камерних лічильників:

- висока точність вимірювання ($0,5 \dots 1\ %$ – для рідин і $1 \dots 1,5\ %$ – для газів);
- достатньо великий діапазон вимірювання;
- слабкий вплив в'язкості середовища, що вимірюється. Це дозволяє застосовувати камерні лічильники для рідин в'язкістю до $3 \cdot 10^{-4}\ \text{м}^2/\text{с}$ ($300\ \text{сст}$).

Одним з приладів камерного типу є лічильники рідини з овальними шестернями (рис. 60). Вони призначені для вимірювання кількості рідин, що мають в'язкість $(55 \cdot 10^{-6}) \dots (3 \cdot 10^{-4}) \text{ м}^2/\text{с}$ (0,55...300 сст), температуру $-40 \dots +120 \text{ }^\circ\text{C}$ і тиск до 6,4 МПа в трубах діаметром до 100 мм. Такі лічильники мають основну погрішність 0,5 %.

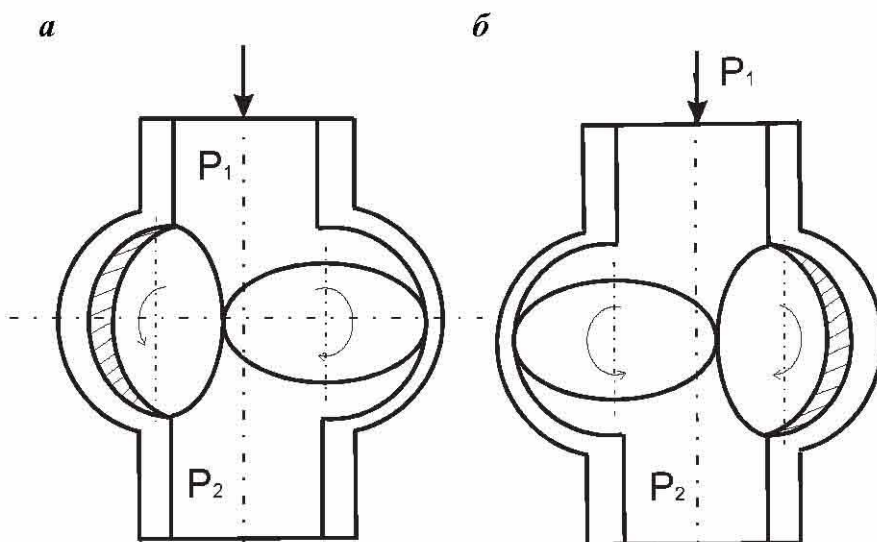


Рис. 60. Камерні лічильники

В положенні шестерень (рис. 60, *а*) під дією різниці тиску $(P_1 - P_2)$ виникає обертаючий момент, що повертає ліву шестерню проти годинникової стрілки. Права шестерня буде веденою тут і за рахунок зубчатого зчеплення почне повертатися за годинниковою стрілкою. Через чверть оберту шестерні встановлюються в положення (рис. 60, *б*). При цьому обертаючий момент буде створюватися на правій шестерні, а ліва стає веденою.

За повний оборот вимірювальні камери (на малюнку заштриховані) двічі наповнюються і спорожняються, тобто за один оборот об'єм рідини, що пропускається, рівний чотирьом об'ємам однієї вимірювальної камери. На рахунковий механізм передається рух однієї з шестерень за допомогою магнітної муфти або тахометричного ДТП швидкості. Сильна зміна в'язкості рідини збільшує погрішність вимірювання лічильника.

7.5. Електромагнітні витратоміри

Принцип їх дії заснований на законі електромагнітної індукції, відповідно до якого в електропровідній рідині, що перетинає магнітне поле, індукується ЕРС, пропорційна швидкості руху рідини. Серійні електромагнітні витратоміри призначені для вимірювання витрати рідин з електропровідністю не менше 10^{-3} (відповідає електропровідності водопровідної води). Є спеціальні витратоміри, що дозволяють виміряти витрати рідин із електропровідністю до 10^{-5} см/м.

Корпус 1 перетворювача, виготовлений з немагнітного матеріалу і покритий зсередини електроізоляцією 2 (гумою, емаллю, фторопластом тощо), розташований між полюсами магніта (на рис. 61 – постійний магніт). Через стінку трубки ізолювано від неї по діаметру введені електроди 3, що знаходяться в електричному контакті з рідиною. Силкові лінії магнітного поля направлені перпендикулярно площині, що проходить через вісь трубки і лінію електродів.

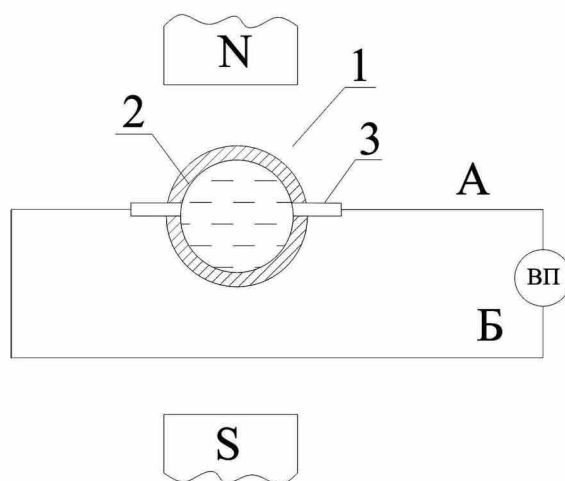


Рис. 61. Схема електромагнітного витратоміра

Відповідно до закону електромагнітної індукції при осесиметричному профілі швидкостей рідини між електродами буде наводитися ЕРС: $E = B D v$, де B – індукція магнітного поля; D – довжина рідинного провідника, що дорівнює діаметру трубки; v – середня швидкість рідини.

Ураховуючи, що $Q_o = \frac{v \pi D^2}{4}$, одержуємо $E = \frac{4 B Q_o}{\pi D}$.

Звідси витікає, що ЕРС прямо пропорційна вимірюваному об'єму витрат. Вимірювання ЕРС здійснюється вимірювальним приладом ВП, до якого пред'являються жорсткі вимоги за значенням його вхідного опору Z . Для забезпечення малого впливу внутрішнього опору перетворювача Z необхідне виконання співвідношення $Z/Z_{\pi} = 100 \dots 500$.

Вхідний опір зростає зі зменшенням електропровідності рідини, що викликає необхідність його збільшення, але цьому перешкоджає опір сполучних дротів місткості, включених паралельно Z . Тому необхідність виконання поставленої умови накладає обмеження на мінімальну електропровідність рідини, що вимірюється.

Застосування постійних магнітів у витратомірах дозволяє полегшити подолання перешкод від зовнішніх електромагнітних полів, збільшити швидкодію приладу.

Електромагнітні витратоміри з постійним магнітним полем не застосовуються для рідин з іонною провідністю. Вони широко застосовуються для вимірювання витрат розплавлених металів, в яких відсутнє явище поляризації. Типова область застосування таких витратомірів – ядерні енергетичні установки (ЯЕУ) з рідкометалевим теплоносієм. У цих установках, як правило, використовуються малогабаритні електромагнітні перетворювачі, які є по суті вимірниками локальної швидкості рідкого металу.

Для вимірювання витрати середовищ з іонною провідністю застосовують витратоміри зі змінним магнітним полем, створюваним електромагнітом (рис. 62). При синусоїдально магнітній індукції, що змінюється, і яка має амплітудне значення B_m і частоту f , ЕРС дорівнює

$$E = 4B_m Q_o \frac{\sin(2\pi f t)}{\pi D}.$$

При достатньо високій частоті f поляризація електродів практично відсутня, але використання змінного магнітного поля має свої недоліки. Найбільш серйозним з них є поява паразитивної трансформаторної ЕРС E_t . Ця ЕРС наводиться робочим магнітним полем $B = B_m \sin(2\pi f t)$ у контурі: дріт A –електрод–рідина–електрод–дріт B –вхід ПІ. Відповідно до закону електромагнітної індукції

$$E_t = -\frac{d\Phi}{dt} = -S \frac{dB}{dt} = -2\pi f S B_m \cos(2\pi f t),$$

де Φ – магнітний потік, який пронизує контур;

S – площа проекції контуру, пронизаного магнітним полем на площину, що проходить через вісь труби і лінію електродів.

Порівнянням E з E_T легко встановити, що вони зсунуті по фазі на 90° . Крім того, E_T від витрати не залежить й існує навіть при $Q_0 = 0$. Обидві ці особливості використовуються для зменшення впливу E_T на показання приладу. Значення E_T можна зменшити, розташовуючи дроти A і B в одній площині паралельно силовим лініям магнітного поля. Як правило для послаблення впливу E_T використовується подана нижче схема на рис. 62. Тут від одного з електродів відходять два дроти, симетрично охоплюючи трубопровід з обох боків і замикаючись на резистор R . ІП підключають до движка цього резистора і до другого електроду. За нульової витрати переміщенням движка необхідно добитися мінімального сигналу на вході вимірювального приладу.

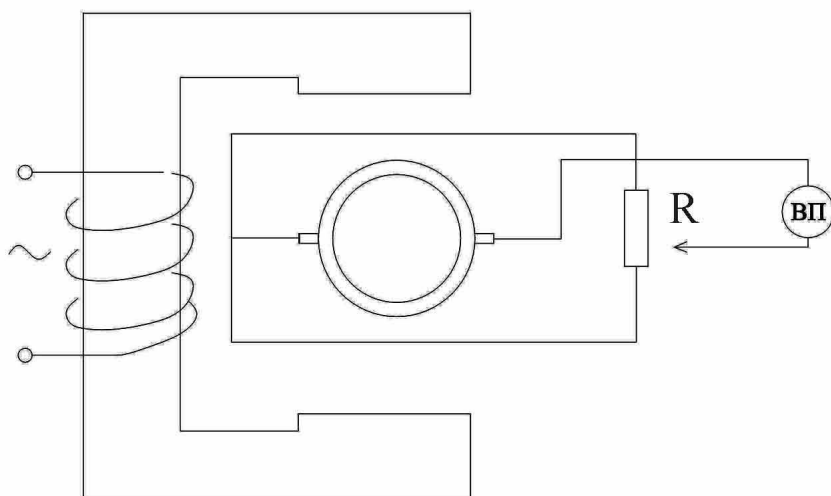


Рис. 62. Витратомір зі змінним магнітним полем

Обидва описані прийоми не усувають трансформаторні ЕРС повністю. В сучасних витратомірах для повного усунення її використовується зсув по фазі на 90° між E і E_T . У цьому випадку вимірювальна схема містить два канали, один з яких призначений для вимірювання корисного сигналу, другий – для компенсації. За допомогою фазочутливих детекторів по першому каналу пропускається лише корисний сигнал, який потім вимірюється показуючим або реєструючим приладом. По другому каналу проходить лише сигнал пропорційний E_T , який потім по ланцюгу негативного зворотного зв'язку поступає на вхід схеми і компенсує E_T .

Переваги електромагнітних витратомірів:

- можуть застосовуватися на трубопроводах практично будь-яких діаметрів без обмеження верхньої межі за витратою;
- показання їх не залежать від в'язкості і густини середовища.

Шкала приладу лінійна, діапазон вимірювання зазвичай дорівнює $(0,1...1,0)Q_{в.м.}$. Перетворювач витрати практично безінерційний, не має частин, що виступають всередину трубки і, таким чином, практично не створює втрати тиску. Вплив місцевих опорів значно менше, ніж у витратомірів із звужуючими пристроями, тому струм прямих ділянок до них менше за струм до перетворювача). У принципі можливо створення витратоміру з таким профілем магнітного поля, при якому необхідність у прямих ділянках до і після перетворювача відпадає взагалі. Електромагнітні витратоміри можуть бути використані у ряді випадків, коли застосування інших витратомірів утруднене або неможливе (при вимірюванні витрат агресивних, в'язких і абразивних рідин і пульп, а також вимірюванні витрат рідких металів).

Недоліки електромагнітних витратомірів:

- достатньо високі вимоги до мінімального значення електропровідності середовища, яке вимірюється, що звужує круг користування таких витратомірів;
- складність вимірювальної схеми, схильність її до впливу з боку багатьох перешкод, що утруднює виготовлення витратомірів класу більше 1 і ускладнює експлуатацію.

Промисловістю випускається декілька типів індукційних витратомірів класів 1 і 1,5. Найбільш точними є витратоміри типу ІР-51 класу 1, що мають діаметри умовного проходу 10...300 мм і верхні межі вимірювання 0,32... 2500 м³/год.

7.6. Ультразвукові витратоміри

Ультразвуковий метод вимірювання витрат заснований на залежності швидкості ультразвуку щодо трубки від швидкості потоку. Основні труднощі використання ультразвукового методу пов'язані

з тим, що швидкість звуку в середовищі залежить від його фізико-хімічних властивостей, температури, тиску.

