



**С.С.Антоненко, Е.В.Колісніченко**

## **КОНТРОЛЬ ТА ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РІДИН І ГАЗІВ**



Міністерство освіти і науки України  
Сумський державний університет

С.С.Антоненко, Е.В.Колісніченко

# **КОНТРОЛЬ ТА ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РІДИН І ГАЗІВ**



КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

*для студентів спеціальності  
“Енергетичний менеджмент”  
всіх форм навчання*

Суми  
Видавництво СумДУ  
2009

**Антоненко С.С.**

**Контроль та вимірювання параметрів рідин і газів:**

конспект лекцій. /Укладачі: С.С.Антоненко, Е.В.Колісніченко. -  
Суми: Вид-во СумДУ, 2009. – 199 с.

Даний посібник до лекційного курсу є компіляцією існуючих знань про сучасні вимірювальні прилади. У представленому посібнику за попередній матеріал для вивчення викладені основні питання теорії визначення похибок. Далі як основний матеріал вивчення, викладаються методи і засоби вимірювання, які дістали великого поширення в роботах щодо контролю за експлуатацією енергетичних систем. Наведено основні експлуатаційні і конструктивні характеристики приладів вимірювання температури, тиску, витрати рідин і газів; вимірювання рівня рідин і сипучих матеріалів; контролю хімічного складу газів; визначення фізичних величин густини і в'язкості рідин і газів.

Навчально-методичний посібник призначений для студентів спеціальності «Енергетичний менеджмент», може бути використаний для спеціальностей інженерно-енергетичного напрямку, а також як додатковий курс для всіх інженерних спеціальностей.

© Суми, СумДУ, 2009

## ЗМІСТ

|  |    |
|--|----|
| Вступ.....   | 7  |
| 1 Основні характеристики вимірювання.....  | 9  |
| 1.1 Термінологія вимірювання.....  | 9  |
| 1.2 Види і методи вимірювання.....   | 11 |
| 1.3 Системи одиниць вимірювання.....   | 12 |
| 2 Класифікація і характеристика вимірювальних приладів.....  | 14 |
| 2.1 Основна класифікація вимірювальних приладів.....   | 14 |
| 2.2 Характеристика елементів і властивостей вимірювальних<br>приладів.....                           | 17 |
| 2.3 Практичні аспекти під час виконання вимірювальних<br>робіт.....                                  | 20 |
| 3 Похибки вимірювання.....   | 22 |
| 3.1 Характеристика похибок.....  | 22 |
| 3.2 Класифікація похибок.....  | 25 |
| 3.3 Графічна характеристика похибок.....   | 30 |
| 3.4 Похибка середнього значення.....   | 36 |
| 3.5 Похибка середнього, обумовлена малою кількістю<br>вимірювань.....                                | 38 |
| 3.6 Інструментальна похибка.....   | 39 |
| 3.7 Класи точності приладів вимірювання.....   | 43 |
| 3.8 Облік похибки і порядок виконання округлення в записі<br>остаточного результату вимірювання..... | 45 |
| 3.9 Похибки непрямих вимірювань.....   | 46 |
| 4 Вимірювання температури.....   | 50 |
| 4.1 Методи вимірювання температури і види температурних<br>шкал.....                                 | 51 |
| 4.2 Класифікація приладів для вимірювання температури.....   | 53 |
| 4.3 Ртутні термометри.....   | 55 |
| 4.4 Дилатометричні термометри.....   | 58 |
| 4.5 Манометричні термометри.....   | 59 |
| 4.6 Термoeлектричні термометри.....  | 60 |
| 4.7 Термометри опору.....  | 62 |
| 4.8 Пірометри.....   | 64 |
| 4.9 Тепловізори.....   | 69 |