Вона значно збільшує швидкість середовища так, що дійсна швидкість ультразвуку в середовищі, що рухається, мало відрізняється від швидкості в середовищі нерухомому.

Ці обставини обумовлюють необхідність застосування спеціальних методів компенсації погрішностей, що сильно ускладнює вимірювальні схеми.

Ультразвукові витратоміри застосовують головним чином для вимірювання витрати рідини через малу інтенсивність ультразвукової хвилі і великого коефіцієнта поглинання ультразвуку в газах. Основними елементами перетворювачів ультразвукових витратомірів є випромінювачі і приймачі ультразвукових коливань. Ультразвукові коливання, що потрапляють на приймач, викликають його механічну деформацію у вигляді періодичних стискань і розтягувань, які перетворюються у змінну електричну напругу. Ультразвукові витратоміри можна підрозділити на дві групи.

До першої групи відносяться витратоміри з випромінюванням перпендикулярним потоку (рис. 63). П'єзоелемент 1, збуджуваний генератором 2, створює ультразвукові коливання, направлені перпендикулярно осі трубки. У міру зростання середньої швидкості потоку $v_{\text{сер}}$ ультразвуковий промінь все більше відхиляється у напрямку швидкості v :

$$\theta = \arcsin\left(\frac{v_{\text{сер}}}{C}\right) \approx \frac{v_{\text{сер}}}{C},$$

де C – швидкість ультразвуку в нерухомому середовищі.

Лінійне відхилення променя у приймальних п'єзоелементах 3 і 4 $\delta = D \tan \theta \approx D \frac{v_{\text{сер}}}{C}$. Із збільшенням $v_{\text{сер}}$ кількість енергії, що поступає на 3, зменшується, а та, що поступає на 4, збільшується і таким чином

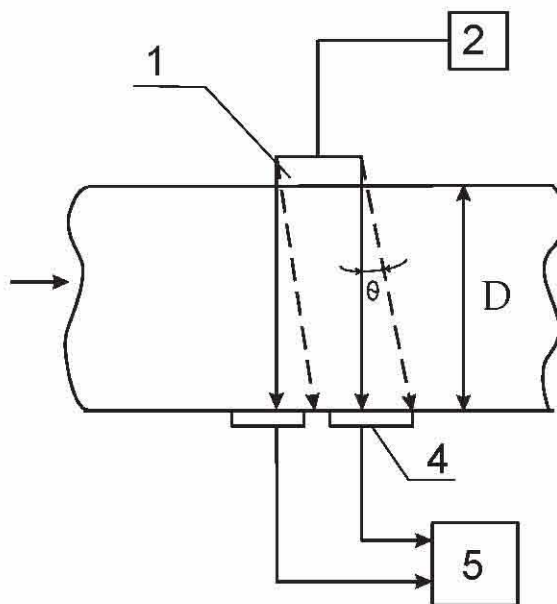


Рис. 63. Витратомір з випромінюванням перпендикулярним потоку

різницею сигнал, що поступає на вхід підсилювача 5 збільшується. Витратоміри з такою схемою прості за будовою, але наділені обмеженою точністю через мале відхилення променя.

Тому найбільше розповсюдження отримали витратоміри другої групи, засновані на вимірюванні швидкості проходження ультразвукових імпульсів між випромінювачем і приймачем у напрямі потоку контрольованого середовища, і проти нього (витратоміри з випромінюванням по потоку). При цьому звичайно вектори $\vec{v}_{\text{сер}}$ та \vec{C} направлені під кутом один до одного, причому, чим менше α , тим чутливіший витратомір.

Витратоміри можуть випускатися в одноканальній (рис. 64, а, б) або двоканальній (рис. 64, в, г) схемі. В одноканальній схемі кожний п'єзоелемент працює поперемінно в режимі випромінювача і в режимі приймача, що забезпечується системою перемикачів. У двоканальній схемі кожний п'єзоелемент працює тільки в одному певному режимі. Очевидно, що двоканальні схеми простіше одноканальних (немає складних схем перемикавання), але точність їх менша унаслідок можливої акустичної асиметрії обох каналів.

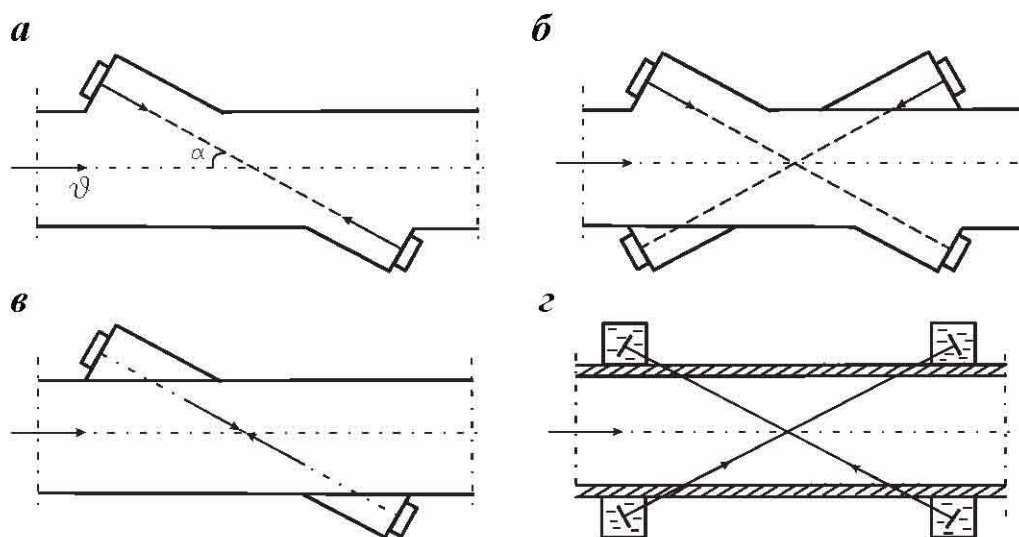


Рис. 64. Схеми витратомірів

Для чистих середовищ п'єзоелементи можуть встановлюватися у спеціальних кишнях (рис. 64, а, б). Для забруднених середовищ застосування кишень небажано. В цьому випадку або кишні заповнюються твердим матеріалом – звукодротом (рис. 64, в), або застосовуються випромінювачі і приймачі, які не потребують порушення

цілісності труби (рис. 64, з). У двох останніх схемах ультразвуковий промінь заломлюється на межах середовищ, що у ряді схем використовується для компенсації впливу змін температури середовища на показання.

Принцип дії витратомірів з випромінюванням за потоком полягає у використанні різниці часу проходження ультразвукових імпульсів за потоком і проти нього.

Дійсно, якщо позначити відстань між випромінювачем і приймачем L і кут між векторами швидкостей потоку $\vec{v}_{\text{сеп}}$ і ультразвуку \vec{C} через α , то час розподілу імпульсу за потоком та проти потоку буде складати відповідно:

$$\tau_1 = \frac{L}{C + v_L \cos \alpha} \approx \frac{L}{C} \left(1 - \frac{v_L}{C} \cos \alpha \right);$$

$$\tau_2 = \frac{L}{C - v_L \cos \alpha} \approx \frac{L}{C} \left(1 + \frac{v_L}{C} \cos \alpha \right) \rightarrow \Delta\tau = \tau_2 - \tau_1 = 2L \frac{\cos \alpha}{C^2} v_L,$$

де v_L – швидкість середовища, усереднена за довжиною шляху променя від випромінювача до приймача.

Таким чином, показання ультразвукових витратомірів залежать від швидкості потоку, усередненій за ходом променя, а не за діаметром трубки, що є характерною особливістю витратомірів з випромінюванням за потоком.

У загальному випадку $v_L = k v_{\text{сеп}}$. При сталому турбулентному русі та осесиметричному потоці k залежить від числа Re , оскільки із зміною Re змінюється характер розподілу швидкостей. Це є причиною принципової нелінійності статичних характеристик ультразвукових витратомірів при їх індивідуальному градуванні.

За методом визначення $\Delta\tau$ ультразвукові витратоміри підрозділяють на час-імпульсні, частотні та фазові.

У час-імпульсних витратомірах періодично проводиться вимірювання різниці $\Delta\tau$ часу проходження дуже коротких імпульсів тривалістю 0,1–0,2 мкс, за якими потім визначається об'ємна витрата Q_o . Змінне $\Delta\tau$ дуже мале (10^{-6} – 10^{-7}) навіть при максимальній витраті, причому виміряти його необхідно з погрішністю 10^{-8} – 10^{-9} с. Це викликає необхідність застосування складних електронних схем. Крім

того, показання таких витратомірів залежать від зміни C . Ці обставини пояснюють нечасте застосування таких витратомірів у порівнянні з іншими типами.

У частотних витратомірах кожний подальший імпульс посиляється випромінювачем тільки після досягнення попереднім імпульсом приймального п'єзоелементу. Очевидно, що якщо час між імпульсами рівний τ , то частота їх проходження $f = 1/\tau$. Різниця частот проходження імпульсів за потоком і проти нього визначається диференціальною схемою і пов'язана зі швидкістю і об'ємною витратою. Показання частотних витратомірів не залежать від швидкості ультразвуку в нерухомому середовищі, а отже, і від фізико-хімічних властивостей середовища. Це є важливою їх перевагою.

У фазових витратомірах вимірюється різниця фаз $\Delta\phi$ ультразвукових коливань частотою f , розповсюджується за потоком і проти нього. Їх недолік – залежність показань від зміни швидкості C .

Переваги ультразвукових витратомірів (перспективні для багатьох галузей промисловості):

- можливість використовувати на трубопроводах різних діаметрів (від 10 мм і більше);
- можливі безконтактні вимірювання витрат будь-яких середовищ, у тому числі і неелектропровідних.

Недоліки ультразвукових витратомірів:

- залежність показань від профілю швидкостей, які змінюються зі зміною витрати. Погрішність збільшується при спотвореному профілі швидкостей, наприклад, через наявність поблизу перетворювача місцевих опорів. Звідси – необхідність прямих ділянок труби до і після витратомірів;
- вплив на показання приладу зміни фізико-хімічних властивостей контролюваного середовища і її температури, що у свою чергу діє на швидкість ультразвуку.

7.7. Тепломіри

Вимірювання витрати і кількості теплоти грає важливу роль при автоматизації систем теплопостачання. Прилад, що вимірює кількість теплоти, перенесеної теплоносієм в єдиному часі, називається

тепломіром. Прилад, що вимірює кількість теплоти, перенесеної теплоносієм за деякий проміжок часу, називається *теплолічильником*.

У теплоенергетиці може вимірюватися або витрата теплоти з потоком теплоносія (теплова потужність потоку), або кількість теплоти, різними установками, що виробляється або споживається. У першому випадку витрата q визначається через масову витрату Q_m і ентальпію потоку i відповідно до відомого виразу $q = Q_m i$. Тепломіри, які реалізуються у відповідності до цього виразу, називаються *тепломірами потоку*.

У другому випадку витрата теплоти може бути визначена як різниця теплових потужностей на вході і виході установки $q = (Q_m i)_{\text{вх}} - (Q_m i)_{\text{вих}}$ – це *різницеві тепломіри*. За рівності $Q_{m_{\text{вх}}} = Q_{m_{\text{вих}}}$ останній вираз спрощується: $q = Q_m (i_{\text{вх}} - i_{\text{вих}})$, де $i_{\text{вх}}$ та $i_{\text{вих}}$ – ентальпія на вході і виході теплообмінника.

Таким чином, для вимірювання витрати теплоти повинно проводитися безперервне вимірювання масової витрати і ентальпії. Визначення ентальпії пов'язане з труднощами.

Для пари може бути використаний вираз: $i = \frac{k_1 + k_2 t}{k_3 + k_4 P}$, де $k_1 \dots k_4$ – постійні коефіцієнти.

Для параметрів води в системах (P до 1 МПа та $t \leq 150$ °С) теплофікацій злиттям тиску можна нехтувати і отримати: $i = i_0 + k_5 \Delta t$, де i_0 – ентальпія при розрахунковій температурі; k_5 – коефіцієнт; Δt – відхилення температури від розрахункової.

Можна також використовувати у спрощеному вигляді першу формулу $i = k_6 + k_7 t$, де t – температура води.

Витратоміри, які застосовуються у промисловості, звичайно вимірюють об'ємну витрату (у принципі – це вимірники швидкості потоку, яка однозначно пов'язана з об'ємною витратою через площу перетину трубопроводу).

Перехід від об'ємної витрати Q_o до масової Q_m здійснюється через густину середовища $Q_m = Q_o \rho$.

Для пари може бути використаний вираз $\rho = \frac{k_1 + k_2 P}{k_3 + k_4 t}$, а для рідин

$$- \rho = \frac{1}{k_5 + k_6 t}.$$

Для рідинного теплоносія, витрата якого вимірюється за перепадом тиску на звужуючому пристрої, $q = \alpha F_0 i \sqrt{2\rho P}$. Тут від t та P середовища залежать ρ та i (змінною площі прохідного отвору звужуючого пристрою F_0 нехтуємо).

Можна переписати цей вираз, апроксимувавши лінійною функцією сукупну залежність i та ρ від температури: $q = \alpha F_0 \sqrt{\Delta P} (k_1 + k_2 t)$.

Цей вираз реалізується в обчислювальних пристроях за сигналами термометра та дифманометра. Конкретна схема таких пристроїв залежить від виду вихідних сигналів дифманометра та термометра.

У тепломірах пари повинно бути враховано не лише зміну ρ та i від параметрів середовища, але і поправочного множника ε на розширення середовища. Тоді може бути використана узагальнена функція в наступному вигляді:

$$q = \alpha \xi_{\text{сер}} F_0 \sqrt{\Delta P} \frac{(k_3 + k_4 P)}{k_5 + k_6 t},$$

де $\xi_{\text{сер}}$ – поправочний множник, розрахований для номінальних параметрів. У схему таких тепломірів повинен вводитися сигнал від манометра.

За рівності прямого і зворотного потоків теплоносія може бути побудований різницевий тепломір. Прикладом є різницевий теплолічильник ТС-20, оснащений індукційним витратоміром, в якому реалізується $q = Q_0 \rho (i_{\text{пр}} - i_{\text{зв}})$.

Витрата води вимірюється електромагнітним витратоміром (рис. 65), що складається з перетворювача витрати 1 і електронного блоку 2, вихідний струм якого $I_{\text{вих}}$ пропорційний витраті: $I_{\text{вих}} = k Q_0$; $Q_0 = I_{\text{вих}} / k$.

Ентальпії $i_{\text{пр}}$, $i_{\text{зв}}$ та густини води ρ обчислюється за температурами прямої і зворотної води, яка вимірюється термометрами опору 3 і 4.

Для спрощення: $i_{\text{пр}} - i_{\text{зв}} = aR_{t_{\text{пр}}} - (R_{t_{\text{зв}}} + \epsilon)$; $\rho = \frac{c}{R_{t_{\text{зв}}} + d}$, де $a-d$ – постійні коефіцієнти; $R_{t_{\text{пр}}}$ та $R_{t_{\text{зв}}}$ – опори термометрів, що вимірюють температуру в прямому і зворотньому трубопроводах.

При цьому отримаємо: $q = \frac{1}{k} \left[aR_{t_{\text{пр}}} - (R_{t_{\text{зв}}} + \epsilon) \right] I_{\text{вих}} c \frac{1}{R_{t_{\text{пр}}}} + d$.

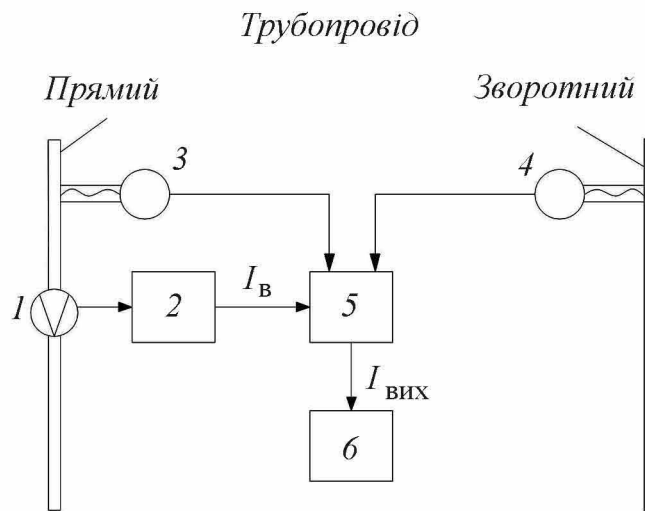


Рис. 65. Схема вимірювання витрати води за допомогою електромагнітного витратоміра

Пристрій 5 обчислює цю залежність за сигналами витратоміра води і термометрів опору, результат обчислення фіксується вимірювальним приладом 6.

Контрольні завдання і запитання

1. Що називають витратоміром?
2. Назвіть основні різновиди витратомірів.
3. Дайте характеристику дифманометрам-витратомірам.
4. Перерахуйте недоліки витратомірів зі звужуючими приладами.
5. Перерахуйте витратоміри постійного перепаду.
6. Назвіть основні типи тахометричних витратомірів.
7. Дайте характеристику електричним витратомірам.
8. Дайте характеристику ультразвуковим витратомірам.
9. Дайте характеристику тепломірам.

Вимірювання вологості

8.1. Загальні відомості

Вологість повітря і газів при технічних вимірюваннях може бути охарактеризована наступними параметрами:

- абсолютною вологістю – кількістю водяного пару, що міститься в одиниці об'єму газу, г/м^3 ;
- волого-утримуванням – масою водяного пару, віднесеною до маси сухого газу, г/кг ;
- температурою точки роси – температурою, при якій газ стає насиченим водяним паром, що міститься в ньому, $^{\circ}\text{C}$;
- відносною вологістю – відношенням абсолютної вологості до максимально можливої вологості цього газу за даної температури, %.

Вологість твердих і сипких тіл характеризується наступними параметрами:

- вологоутримуванням – відношенням маси води до маси абсолютно сухого тіла;
- вологістю – відношенням маси води до маси тіла.

Часто ці величини виражаються у відсотках.

Залежно від мети і задач конкретного технологічного процесу застосовують ті або інші параметри, що характеризують вологість. Наприклад, при вимірюванні малого вмісту води в чистих газах краще користуватися вологоутримуванням; при транспортуванні газів по трубопроводам необхідно знати температуру точки роси. При цьому в металургійному виробництві краще користуватися відносною вологістю.

Волого-утримування, температура точки роси і відносна вологість повітря і газів можуть бути визначені по *id*-, *sd*- чи *is*-діаграмах. *id*-діаграма побудована для вологого повітря при постійному тиску і для

невеликих концентрацій пари. В деяких різновидах *id*-діаграм нанесені лінії температур мокрого термометра.

У доповненні до *id*-діаграми була запропонована *sd*-діаграма для розрахунку процесів при змінному тиску. Для розрахунків у широкій області вологоутримувань, температур і тиску застосовується *is*-діаграма вологого повітря або *is*-діаграма парогазових сумішей.

При вимірюванні вологості матеріалів необхідно урахувати форми зв'язку вологи з матеріалом і гігрометричний взаємозв'язок матеріалу і оточуючого повітря. Вологоутримуючі матеріали можуть бути колоїдними, капілярно-пористими і колоїдними капілярно-пористими тілами. До колоїдних відносяться тіла типу желе, тісто, повидло і тому подібне; 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 розташування капілярів, а також від форм зв'язку води з матеріалом. При іонній і молекулярній формах зв'язку води з матеріалом (гідратна вода) її не можна видалити з матеріалу сушкою або вижимом. При формах зв'язку абсорбції, осмосу або фізико-механічної вологи може бути видалена з матеріалу в процесі сушки. Встановлення залежності фізичних властивостей матеріалу від змісту вологи пов'язане з певними труднощами. Тому і вимірювання вологості твердих і сипких матеріалів викликає труднощі і приводить до неоднозначності градуйованих характеристик.

8.2. Методи вимірювання вологості повітря і газів

Найбільшого розповсюдження в технологічних процесах отримали наступні методи:

- психрометричний;
- точки роси;
- гігрометричний.

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

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

Цей метод заснований також на залежності між парціальним тиском пару в парогазовій суміші і показаннями сухого й мокрого термометрів:

$$P_{\text{н.м}} - P = AB(t_{\text{с}} - t_{\text{м}}),$$

де $P_{\text{н.м}}$ – парціальний тиск насиченого пару при температурі суміші $t_{\text{м}}$;

P – парціальний тиск пару в парогазовій суміші;

A – психрометрична постійна;

B – барометричний тиск;

$t_{\text{с}}, t_{\text{м}}$ – температури сухого і мокрого термометрів відповідно.

Відносна вологість дорівнює

$$\varphi = \frac{P}{P_{\text{н.с}}} 100 = \frac{100}{P_{\text{н.с}}} [P_{\text{н.м}} - AB(t_{\text{с}} - t_{\text{м}})],$$

де $P_{\text{н.с}}$ – парціальний тиск насиченого пару за температури $t_{\text{с}}$.

У зв'язку з тим, що $P_{\text{н.м}}$ і $P_{\text{н.с}}$ однозначно визначаються за $t_{\text{м}}$ і $t_{\text{с}}$, якщо $A = \text{const}$, можна отримати залежність $\varphi = f(t_{\text{с}} - t_{\text{м}}, t_{\text{с}})$ (рис. 66).

За цією залежністю можна скласти психрометричні таблиці. Вони можуть бути різними для різних конструкцій мокрого термометра. Психрометрична постійна A визначається умовами тепловідводу від термометра через гніт у навколишнє середовище (розмірами і формою резервуару або гільзи термометра, теплопровідністю гільзи і тканини гніту, змоченістю тканини й тощо), тому практично для кожної нової конструкції A буде відрізнятися від інших. Для забезпечення постійності A для кожної конструкції забезпечують такий режим обдуву мокрого термометра (як правило $v \geq 3$ м/с), при якому

$A = \text{const}$. Остання залежність $\varphi = f(t_c - t_m, t_c)$ може бути апроксимована сімейством прямих $\varphi = \text{const}$ в координати t_c, t_m . Вважаючи, що прямі $\varphi = \text{const}$ перетинаються в одній точці з координатами t_a, t_e приймають $\varphi = f\left(\frac{t_m - t_a}{t_c - t_e}\right)$.

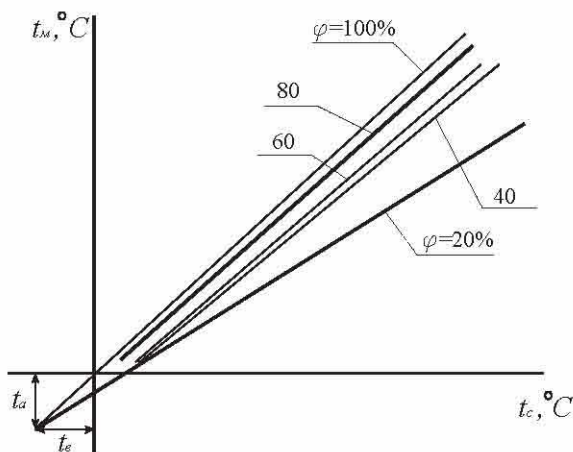


Рис. 66. Графіки залежності відносної вологості φ від температур мокрого та сухого термометрів (t_c, t_m)

На рис. 67 представлена принципова вимірювальна схема психрометра з термометрами опору. При відповідному підборі плечей мостів можна вважати, що $U_{ab} = k_1(t_m - t_a)$, $U_{cd} = k_2(t_c - t_b)$. У момент компенсації $U_{ae} = U_{ef} = mU_{cd}$, де m – відношення положення движка реохорда. Тоді $m = \frac{k_1(t_m - t_a)}{k_2(t_c - t_e)}$. Шкала психрометра градується у відсотках відносної вологості.

Можливі різні модифікації цієї схеми, але принцип дії її залишається, як правило, незмінним.

Переваги: достатньо висока точність і чутливість за температури вище 0°C .

Недоліки:

- зменшення чутливості і точності при низьких температурах;
- погрішність, пов'язана з непостійністю A .

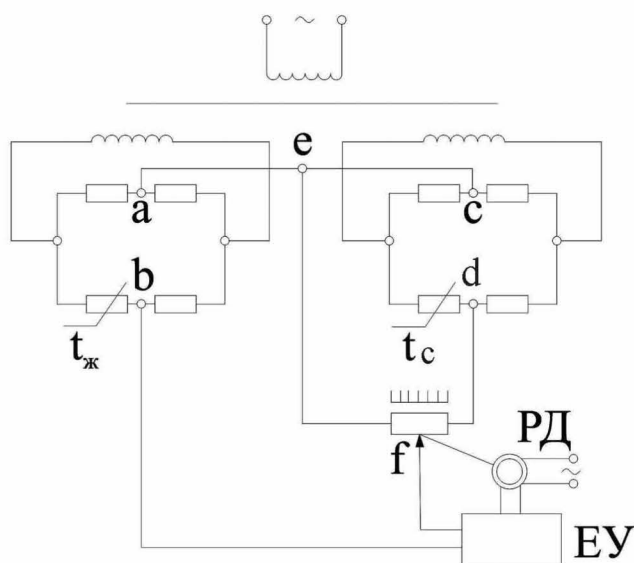


Рис. 67. Вимірювальна схема психрометра з термометрами опору

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

За температурою точки роси можна визначити абсолютну вологість або вологоутримування, а якщо додатково зміряти температуру газу, то можна визначити і відносну вологість. Цей метод є одним з найбільш точних і дозволяє проводити вимірювання вологості за будь-якого тиску газу як при позитивних, так і при негативних температурах.