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 4.9.1  | Принцип дії тепловізорів.....  | 70  |
| 4.9.2  | Області застосування тепловізорів.....   | 71  |
| 4.9.3  | Методика роботи з тепловізором.....  | 73  |
| 5      | Вимірювання тиску.....   | 74  |
| 5.1    | Загальна класифікація.....   | 74  |
| 5.2    | Рідинні засоби вимірювання тиску.....  | 78  |
| 5.3    | Деформаційні прилади для вимірювання тиску.....                                    | 82  |
| 5.4    | Установлення і обслуговування деформаційних<br>трубчасто-пружинних манометрів..... | 88  |
| 5.5    | Правила вимірювання трубчасто-пружинними<br>манометрами.....                       | 90  |
| 5.6    | Деформаційні вимірювальні перетворювачі тиску<br>прямого перетворення.....         | 91  |
| 6      | Вимірювання витрати і кількості речовини.....                                      | 96  |
| 6.1    | Одиниці і методи вимірювання витрати і кількості<br>речовини.....                  | 96  |
| 6.2    | Витратоміри із звужуючим пристроєм.....  | 98  |
| 6.3    | Швидкісні витратоміри і лічильники.....  | 106 |
| 6.4    | Анемометри.....  | 110 |
| 6.5    | Об'ємні лічильники витрати.....  | 112 |
| 6.6    | Витратоміри обтікання (ротаметри).....   | 115 |
| 6.7    | Електромагнітні (індукційні) витратоміри.....                                      | 118 |
| 6.8    | Теплові витратоміри.....   | 121 |
| 6.9    | Ультразвукові витратоміри.....   | 124 |
| 6.10   | Силові витратоміри.....  | 128 |
| 6.11   | Ваговий метод вимірювання витрати сипучих<br>середовищ.....                        | 129 |
| 6.12   | Вимірювання витрати багатофазних середовищ.....                                    | 129 |
| 6.12.1 | Загальна характеристика багатофазних потоків.....                                  | 129 |
| 6.12.2 | Структури багатофазних потоків.....  | 130 |
| 6.12.3 | Загальна характеристика методів вимірювання<br>витрати багатофазних середовищ..... | 133 |
| 6.12.4 | Вимірювання двофазних потоків витратомірами<br>змінного перепаду тиску.....        | 135 |
| 6.12.5 | Вимірювання витрати суміші твердої і газоподібної<br>фаз.....                      | 136 |

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 6.12.6 | Вимірювання витрати суміші твердої та рідкої фаз....   | 137 |
| 6.12.7 | Вимірювання об'ємної витрати або швидкості двофазної суміші з корекцією на концентрацію компонентів..... | 139 |
| 6.12.8 | Загальна характеристика вимірювання витрати трифазних і трикомпонентних речовин.....                     | 140 |
| 7      | Вимірювання рівня рідин.....   | 142 |
| 7.1    | Загальні відомості.....  | 142 |
| 7.2    | Візуальні засоби вимірювання рівня.....  | 142 |
| 7.3    | Поплавкові засоби вимірювання рівня.....   | 143 |
| 7.4    | Буйкові засоби вимірювання рівня.....  | 145 |
| 7.5    | Гідростатичні засоби вимірювання рівня.....  | 146 |
| 7.6    | Електричні засоби вимірювання рівня.....   | 150 |
| 7.7    | Акустичні засоби вимірювання рівня.....  | 153 |
| 7.8    | Радіоізотопні рівнеміри.....   | 155 |
| 8      | Аналіз складу газів.....   | 156 |
| 8.1    | Загальні положення.....  | 156 |
| 8.2    | Хімічні газоаналізатори.....   | 158 |
| 8.3    | Теплові газоаналізатори.....   | 159 |
| 8.4    | Магнітні газоаналізатори.....  | 163 |
| 8.5    | Дифузійні газоаналізатори.....   | 165 |
| 8.6    | Сорбційні газоаналізатори.....   | 166 |
| 8.7    | Випарні і конденсаційні аналізатори.....   | 169 |
| 8.8    | Діелькометричні аналізатори.....   | 173 |
| 8.9    | Оптичні аналізатори.....   | 174 |
| 8.10   | Іонізаційні газоаналізатори.....   | 175 |
| 8.11   | Полум'яні іонізаційні і фотометричні газоаналізатори....   | 176 |
| 8.12   | Хемілюмінесцентні газоаналізатори.....   | 178 |
| 8.13   | Установлення стаціонарних газоаналізаторів.....  | 179 |
| 9      | Вимірювання фізико-хімічних параметрів рідин і газів.....  | 181 |
| 9.1    | Загальні відомості.....  | 181 |
| 9.2.   | Засоби вимірювання густини рідин і газів.....  | 182 |
| 9.2.1  | Вагові (пікнометричні) денсиметри.....   | 183 |
| 9.2.2  | Поплавкові (ареометричні) денсиметри.....  | 184 |
| 9.2.3  | Гідро- і аеростатичні денсиметри.....  | 185 |
| 9.2.4  | Гідро- газо(аеро)динамічні денсиметри.....   | 188 |

|   |     |
|---|-----|
| 9.2.5 Вібраційні денсиметри.....  | 188 |
| 9.3. Засоби вимірювання в'язкості рідин.....                                | 189 |
| 9.3.1 Капілярні віскозиметри (віскозиметри витікання).....                  | 190 |
| 9.3.2 Віскозиметри з падаючим тілом (кулькові<br>віскозиметри).....         | 191 |
| 9.3.3 Ротаційні віскозиметри.....   | 192 |
| 9.4 Засоби вимірювання тиску насиченої пари рідин.....                      | 194 |
| 9.5 Засоби вимірювання теплоти згорання рідких і<br>газоподібних палив..... | 195 |
| Список літератури.....  | 198 |

## ВСТУП

Розвиток науки і техніки нерозривно пов'язаний з точними вимірюваннями, які подають нову інформацію про навколишній фізичний світ, забезпечують технічні можливості постійного контролю виробничих процесів, контролю роботи енергетичних систем, контролю якості продукції, що випускається і т.п.