Основним чутливим елементом вологомірів, заснованих на вимірюванні температури точки роси, є дзеркало, яке обдувається досліджуваним газом. Це дзеркало повинно охолоджуватися таким чином, щоб на ньому відбувалася конденсація вологи, що знаходиться в аналізованому газі. При цьому повинна фіксуватися температура, за якою починається випадання вологи (роси).

Для технологічних вимірювань розроблені автоматичні вологоміри точки роси (рис. 68). У камеру 1 через патрубок 2 поступає очищений від домішок і порошок досліджуваного газу постійного тиску, який потім видаляється по патрубку 3. Проходячи через камеру 1, газ обволікає дзеркало 4. На нього від лампи 5 через лінзу 6 направляють

промінь світла, яке, відбившись від дзеркала 4, потрапляє через лінзу 7 на фотоелемент 8.

Струм, що виникає у фотоелементі, через підсилювач 9 поступає на регулятор 10, який змінює живлення нагрівача 11. Дзеркало 4 охолоджується рідиною, що проникає через патрубок 12 і йде через патрубок 13. Температура рідини може змінюватися нагрівачем 11. Температура дзеркала вимірюється термоелектричним термометром (ТЕТ), підключеним до вимірювального приладу 14. Якщо на дзеркалі немає вологи, то промінь світла від нього практично без втрат поступає на фотоелемент 8. У цьому випадку регулятор зменшує нагрів охолодженої рідини, температура якої знижується до тих пір, поки на дзеркалі не випаде роса. В цьому випадку на фотоелемент буде поступати ослаблений світловий потік (падаючи на дзеркало, покриті плівкою роси, світло буде розсіватися) і регулятор буде збільшувати нагрів охолодженої рідини. Таким чином, температура дзеркала буде підтримуватися до температури близької до точки роси. Чисельне значення цієї температури фіксується приладом 14.

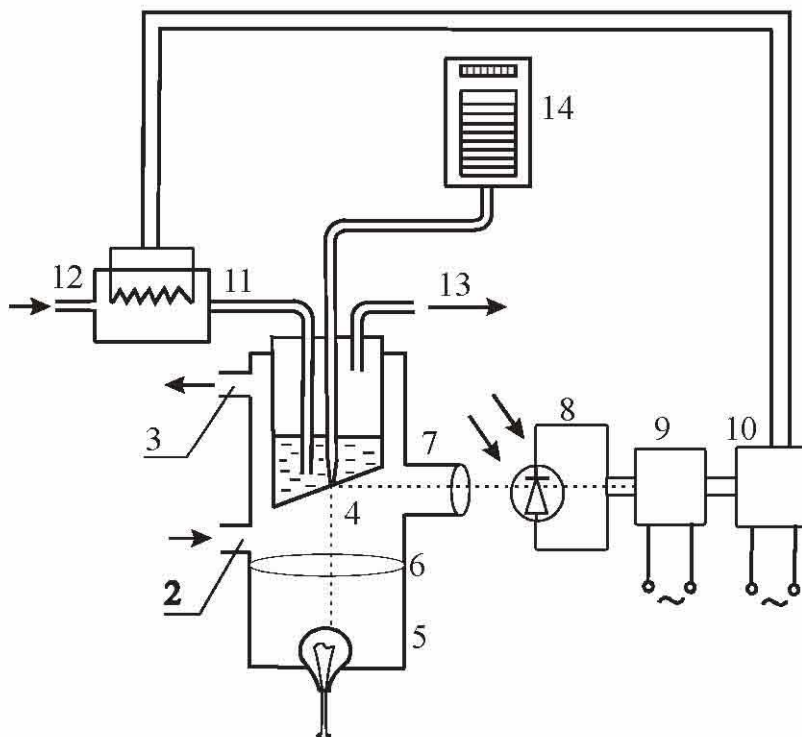


Рис. 68. Автоматичний вологомір точки роси

Окрім розглянутої, можливі варіанти схеми, де задіяні інші пристрої. Але принцип роботи вологоміра один: створюються умови для

випадання роси (початки конденсації) і визначається температура, за якої це відбувається. При практичній реалізації методу точки роси існують певні труднощі:

- фіксація самого моменту початку конденсації («випадання роси») залежить від методу фіксації (оптичний, кондуктометричний і тому подібне);

- 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;

- при вимірюванні вологості агресивних газів температура точки роси може істотно відрізнятися від розрахункової. Крім того, агресивні гази можуть викликати корозію поверхні, на якій відбувається конденсація.

Гігрометричний метод ґрунтується на залежності фізичних властивостей гігроскопічних матеріалів від вологості навколишнього середовища. До них відноситься один із перших гігrometerів, в якому використовують принцип подовження знежиреного людського волосся від вологості повітря. Електричні гігromетри використовують залежність опору або діелектричної проникності гігроскопічного матеріалу від вологості оточуючого повітря.

У гігromетричних вологомірах чутливий елемент повинен знаходитися в гігromетричній рівновазі з газом, що вимірюється. У практиці технологічних вимірювань отримали поширення наступні різновиди гігromетричних перетворювачів: електролітичні, електролітичні з підігрівом і сорбційні.

В електролітичних гігromетрах вимірювальний перетворювач містить вологочутливий елемент, що містить електроліт. Зміна вологості газу викликає зміну кількості води, що міститься у вологочутливому елементі, що призводить до зміни концентрації електроліту у вологочутливому елементі й відповідної зміни його опору або електропровідності. Як електроліт частіше всього застосовується LiCl (хлористий літій). Вимірювальні схеми електролітичних гігromетрів є різними варіантами мостових вимірювальних схем.

Недолік електролітичних гігromетрів – нестабільність градуированих характеристик – вплив температури і концентрації розчиненої речовини на їх показання.

Електролітичні перетворювачі з підігрівом за своїм пристроєм близькі до електролітичних перетворювачів. Проте принцип дії їх відрізняється від електролітичних. Зміна електропровідності перетворювача унаслідок зміни вологості газу викликає зміну температури перетворювача. Якщо вологість газу збільшується, то електропровідність перетворювача збільшується, що приводить до зростання струму, зростання температури перетворювача і випаровування води з перетворювача. Це у свою чергу призводить до зменшення електропровідності, струму і температури перетворювача. Таким чином автоматично підтримується режим, відповідний рівноважному стану між парціальним тиском парів води в аналізованому газі та парціальним тиском пару над насиченим розчином електроліту. Температура, відповідна цій рівновазі, вимірюється певним термометром. Електролітичні гігromетри з підігрівом відносно прості й надійні. Їх характеристики практично не залежать від запилення, забруднення або швидкості газу, що вимірюється, його тиску і напруги живлення.

У сорбційних гігromетрах використовуються зміни фізичних властивостей сорбційних матеріалів (кераміки, мікропористих матеріалів, окису алюмінію тощо) від вмісту в них води, який визначається вологовмістом газу. Як правило, зі зміною вологоутворювання змінюється або електроопір, або місткість, або тангенс діелектричних втрат, або будь-який інший параметр вимірювального перетворювача. Вимірювальна схема приладу визначається вихідним сигналом вимірювального перетворювача. Прилади цього типу відрізняються індивідуальними градуйованими характеристиками, тому широке їх застосування в промислових умовах утруднене.

8.3. Методи вимірювання вологості твердих і сипких тіл

Ці методи можна розділити на дві групи:

- прямі методи, що дозволяють визначити масу води або сухої речовини в пробі;
- непрямі методи визначення вологості за параметром, функціонально пов'язаним із вологістю.

Прямі методи відрізняються високою точністю вимірювання і великою тривалістю (10...15 год).

Непрямі методи характеризуються високою швидкістю і значно меншою точністю вимірювання.

У технічних вимірюваннях застосовують майже виключно непрямі методи. З них найбільше розповсюдження отримали електричні методи вимірювання вологості (кондуктометричний, ємнісний і деякі інші). Як вже наголошувалося, більшість промислових матеріалів є капілярно-пористими тілами. В сухому вигляді ці матеріали є діелектриками з питомим опором 10^8 Ом·м та понад. При зволоженні капілярно-пористі тіла можуть стати провідниками з питомим опором 10^4 Ом·м.

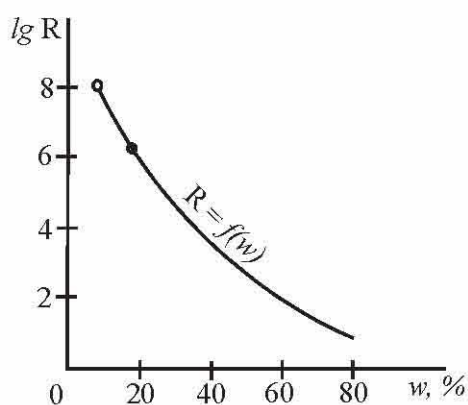


Рис. 69. Графік залежності електричного опору від вологості для капілярно-пористих тіл

Залежність електроопору від вологості для капілярно-пористих тіл (рис. 69) має вигляд:

$$R = c/w^n,$$

де c — постійна;

w — вологість;

n — показник ступеня.

Величини c і n визначаються для кожного матеріалу експериментально. Статична залежність опору від вологості матеріалу забезпечує високу чутливість кондуктометричного методу. Проте його застосування обмежено

великою кількістю впливаючих величин (температура, структура матеріалу, густина насипання, хімічний склад, наявність електролітів), які практично дозволяють використовувати цей метод лише в лабораторних умовах.

Метод ємності базується на тому, що зміна вологості капілярно-пористих тіл приводить до істотної зміни їх діелектричної проникності. У сухих тіл діелектрична проникність $\xi = 1...6$, а у води $\xi = 81$.

Зміну ξ унаслідок зміни вологості матеріалу визначають, як правило, за зміною ємності конденсатора, між обкладаннями якого вміщується аналізований матеріал. Перетворювач вологоміра ємності випускають у вигляді двох плоских пластин або двох концентричних

циліндрів, простір між якими заповнюється досліджуваним матеріалом шляхом засипки при падінні матеріалу з певної висоти. В цьому випадку забезпечується хороша відтворюваність результатів вимірювання. Ємність конденсатора певних геометричних розмірів може бути виражена наступним чином: $C = k\xi$, де k – постійна, визначається геометричними розмірами і формою конденсатора; ξ – діелектрична проникність матеріалу, яка визначається його вологістю.

Включення перетворювача ємності у високочастотний коливальний контур дозволяє використовувати резонансні схеми лампових або напівпровідникових приладів для вимірювання ємності перетворювача, а за ним – вологості матеріалу. Перетворювачі ємності малочутливі до складу матеріалу, його структури і контактного опору між електродами і матеріалом. Оскільки для більшості матеріалів ξ залежить від температури, в промислових приладах передбачається автоматичне введення поправки на зміну температури. Погрішність вологомірів ємності може складати 0,2...0,5 %. Проте методика відбору проби (заповнення матеріалом простору між обкладками конденсатора) може впливати на результати вимірювання. Наприклад, навіть вимірювання розмірів частинок (шматочків) аналізованого матеріалу істотно впливає на показання вологоміра.

У зв'язку з цим застосування вологомірів твердих і сипких тіл у технічних вимірюваннях обмежено.

Контрольні завдання і запитання

1. Чим характеризується вологість повітря?
2. Чим характеризується вологість твердих та сипучих матеріалів?
3. Назвіть основні методи виміру вологості повітря та газів.
4. Дайте характеристику психометричного методу.
5. Дайте характеристику методу точки роси.
6. Дайте характеристику електrolітичним гігрометрам.
7. Назвіть основні методи виміру вологості твердих та сипучих матеріалів.
8. Що розуміють під непрямим виміром вологості?
9. Назвіть основні електричні методи.

Аналіз складу рідин

Ведення технологічних процесів у хімічній, газовій і нафтохімічній промисловостях, енергетиці у багатьох випадках ґрунтується на результатах аналізу складу рідин. Одним із важливих моментів роботи з охорони навколишнього середовища є контроль за станом природних і штучних водоймищ та аналіз скидних вод промислових підприємств і населених пунктів, який здійснюється також із використанням аналізаторів складу рідин.

Найбільш поширені методи аналізу рідин, вживаних у промислових аналізаторах представлені у табл. 6, але не вказані такі методи як: хроматографічний, титриметричний, мас-спектрометричний. Найбільшою роздільною здатністю володіють полум'яно-іонізаційний, колориметричний, вольтамперметричний і кулонометричний, які застосовують для вимірювання мікроконцентрацій розчинених речовин.

Таблиця 6

Найбільш поширені методи аналізу рідин, які застосовують у промислових аналізаторах

Метод	Величина, що вимірюється
Кондуктометричний	Загальна електропровідність, концентрація дисоціюючої речовини в розчині, кондуктометричне титрування
Потенціометричний	Концентрація іонів (іонометрія), окислювально-відновний потенціал (редоксиметрія), потенціометричне титрування
Вольтамперметричний	Концентрація певної речовини в розплаві або розчині
Кулонометричний	Те ж саме

Метод	Величина, що вимірюється
Оптичний	Вимірювання концентрації іонів і речовини в розплаві або розчині
Вогнефотометричний	Вимірювання концентрації зважених частинок у суспензіях і емульсіях
Турбідиметричний	Те ж саме
Нефелометричний	– // –
Термокондуктометричний	Вимірювання концентрації розчинених газів

Прилади для аналізу рідин – це установки, що містять, крім первинних і вимірювальних перетворювачів, допоміжні пристрої для підготовки проби та її транспортування.

9.1. Кондуктометричний метод аналізу розчинів

Водні розчини електролітів є провідниками другого роду, перенесення струму в яких здійснюється рухом іонів. Останні утворюються при дисоціації речовин, що знаходяться в розчині. Електропровідність характеризує сумарну концентрацію іонів, які знаходяться в розчині, у зв'язку з чим прилади для її вимірювання градууються в одиницях питомої електропровідності: См/см (Сіменс на сантиметр), мк См/см, в одиницях умовного солевмісту (мг/кг NaCl) або концентрації (% H₂SO₄).

Питома електропровідність розчину χ , См/см є величиною, зворотною питомому опору, яка пов'язана з еквівалентною концентрацією η (гекв/см³) залежністю

$$\chi = \delta \eta \lambda,$$

де δ – ступінь дисоціації молекул розчинної речовини;

λ – еквівалент електропровідності речовини при нескінченному розбавленні.

Ступінь дисоціації визначається числом молекул, які дисоціюють на іони. При одній і тій же концентрації молекули сильних електролітів дисоціюють менше, ніж слабких. До сильних відносяться: соляна, сірчана, азотна кислоти, більшість солей, лугу; до слабких електролітів – органічні кислоти. У міру зменшення концентрації ступінь дисоціації зростає, наближаючись до 1.

За повної дисоціації молекул еквівалентна електропровідність розчину визначається рухливістю аніонів λ_a та катіонів λ_k , залежної від природи дисоційованої речовини і властивостей розчинника $\lambda = \lambda_a + \lambda_k$.

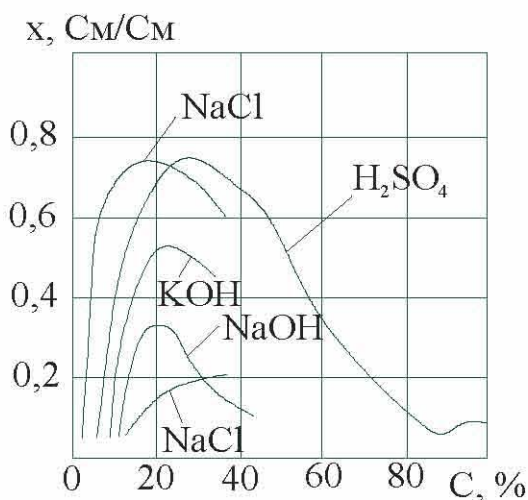


Рис. 70. Графіки залежності питомої електропровідності від концентрації

Оскільки у формулі χ величина δ міняється зі зміною концентрації, залежність питомої електропровідності від концентрації носить складний характер.

Як видно з графіків (рис. 70), близьке до лінійного зростання електропровідності із зростанням концентрації C спостерігається при 5...10 %. Зростання C менше 15...30 % супроводиться зменшенням χ унаслідок зменшення ступеню дисоціації молекул. Ураховуючи неоднозначний характер залежності χ від C , необхідно на-

перед знати область роботи кондуктометра, виключаючи можливість вимірювань в області екстремума.

Рівняння Кольрауша встановлює зв'язок між χ та t : залежність $\chi = f(C)$ при $t = 18^\circ\text{C}$.

$$\chi_t = \chi_{25} \left[1 + \alpha(t - 25) + \beta(t - 25)^2 \right].$$

При зміні температури в межах $15...35^\circ\text{C}$ квадратичний член може бути опущений. В табл. 17.2 [3] наведені значення рухомості іонів за температури 25°C та температурний коефіцієнт α , який характеризує зростання рухливості іонів зі зростанням температури. Із таблиці витікає, що рухливість іонів водню і гідроксильної групи при

нескінченному розбавленні в 2...8 рази вище, ніж рухливість решти іонів. Цим пояснюється висока електропровідність кислот і лугів. Табличні дані показують, що зміна температури на 1° викликає зміну рухливості на 1,5...2,5 %. Це обумовлює необхідність стабілізації температури розчину і введення температурної компенсації;

$\chi = \sum_1^n \lambda_i n_i$ – сумарна електропровідність розчину з n складових.

До приладів, призначених для вимірювання електропровідності, відносяться кондуктометри, солеміри, концентратоміри.

Кондуктометри градуюються в одиницях електропровідності, солеміри – в одиницях умовного солевмісту, звичайно у відсотковому вмісті NaCl. Концентратоміри градуюються у відсотковому вмісті аналізованої речовини.

Теоретично чиста вода при $t = 25$ °C володіє електропровідністю приблизно 0,055 мк См/см. При вимірюванні малих концентрацій розчинених речовин електропровідність води створює фонову складову, що порушує пропорційну залежність між χ і C .

На теплових і атомних електростанціях конденсат перегрітих і насичених парів, живильна і хімічно знесолена вода, володіючи малим солевмістом, містять розчинені гази CO₂ та NH₃, які утворюють іони H⁺, NH₄⁺, OH⁻, HCO₃⁻, CO₃²⁻. В результаті електропровідність води, обумовлена концентрацією нелетких компонентів, складає відсотки загальної електропровідності.

Для зниження впливу на електропровідність розчинених газів використовуються передувімкнені Н-катіонові фільтри, проводиться дегазація проби і її концентрація шляхом упарювання.

При пропусканні маломінералізованих вод, що містять розчинений аміак і вуглекислий газ, через Н-катіоновий фільтр аміак затримується, а нелеткі домішки переходять у відповідні кислоти. При цьому електропровідність, обумовлена нелеткими домішками, за рахунок великої рухливості іонів водню збільшується у 3–4 рази, вплив розчинених газів зменшується, оскільки у наявних сильних кислот також зменшується дисоціація молекул H₂CO₃.

Для вимірювання концентрації розчинів за їх електропровідністю використовуються електродні та безелектродні методи (останні менш поширені і застосовуються в основному для вимірювання концентрацій кислот, лугів).

9.1.1. Електродні кондуктометри

Первинними перетворювачами електродних кондуктометрів є дві занурені в рідину пластини (електроди), опір розчину R_χ між якими пов'язаний з питомою електропровідністю наступною залежністю:

$$R_\chi = \frac{l}{\chi S} = \frac{k}{\chi},$$

де l, S – відстань між електродами та їх площа;

k – коефіцієнт, см^{-1} , який називають постійною величиною первинного перетворювача (датчика). Його величина визначається шляхом градування за зразковими розчинами з відомою електропровідністю.

Вимірювальні мости, що використовуються для вимірювання R_χ живляться змінним струмом. При використанні постійного струму відбувається поляризація електродів. Біля їх поверхні збираються іони протилежного знака і продукти електролізу (пухирці газів), викликаючи утворення внутрішнього проти-ЕРС і зростання опору розчину. Електродні ефекти за інших рівних умов залежать від матеріалу електродів і стану їх поверхні. Платинові електроди володіють мінімальним поляризаційним опором, і їх застосовують в лабораторних кондуктометрах при виконанні вимірювань підвищеної точності. Електроди промислових кондуктометрів виконуються з нержавіючої сталі.

Перетворювачі промислових кондуктометрів живляться змінним струмом частотою 50 Гц.

При живленні електродних перетворювачів змінним струмом між електродами, крім активного опору, виникає і ємність, залежна від діелектричної проникності розчину. Комплексний характер опору перетворювача повинен бути врахований при вимірюванні шляхом введення комплексного опору в одне з прилеглих до R_χ плечей моста, що використовується для вимірювання опору розчину.

Електродні перетворювачі для вимірювання електропровідності у промислових умовах розділяються на магістральні, занурювальні та проточні. Магістральні перетворювачі вводяться безпосередньо у трубопровід, по якому тече аналізований розчин. Занурювальні опускаються в резервуар з контрольованою рідиною. Через проточний

перетворювач протікає проба аналізованого розчину, що пройшла в більшості випадків попередню підготовку.

У середині перетворювача, як правило, знаходиться терморезистор, за допомогою якого здійснюється компенсація впливу температури.

На рис. 71 показана схема проточного перетворювача кондуктометра. Корпус 1 служить у якості одного електрода, другий – внутрішній складається із двох ізольованих між собою циліндрів 2 і 3 різних діаметрів і висоти. При підключенні електрода 2 $k = 10^{-2} \text{ см}^{-1}$, а електрода 3 $k = 10^{-1} \text{ см}^{-1}$. У середині електрода 3 знаходиться терморезистор 4.

Схема урівноваженого моста (рис. 72) відноситься до однієї з поширених схем включення первинних перетворювачів кондуктометрів. На схемі: R_1 , R_2 , R_3 – постійні резистори; R – реохорд; C – конденсатор (для компенсації складової опору місткості електродного перетворювача), який на схемі входить у плече; R_t – мідний дрітаний резистор; $R_{\text{ш}}$ – шунтуючий манганиновий резистор, який служить для узгодження температурних коефіцієнтів у ланцюзі, котрий включає в себе R_x , $R_{\text{ш}}$, R_t . Міст живиться напругою промислової частоти. Сигнал дисбалансу моста поступає на підсилювач У, вихідний сигнал якого приводить в рух вал реверсивного двигуна РД, сполученого з движком реохорда із показуючою стрілкою приладу. Оскільки опір розчину R_x має негативний температурний коефіцієнт, а мідний резистор R_t – позитивний, то включення $R_{\text{ш}}$ у протилежне або в одне із плечей моста з первинним перетворювачем дозволяє понизити вплив температури.

Для здійснення температурної компенсації можуть бути також використані напівпровідникові терморезистори і рідинні перетворювачі порівняння.

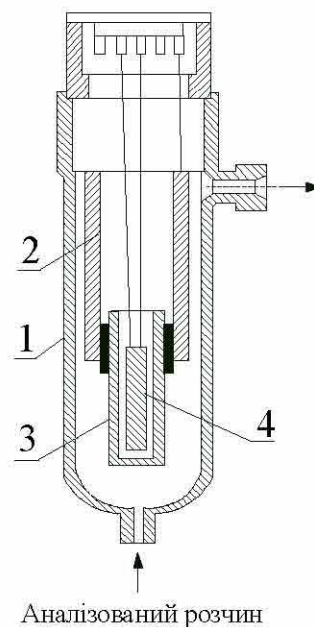


Рис. 71. Схема проточного перетворювача кондуктометра

Кондуктометрами серії КК можна виміряти електропровідність від 10^{-6} до 1 См/см при $t_{\text{роб}} = 25 \pm 15$ °С і граничною основною погрішністю $\pm 2,5$ %.

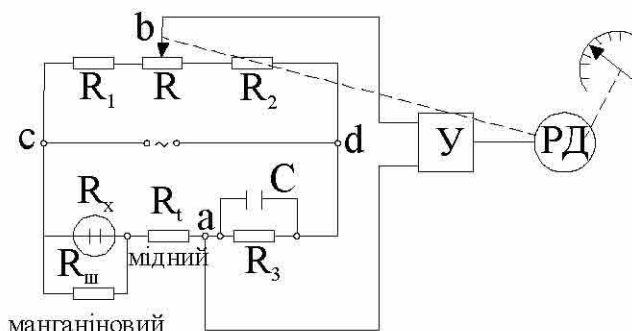


Рис. 72. Схема урівноваженого моста

Існуючий недолік електродних кондуктометрів – це поляризація і забруднення електродів продуктами реакцій електрохімії, що протікають на поверхні, а також речовинами, що знаходяться в розчинах. Звідси – необхідність періодичного механічного або хімічного очищення і відмивання.

9.1.2. Безелектродні кондуктометри

Безелектродні перетворювачі містять первинні перетворювачі, що не мають безпосереднього контакту з середовищем, що вимірюється, і вільні у зв'язку з цим від таких недоліків, як поляризація електродів і їх забруднення. Розрізняють високочастотні і низькочастотні безелектродні кондуктометри. Високочастотні безелектродні кондуктометри працюють на частотах більше 1,0 кГц і залежно від виду реактивного опору, що вимірюється, розділяються на ємнісні та індуктивні (рис. 73).

Градуйовані характеристики обох перетворювачів визначаються експериментально для конкретного перетворювача і розчину (оскільки між концентрацією розчину і вихідними величинами C_x та L_x існує складна залежність).

У якості вимірювальних перетворювачів високочастотних кондуктометрів використовуються мостові і резонансні схеми, які живляться

від генераторів високої частоти. В цих схемах вимірюється частота власних коливань резонансного контуру залежна від індуктивного або місткості опору первинного перетворювача.

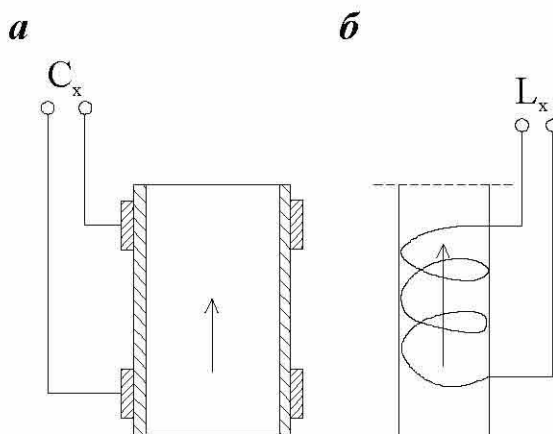


Рис. 73. Безелектродні кондуктометри:

a – місткісний; *б* – індуктивний

У низькочастотних безелектродних кондуктометрах досліджуванний розчин протікає по трубці, створюючи замкнутий виток. Останній подібний провіднику, в якому від первинної обмотки трансформатора наводиться ЕРС, а струм, який протікає, залежить від електропровідності розчину. Низькочастотні кондуктометри використовуються для вимірювання значних електропровідностей розчинів.

У кондуктометрах серії КК вимірювання електропровідності від 10^{-2} до 1 См/см здійснюється безелектродними кондуктометрами КК-8, КК-9, включаючи первинні перетворювачі занурювального і проточного типу.

9.2. Потенціометричний метод аналізу

Потенціометричний метод вимірювання базується на законі Нернста, який був відкритий для металевих електродів, а пізніше поширений на електроди інших речовин. Сутність досліджуваного явища полягає в тому, що при зануренні металевого електрода в розчин на його поверхні виникає потенціал, залежний від активної концентрації

іонів цього металу в розчині. Виникнення потенціалу обумовлено переходом іонів металу в розчин. У стані рівноваги поверхневий потенціал забезпечує вирівнювання швидкостей анодного і катодного процесів, пов'язаних з переходом іонів металу в розчин і з розчину в електрод. Вимірювання поверхневого потенціалу електрода дозволяє судити про концентрацію відповідних іонів у розчині.

Рівняння Нернста має вигляд:

$$E = E_0 + RT \frac{\ln a}{nF},$$

де E – рівноважний потенціал на поверхні електрода;

E_0 – нормальний потенціал;

a – активна концентрація відповідних іонів у розчині;

n – заряд іонів;

F – число Фарадея.

Для вимірювання E необхідно замкнути електричний ланцюг, вводячи в розчин другий електрод, який називається допоміжним або електродом порівняння. Потенціал цього електрода у процесі вимірювання повинен залишатися постійним. Значення рівноважних потенціалів визначається по відношенню до допоміжного платинового водневого електрода, прийнятого в якості нормального. Цей електрод є платиновою пластинкою, яка занурена в розчин з активною концентрацією іонів водню, що дорівнює одиниці, за тиску водневого газу 0,1 МПа та температури 298 К. Рівноважні потенціали електродів E_0 визначаються при їх зануренні у відповідні одонормальні розчини по відношенню до нормального водневого електрода. Вони є вимірними за так званою водневою шкалою і вважаються нормальними.

На сьогодні область застосування методів вимірювання потенціометрів розширюється завдяки створенню іоноселективних електродів, що володіють специфічними функціями по відношенню до таких катіонів і аніонів, як: Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Pb^{2+} , Cl^- , Br^- , I^- та ін. Цей метод використовується також для вимірювання окислювально-відновного потенціалу, що характеризує відношення активностей окисленої і відновленої форм іонів у розчині. Прилади, призначені для вимірювання окислювально-відновного потенціалу, називаються редоксметричними аналізаторами.

Активна концентрація іонів у розчинах зазвичай виражається в одиницях десяткового логарифма. Так,

$$\text{pH} = -\lg a_{\text{H}^+}, \quad \text{pNa} = -\lg a_{\text{Na}^+} \lg a,$$

де a – активна концентрація відповідних іонів у розчині. У зв'язку з цим вимірювальні прилади отримали відповідно назву рН- та рNa-метрів і т. д. Найбільш широко прилади потенціометрів застосовуються для вимірювання активної концентрації іонів водню. Їх використання здійснюється за двома напрямками, пов'язаними з вимірюванням лужних або кислотних функцій розчину і визначення моменту нейтралізації розчинів при їх титруванні.

Чиста вода – нейтральна речовина, слабо дисоціююча з утворенням іонів H^+ та OH^- . За температури 22 °С константа дисоціації води $K_{\text{H}_2\text{O}} = a_{\text{H}^+} a_{\text{OH}^-} = 10^{-14}$, звідси $a_{\text{H}^+} = a_{\text{OH}^-} = 10^{-7}$, $\text{pH} = 7$.

При розчиненні у воді кислот зростає a_{H^+} , а рН зменшується. При розчиненні лугу a_{H^+} зменшується, а рН зростає. Таким чином, відхилення числа рН у водних розчинах від 7 в той або інший бік характеризує міру їх кислотних або лужних властивостей. При зростанні температури чистої води до 100 °С вона набуває кислих властивостей, при цьому число рН зменшується до 6,12. При $t = 0$ °С вода має лужні властивості й $\text{pH} = 7,97$. Для водних розчинів $\text{pH} = 0 \dots 14$; для такого розчинника як аміак досягає $\text{pH} = 0 \dots 32,7$; для мурашиної кислоти $\text{pH} = 0 \dots 6,13$.

9.2.1. Робочі й допоміжні електроди потенціометричних аналізаторів

Для отримання поверхневого стрибка потенціалу, залежного від активної концентрації відповідних іонів у розчині, можуть використовуватися електроди трьох типів: електроди першого типу – або метали, або метали зі сорбуючим на поверхні газом (наприклад, водневий електрод); електроди другого типу – системи, що включають металевий контактний електрод, його погано розчинну сіль і розчин, що містить аніони цієї солі. Активна концентрація останніх визначає величину електродного потенціалу; електроди третього типу – це електроди спеціального призначення, що мають складнішу будову (наприклад, електроди з рідинними мембранами).

Слід зазначити, що електроди з чистих металів у розчинах швидко покриваються шаром окисної плівки й інших хімічних з'єднань, що приводить до зміни характеристик електрода і втрати специфічних функцій.

Як зразок електрода для вимірювання числа рН розчинів використовуються водневі електроди (рис. 74). Водневі електроди являють собою платинову пластинку, покриту шаром платинової черні, на поверхні якої добре сорбується водень. Платинова пластинка занурюється в розчин, через який пропускається водень під тиском. Для вимірювання числа рН у лабораторних і промислових умовах використовуються скляні робочі електроди (рис. 75), які прості за будовою, володіють високими метрологічними характеристиками і широким діапазоном аналізованих середовищ.

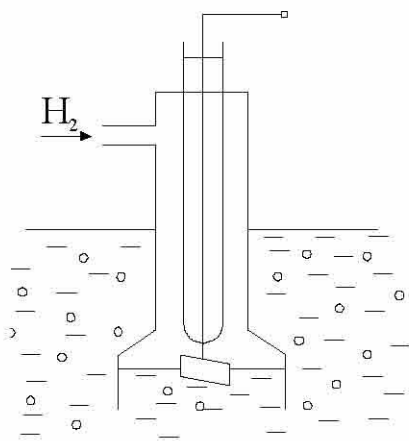


Рис. 74. Схема
водневого електрода

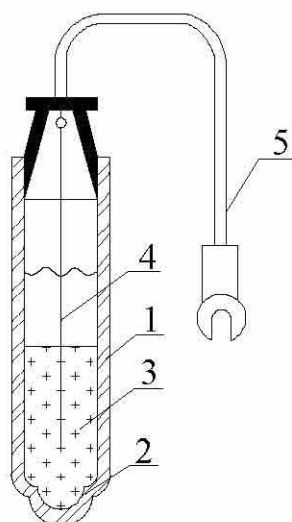


Рис. 75. Схема
робочого скляного електрода:
1 – товстостінна скляна трубка, що калібрується;
2 – чуттєва мембрана із Li скла;
3 – розчин кислоти постійної концентрації;
4 – контактний електрод; 5 – вивідний дріт

До числа найбільш поширених рН-метрів відносять рН-201 і рН-261. Їх вимірювальні перетворювачі мають вихідні сигнали за постійної напруги 0...50 мВ та струмовий 0...5 мА. Це забезпечує можливість їх роботи в комплексі з автоматичними потенціометрами, пристроями регулювання і контролю, що використовують уніфікова-

ний струмовий сигнал. Прилад рН-201 має п'ять діапазонів вимірювання числа рН; гранична допустима погрішність ± 1 % діапазону вимірювання.

Для вимірювання окислювально-відновного потенціалу еН розчину застосовують інертні металеві електроди, на поверхні яких не протікають електродні реакції, а здійснюється лише контакт із розчином. У вітчизняних еН-метрах в якості робочого електрода використовується тонкошаровий платиновий електрод, а в якості електрода порівняння – хлор срібний. Оскільки за однакових окислювально-відновних властивостей еН залежить від рН розчину, як правило, вимірювання першого показника ведеться паралельно з вимірюванням другого.

Лабораторні потенціометричні перетворювачі називаються *іономірами*, і є універсальними приладами. Вони забезпечуються комплектом іоноселективних електродів, що дозволяє проводити вимірювання концентрації вказаних іонів. До числа таких приладів відносяться іономіри – універсальний лабораторний В-741, лабораторні І-115, І-120 і переносний І-102.

9.3. Оптичний метод аналізу складу рідин

В оптичних аналізаторах рідин використовується зв'язок між параметрами оптичного випромінювання і складом аналізованої рідини.

Для аналізу складу рідин використовуються наступні різновиди оптичного методу: колориметричний, полум'яно-фотометричний, турбідиметричний і нефелометричний.

У *колориметричних* аналізаторах концентрація речовини, яка визначається, вимірюється за поглинанням випромінювання у видимій частині спектру аналізованим розчином. Оскільки для вимірювання випромінювання використовуються різні види фотоефекту, аналізатори називають фотоколориметричними.

У більшості випадків фотометрований забарвлений розчин одержують у результаті допоміжної хімічної реакції, яка забезпечує вибірково зміну забарвлення розчину і її інтенсивності залежно від концентрації визначуваного компонента. При цьому в розчині не повинно бути зважених частинок.

До числа фотоколориметричних приладів відносяться автоматичні кремнеміри, жорсткоміри, фосфатоміри, вимірники розчиненого у воді O_2 , Cl_2 (автоматичний кремнемір АВ-211, жорсткомір АВ-210).

Принцип дії *полум'яно-фотометричних* аналізованих рідин заснований на здатності збуджених атомів випромінювати в певній частині спектру. Оскільки спектр випромінювання залежить від будови атомів або молекул, то цей метод відрізняється специфічністю і високою чутливістю. Для збудження атомів у молекулі можуть використовуватися дуга, іскровий розряд, полум'я. В полум'яній фотометрії використовуються різні гази: ацетилен, пропан, бутан, водень. Як вимірювальні елементи використовуються фотопомножувачі. Цей метод володіє великою чутливістю по відношенню до атомів лужних металів, що перевищують чутливість інших хімічних методів.

Принцип дії *турбідиметричних* (turbid – англ. – каламутний) і *нефелометричних* приладів заснований на вимірюванні ослабленого або розсіяного випромінювання зваженими частинками, що знаходяться в рідині.

Турбідиметричні аналізатори використовуються для вимірювання каламутності питної і скидних вод, рівнів шламу у відстійниках і технологічних апаратах, концентрації частинок у суспензіях. При вимірюванні концентрації зважених частинок у технологічних апаратах і лініях світловий потік пропускається безпосередньо через шар досліджуваної рідини усередині технологічного устаткування. Приклад: СРШ – сигналізатор рівня шламу, що використовується при водочищенні в апаратах, так званих освітлювачах, у яких проводиться попереднє очищення води. У процесі очищення утворюється шлам, що виводиться з апарату. Фотоелектронний сигналізатор рівня містить джерело випромінювання і фоторезистор, що сприймає випромінювання. Оскільки при появі шламу у воді на шляху світлового потоку різко зменшується освітленість фоторезисторів, то виникає сигнал дисбалансу вимірювальної схеми, який подається на пристрій сигналізації або в ланцюг автоматичного продування апарату.

Турбідиметричні аналізатори каламутності води ТБ мають діапазон вимірювання 0,3...0,5 мг/л, погрішність вимірювання $\leq \pm 2\%$.

У нефелометричних аналізаторах інтенсивність потоку випромінювача, розсіяного частинками, що знаходяться в розчині, визначається рівнянням Фелєя. Нефелометри в основному використову-

ються для аналізу емульсій і, зокрема, для аналізу вмісту нафтопродуктів у скидних водах.

Із задачею вимірювання концентрації розчинених у воді газів зустрічаються як у промисловості (наприклад, при контролі теплоносія на теплових і атомних електростанціях), так і аналізуючи стан вод у водоймищах і відстійниках.

Для аналізу мікроконцентрацій розчиненого кисню використовуються вольтамперметричні, кондуктометричні та колориметричні методи. При концентраціях, які становлять мг/л, використовується термокондуктометричний метод.

У промислових киснемірах використовуються відкриті електродні системи або закриті полімерною мембраною. В першому випадку аналіз води передається фоновому електроліту за допомогою газопередаючої системи. У другому випадку досліджувана вода омиває захищену мембраною електродну систему. В якості фонового електроліту використовується лужний буферний розчин із $\text{pH} = 8 \dots 10$. У таких середовищах швидкість відновлення кисню O_2 на катоді на три порядки вище, ніж у кислотному електроліті. Приклад: автоматичний киснемір із газопередавальною системою типу ІКАР, АК-300.

Випускаються термокондуктометричні водоміри, які здійснюють контроль концентрації водню H_2 у конденсаті перегрітого пару. Це пов'язано з тим, що концентрація H_2 у свіжій парі на виході паронагрівачів казанів характеризує інтенсивність протікання процесу корозії поверхонь нагріву. Принцип дії водоміру заснований на відмінності теплопровідності H_2 від теплопровідності інших газів, зокрема O_2 . Цей принцип широко використовується в теплових газоаналізаторах для вимірювання концентрації H_2 , CO_2 , SO_2 в газових сумішах.

Аналізатори складу рідин більшою мірою, ніж інші первинні прилади, вимагають правильного вибору точок відбору проб, жорсткого дотримання умов транспортування і підготовки проби, кваліфікованого і своєчасного проведення технічного огляду, що передбачається документацією на аналізатори і допоміжні пристрої.

Контрольні завдання і запитання

1. Назвіть основні методи аналізу складу рідини.
2. Дайте характеристику кондуктометричному методу.
3. Дайте характеристику електродним кондуктометрам.
4. Дайте характеристику безелектродним кондуктометрам.
5. Дайте характеристику потенціометричному методу.
6. Дайте характеристику оптичному методу.

Аналіз складу газів

10.1. Загальні відомості

Засоби вимірювання, застосовувані в різних галузях промисловості, наукових дослідженнях для аналізу складу газів, називають *газоаналізаторами*. На основі безперервного автоматичного контролю складу газів здійснюється автоматизоване управління хіміко-технологічними процесами, пов'язаними з отриманням і використанням газів у металургії, коксохімічному виробництві, нафтопереробці, газовій промисловості. При спалюванні органічних палив на ТЕС автоматичні газоаналізатори використовуються для контролю за процесом горіння і визначення вимог надлишку повітря. Важливі також газоаналізатори, що вимірюють концентрацію H_2 в системі охолодження турбогенераторів, в газах здувок апаратів із радіоактивним теплоносієм на АЕС і т. д. Розширилося виробництво і використання газоаналізаторів для контролю вмісту шкідливих домішок в газових викидах промислових підприємств і електростанцій, в повітрі виробничих приміщень і атмосфері (екологія). Для контролю за якістю повітря населених пунктів здійснюються періодичні вимірювання концентрації таких основних забруднюючих речовин як сірчистий газ, CO , NO_2 (N_2O_4), пил.

Для вимірювання концентрації одного з компонентів газової суміші використовується та або інша фізико-хімічна властивість цього газу відмінна від властивостей решти газів. Чим різкіше ця відмінність і чим вона специфічніша, тим вища чутливість методу і простіше здійснюється підготовка проби газу. Різноманітність методів вимірювань, що використовуються в газоаналізованих методах, обумовлена обширністю аналізованих компонентів газових сумішей і широким діапазоном зміни їх концентрацій. Переважна більшість промислових автоматизованих газоаналізаторів призначена для

вимірювання концентрації одного компонента в суміші газів. У цьому випадку суміш газів розглядається як бінарна, в якій визначуваний компонент впливає на фізико-хімічну властивість суміші, що вимірюється, а решта компонентів, незалежно від їх складу, вважаються двокомпонентом суміші.

Існують газоаналізатори призначені для аналізу різних складових багатокомпонентних газових сумішей. У більшості випадків ці прилади використовуються в лабораторній практиці. Газоаналізатори градууються у відсотках за об'ємом г/м^3 , $\text{м}^2/\text{л}$.

Існуюча класифікація газоаналізаторів ґрунтується на фізико-хімічних властивостях, прийнятих за основу вимірювальної концентрації визначуваних компонентів суміші, і включає наступні основні групи приладів: механічні, теплові, магнітні, оптичні, хроматографічні, електричні та мас-спектрометричні.

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

Принцип дії об'ємних хімічних газоаналізаторів розглянута на прикладі ГХП-2 (рис. 76), призначеного для вимірювання двох компонентів газової суміші CO_2 та O_2 .

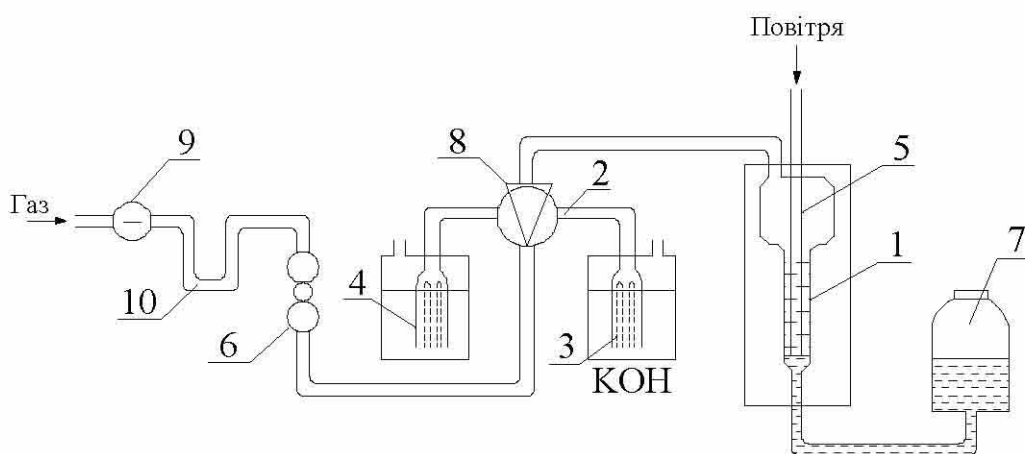


Рис. 76. Об'ємний хімічний газоаналізатор ГХП-2

У посудині 3 вміщено розчин їдкого калію, який призначений для поглинання CO_2 . Посудина 4 містить лужний розчин пирогаллола для поглинання O_2 . Оскільки останній розчин поглинає CO_2 , при проведенні аналізу спочатку визначають зміст CO_2 , а потім O_2 . Усередині мірної бюретки знаходиться трубка 5, що сполучається з атмосферою, яка використовується для контролю тиску проби газу після поглинання визначуваного компоненту. Мірна бюретка термостатована: гумова груша – 6; кран – 8 (на рис. 76 в робочому положенні); напірна посудина із замикаючою рідиною 7 опущена і газ через трубку 5 виштовхується в атмосферу. При підйомі посудини 7 замикаюча рідина, досягши кінця трубки 5, відсікає від атмосфери пробу газу об'ємом 50 см^3 . У двох інших положеннях крана 8 проба газу сполучається з посудинами 3 і 4. Фільтр 10 служить для очищення газу. У якості замикаючої використовується рідина, яка не поглинає компоненти досліджуваної газової суміші; часто застосовуються насичені розчини куховарської солі або CaCl_2 . Ціна поділки мірної бюретки ГПХ-2 складає 0,1 мл. Погрішність в оцінці залишкового об'єму проби складає $\pm 0,2 \%$.

Більш широкими можливостями володіє газоаналізатор ВТІ, призначений для загального аналізу природних і промислових газів. Конструкція газоаналізатора ВТІ відрізняється від ГХП-2 устроєм мірної бюретки і поглинаючих посудин, їх кількістю та наявністю печі для спалювання CO , H_2 і CH_4 .

Плюси об'ємного методу вимірювання концентрації газів:

- простота пристрою;
- можливість вимірювання широкого кола компонентів газових сумішей шляхом підбору відповідних поглиначів або хімічних сполучних реакцій;

- можливість аналізу багатокомплексних газових сумішей.

Недоліки об'ємного методу вимірювання концентрації газів:

- низька точність аналізу (не вище 0,1–0,2 % загального об'єму проби);

- періодичність дії;
- необхідність частої заміни реактивів;
- складність створення на цьому принципі автоматичних приладів;
- громіздкість приладу через велике число елементів зі скла.

У теплових газоаналізаторах вимірювання концентрації визначуваного компонента проводиться шляхом вимірювання теплових властивостей газової суміші, залежної від концентрації визначуваного компонента. Найбільш поширеними приладами цього типу є газоаналізатори засновані на вимірюванні теплопровідності суміші (термокондуметричні) і теплоти, що виділяється під час реакції каталітичного окислення певного компонента (термохімічні). Представники цих груп приладів, як правило, є автоматичними пристроями, що працюють у складі інформаційно-вимірювальних і керуючих систем. Теплові газоаналізатори призначені для безперервного аналізу складу бінарних сумішей.

У магнітних газоаналізаторах, що відносяться до аналізаторів бінарних сумішей, концентрація певного компонента вимірюється за зміною магнітних властивостей газової суміші. Газу за їх магнітною сприйнятливостю діляться на парамагнітні (втягувані в магнітне поле) і діамагнітні (виштовхувані з нього). Найбільшою магнітною сприйнятливостю володіє кисень, який відноситься до парамагнітних газів. Досвід показує, що газу, окрім O_2 , NO і NO_2 , є практично немагнітними (їх об'ємна сприйнятливость на два порядки нижче, ніж у кисню). Таким чином, магнітні властивості газової суміші визначаються концентрацією O_2 , оскільки NO і NO_2 зустрічаються рідко і в малих концентраціях.

В оптичних газоаналізаторах концентрація певного компонента вимірюється за зміною оптичних властивостей газової суміші, до числа яких відносяться показники заломлення, поглинання і випромінювання, спектральна густина тощо. Найбільш поширеними є три групи оптичних газоаналізаторів:

- інфрачервоного і ультрафіолетового поглинання;
- спектрометричні;
- фотокolorометричні.

Оптичні газоаналізатори володіють великою роздільною здатністю, завдяки чому вони застосовуються для аналізу мікроконцентрацій вибухонебезпечних і токсичних домішок в промислових газах, при контролі повітря в атмосфері і виробничих приміщеннях.

Хроматографічні газоаналізатори призначені для аналізу багатоконплексних газових сумішей. Хроматографи є приладами періодичної дії, складнішими за устроєм, ніж інші газоаналізатори. Процес вимірювання в цих приладах розділяється на дві стадії:

- хроматографічне розділення газової суміші на окремі компоненти;
- ідентифікація (детектування) компонентів, що включає якісний і кількісний їх аналіз.

Хроматографічне розділення суміші на окремі компоненти (відкрито М. С. Кольором у 1903 р.) здійснюється за рахунок різної швидкості руху газів уздовж шару сорбенту, обумовленої характером зовнішніх і внутрішніх міжмолекулярних взаємодій. У наш час за можливостями розділення і аналізу багатокомплексних сумішей хроматографія не має конкуруючих методів. Її можна використовувати для аналізу низькокиплячих газів, сумішей летючих і термічностійких, твердих і рідинних речовин тощо. Метод відрізняється високою чутливістю (при використанні іонізаційних детекторів досягає 10^{-8} – 10^{-9} мг/мл) в поєднанні з малим об'ємом відбираної проби, порівняно високою точністю, малим часом аналізу.

Існує три різновиди хроматографічного методу вимірювання, які розрізняються способом переміщення аналізованої суміші: проявник, фронтальний і виштовхуючий. В рамках методу проявника існують різновиди обумовлені процесом розділення суміші на компоненти: газоадсорбційний, газорідинний (розподільний) і капілярний (є різновидом газорідинного способу розділення).

Принципові схеми хроматографа і розділення суміші газів в колонці представлені на рис. 77, 78.

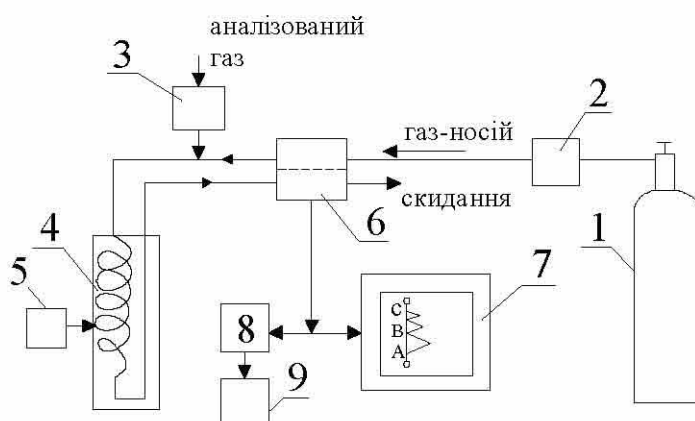


Рис. 77. Хроматограф

Із балона 1 газоносій поступає в хроматограф. Для підтримки постійної швидкості у процесі його роботи використовується регулятор 2, що містить редуктор, манометр і вимірник витрати газу. В газоносій дозатором 3 періодично вводиться проба газу. В розділовій колонці 4, заповненій твердим або рідким сорбентом, аналізована суміш розділяється на компоненти. Упродовж розташування сорбенту з більшою швидкістю рухаються найменш сорбуючі гази. Тому в пробі суміші газів (рис. 78), що містить компоненти А, В і С, першим виноситься найменш сорбуючий газ А, а останнім – добре сорбуючий С. Після розділення кожний компонент з газом-носієм утворює бінарну суміш, аналіз якої може бути проведений різними методами, реалізованими в детекторі 6.

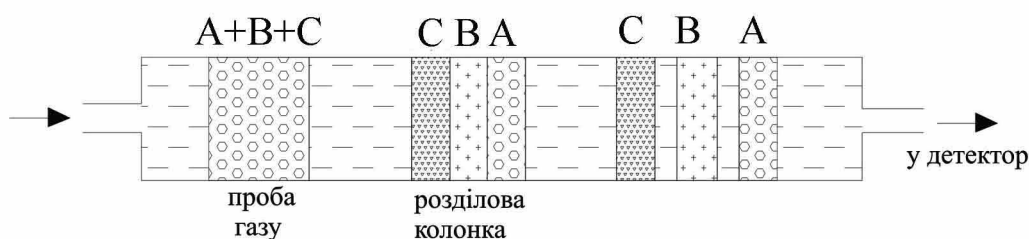


Рис. 78. Схема розділення суміші газів

Оскільки у процесі вимірювання властивості газу-носія можуть змінюватися, при пропусканні його через детектор фіксуються зміни його властивостей, викликані присутністю компоненту аналізованої суміші.

Для поліпшення розділення компонентів температурний режим колонки може змінюватися за допомогою терморегулятора 5 із програмним управлінням. Вихідний сигнал детектора 6 подається на реєструючий прилад 7, інтегруючий 8 і цифродрукуючий 9 пристрої. На діаграмі самописного приладу 7 вихід кожного з компонентів супроводиться піком, площа якої залежить від концентрації цього газу. Графік, що фіксує вихід компонентів, називається *хроматограмою*. Використання інтегрованого і цифродруківаного пристроїв обчислювальної машини автоматизує обробку хроматограм і дозволяє ввести інформацію про склад газів в АСУПТ. Хроматограми є носієм як якісної інформації (про вигляд компонентів суміші), так і кількісної (про їх концентрацію).

Промисловість випускає ряд лабораторних хроматографів серії: «Колір-100», ЛХМ-8Д, «Газохром 1106», ЛХМ-724, ХГ-1Г, «Промінь», «Вирухром», АК-5, АК-1. До групи промислових хроматографів відносяться типи: ХПА, ХТ, ХТД, РХ.

Хроматограф «Газохром 3101» – спеціалізований і призначений для експресного визначення концентрації O_2 , CO_2 , N_2 , H_2 , CO , CH_4 та вуглеводнів до C_4 включно у продуктах горіння різних видів палив, спалюваних у промислових і стаціонарних котельнях, печах та інших теплоізолюючих установках. Відносна похибка вимірювання складає $\pm 5\%$, тривалість аналізу досягає 10 хв. Прилад є переносним, його маса ≤ 8 кг.

В електричних газоаналізаторах концентрація того або іншого комплексу визначається за зміною електричних властивостей газової суміші або рідини, з якою прореагував визначуваний компонент. До них відносяться електрохімічні газоаналізатори, які застосовуються для вимірювання мікроконцентрацій токсичних газів, що містяться в повітрі, визначення концентрації забруднених 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 розчин. Для аналізу газів найчастіше використовуються електрохімічні газоаналізатори – вольт-амперметричні та кулонометричні.

Кулонометричні газоаналізатори засновані на вимірюванні кількості електрики витраченої при електролізі. Згідно закону Фарадея при електролізі для виділення кількості речовини m необхідно через розчин пропускати струм I в перебігу часу τ :

$$m = M I \tau \frac{1}{96\,492 n},$$

де M – молекулярна маса окисленої або відновленої речовини;

n – число електронів, що брали участь в електродному процесі.

Речовина, що виділилася при електролізі, зв'язується без залишку з аналізованим компонентом газової суміші, завдяки чому мірою концентрації останньої служить струм I , який регулюється так, щоб забезпечувалася нейтралізація розчину. Завдяки використанню компенсованого методу вимірювання забезпечує цим газоаналізаторам

високу точність вимірювання, їх показання не залежать від вологості газу, його тиску, температури і параметрів навколишнього середовища. Кулонометричні газоаналізатори «Атмосфера-1» і «Атмосфера-2» призначені для вимірювання вмісту в повітрі мікроконцентрацій SO_2 , H_2S , Cl_2 , O_3 .

Якість і надійність роботи промислових газоаналізаторів значною мірою залежать від способу відбору проби і дотримання вимог до характеристик газу, що поступає в приймач газоаналізатора. Ці вимоги відносяться до температури, тиску, витрати і вологості газу, наявності в ньому механічних, агресивних й інших домішок.

Відібрана проба газу повинна бути представницькою, тобто за своїм складом відповідати усередненому складу газів у відповідних перетинах технологічних об'єктів. Для підготовки проби газу і її транспортування через газоаналізатор використовуються допоміжні пристрої, які, виходячи з їх функцій, розділяються на газовідбірні, редуруючі, охолоджуючі, очисні і просмокуючі тощо. Набір цих пристроїв залежить від типу газоаналізатора, складу і параметрів аналізованого газу.

Повірка показань газоаналізаторів проводиться за допомогою зразкових газових сумішей, вміщених у балони і прилаштованих до газоаналізаторів.

Контрольні завдання і запитання

1. Що називають газоаналізаторами?
2. Перерахуйте основні групи приладів, які використовують в газоаналізаторах.
3. Дайте характеристику об'ємним хімічним газоаналізаторам.
4. Дайте характеристику тепловим газоаналізаторам.
5. Дайте характеристику магнітним газоаналізаторам.
6. Дайте характеристику оптичним газоаналізаторам.
7. Дайте характеристику хроматографічним газоаналізаторам.
8. Дайте характеристику електричним газоаналізаторам.
9. Дайте характеристику кулонометричним газоаналізаторам.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Закон України від 11 лютого 1998 року № 113/98-ВР. Про метрологію та метрологічну діяльність.
2. Закон України від 17 травня 2001 року № 2408-44. Про стандартизацію.
3. Иванова, Г. М. Теплотехнические измерения и приборы / Г. М. Иванова, Н. Д. Кузнецов, В. С. Чистяков. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
4. Кузнецов, Н. Д. Сборник задач и вопросов по теплотехническим измерениям и приборам / Н. Д. Кузнецов, В. С. Чистяков. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
5. Метрология, стандартизация и измерения в технике связи / Под ред. Б. П. Хромого. – М.: Радио и связь, 1976.
6. Основы стандартизации / Под ред. В. В. Ткаченко. – М.: Изд-во стандартов, 1986.
7. Чистяков, В. С. Теплотехнические измерения и приборы. – М.: Высш. шк., 1972.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ ВИМІРІВ	4
1.1. Виміри. Види вимірів.....	4
1.2. Засоби вимірів, їх елементи і параметри.....	6
1.3. Основні метрологічні поняття.....	9
ВИМІР ТЕМПЕРАТУР	13
2.1. Загальні відомості про температуру	13
2.2. Практичні температурні шкали.....	14
ЗАСОБИ ВИМІРІВ ТЕМПЕРАТУРИ	18
3.1. Термометри розширення	19
3.2. Манометричні термометри (МТ)	22
3.3. Термоелектричні термометри (ТЕТ)	25
3.3.1. Основи теорії, термометричні ланцюги	25
3.3.2. Будова ТЕТ і матеріали, які застосовуються	31
3.3.3. Подовжувальні термоелектродні дроти	36
3.4. Мілівольтметри.....	36
3.4.1. Вимір термо-ЕРС мілівольтметром	38
3.5. Компенсаційний метод виміру термо-ЕРС	41
3.6. Термометри опору	43
3.6.1. Загальні відомості про термометри опору	43
3.6.2. Будова термометрів опору	46
3.7. Логометри.....	48
3.8. Пірометри.....	52
3.8.1. Основи теорії виміру температури тіл за випромінюванням.....	52
3.8.2. Методи виміру температури тіл за випромінюванням	55
3.8.3. Будова пірометрів.....	57
3.9. Вимір температури розплавів (металів).....	61
ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ	
І СХЕМИ ДИСТАНЦІЙНОЇ ПЕРЕДАЧІ	64
4.1. Диференціально-транспортні перетворювачі (ДТП) і схеми дистанційної передачі	66
4.2. Передавальні перетворювачі з магнітною компенсацією (ППМК)	73
4.3. Феродинамічні перетворювачі (ФДП).....	78
4.4. Електросилові перетворювачі (ЕСП)	80
4.4.1. Тензоперетворювачі	81
МЕТОДИ І ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ І РІЗНИЦІ ТИСКУ	83
5.1. Загальні відомості.....	83
5.2. Рідинні манометри і дифманометри	85

5.3. Деформаційні манометри і дифманометри.....	88
ВИМІРЮВАННЯ РІВНЯ.....	95
6.1. Вимірювання рівня рідин	95
6.1.1. Рівнеміри з візуальним відліком	95
6.1.2. Гідростатичні рівнеміри.....	96
6.1.3. Поплавковий та буйкові рівнеміри	99
6.2. Вимірювання рівня сипких матеріалів.....	102
ВИТРАТОМІРИ.....	106
7.1. Вимірювання витрати рідин, газу і пару за перепадом тиску в звужуючому пристрої	106
7.2. Оцінка погрішності вимірювання витрати	116
7.3. Витратоміри постійного перепаду. Ротаметри.....	117
7.4. Тахометричні витратоміри	121
7.5. Електромагнітні витратоміри.....	127
7.6. Ультразвукові витратоміри	130
7.7. Тепломіри.....	134
ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ	138
8.1. Загальні відомості.....	138
8.2. Методи вимірювання вологості повітря і газів	139
8.3. Методи вимірювання вологості твердих і сипких тіл	145
АНАЛІЗ СКЛАДУ РІДИН.....	148
9.1. Кондуктометричний метод аналізу розчинів	149
9.1.1. Електродні кондуктометри	152
9.1.2. Безелектродні кондуктометри	154
9.2. Потенціометричний метод аналізу	155
9.2.1. Робочі й допоміжні електроди потенціометричних аналізаторів.....	157
9.3. Оптичний метод аналізу складу рідин	159
АНАЛІЗ СКЛАДУ ГАЗІВ.....	163
10.1. Загальні відомості.....	163
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	171

Для нотаток

Для нотаток

Навчальне видання

Олександр Петрович Арестов

Теплотехнічні виміри

Навчальний посібник

Редактор *М. О. Долгов*

Комп'ютерна верстка і дизайн *О. М. Бармакова*

Комп'ютерна графіка у авторському виконанні

Підп. до друку 02.12.08. Формат 60 × 84 $\frac{1}{16}$.

Папір для множних апаратів. Ризограф. Ум. друк. арк. 10,47.

Обл.-вид. арк. 10,23. Тираж 50 прим.

Зам. № 221. Вид. № 44

Видавництво Дніпропетровського національного університету
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

49010, м. Дніпропетровськ, вул. Лазаряна, 2.

ДК № 1315 від 31.03.2003 р.

www.diiitrvv.dp.ua