Найпростіше зрозуміти сутність вимірювання на прикладі безпосереднього застосування самих засобів вимірювання, тобто різних вимірювальних приладів. Розроблення і застосування вимірювальних приладів у сучасних умовах інженерно-творчої діяльності обумовлене тим, що організм людини має у своєму розпорядженні тільки такі аналізатори, що забезпечують достатню точність порівняння (у досить обмеженому діапазоні) - органи зору і органи дотику. Тому потрібні "перекладачі", якими і є вимірювальні прилади. Важливо розуміти, що в процесі вимірювання порівнюють дві речі - інтенсивність прояву певної властивості, яку нам треба кількісно оцінити, і міру або вимірювальний прилад. Значення величини - продукт цього порівняння. Іншими словами, фізична величина - не об'єктивна реальність, а умовно прийняте поняття.

При сучасних тенденціях в енергозбереженні основним завданням інженера, який займається питаннями раціонального використання енергоресурсів при проведенні робіт з енергоаудиту технологічних і енергетичних систем, є вміння професійно володіти різним вимірювальним устаткуванням, тому що неможливо прийти до остаточних висновків у вирішенні проблем енергозбереження на досліджуваному об'єкті, якщо не знати фактичних параметрів всіх фізичних процесів, що відбуваються під час його експлуатації.

Правильність вибору вимірювального приладу для проведення необхідних вимірювань для фахівця, який не займається їх створенням (інженер-енергетик, інженер-енергоменеджер і т.п.), буде ґрунтуватися лише на знаннях про їх принципи роботи і на конструктивному виконанні. Розуміння принципу роботи вимірювального приладу визначить

максимальну точність вимірювання, а знання конструктивного виконання забезпечить правильну експлуатацію, що в сукупності дасть об'єктивну оцінку стану обстежуваних енергетичних або технологічних систем.

У представленому посібнику за попередній матеріал для вивчення викладені основні питання теорії визначення похибок у напрямі зв'язку їх з роботами з енергетичного аудиту. Далі як основний матеріал вивчення, викладаються методи і засоби вимірювання, які дістали великого поширення в роботах щодо контролю за експлуатацією енергетичних систем. Наведено основні експлуатаційні і конструктивні характеристики приладів вимірювання температури, тиску, витрати рідин і газів; вимірювання рівня рідин і сипучих матеріалів; контролю хімічного складу газів; визначення фізичних величин густини і в'язкості рідин і газів.

Весь матеріал для вивчення, що викладається в даному навчально-методичному посібнику, є лекційним, обсяг якого достатній для одержання базових знань з курсу «Контроль та вимірювання параметрів рідин і газів». Даний посібник до лекційного курсу є компіляцією існуючих знань про сучасні вимірювальні прилади, які наведені у різних літературних джерелах. Додатковий навчальний матеріал (коментарі, практичні приклади, демонстраційні зразки і т.д.) викладається безпосередньо на лекціях

Навчально-методичний посібник призначений для студентів спеціальності «Енергетичний менеджмент», може бути використаний для спеціальностей інженерно-енергетичного напрямку, а також як додатковий курс для всіх інженерних спеціальностей.

# 1 ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИМІРЮВАННЯ

## 1.1 Термінологія вимірювання

У процесі виконання вимірювання, його аналізу необхідно знати, розуміти і застосовувати прийнятну термінологію, яка використовується в області знань теорії вимірювання, що є показником високої кваліфікації інженера, який виконує вимірювальні роботи.

До основної термінології в теорії вимірювання відносять такі визначення:

**Вимірювання** – визначення значення фізичної величини дослідним шляхом за допомогою спеціальних технічних засобів.

**Міра (еталон)** – засіб вимірювання, що забезпечує зберігання і відтворення одиниці вимірювання.

**Первинний еталон** – державний еталон.

**Вторинний еталон** – еталон, значення якого встановлюється за первинним для метрологічних служб.

**Робочий еталон** – еталон, який використовується у вимірюваннях.

**Засоби вимірювання** – технічні засоби, які використовуються при вимірюваннях і атестовані державною метрологічною службою.

**Вимірювальний прилад** – технічний засіб, як правило, що не є мірою, служить для порівняння відомої і величини, яка визначається.

**Точність** – величина, зворотна відносній похибці.

**Однократне вимірювання** дає єдиний результат, що беруть за остаточний результат вимірювання шуканої величини. Однократне вимірювання є достатнім у двох випадках. По-перше, при використанні малочутливого вимірювального приладу, коли всі вимірювання приводять до однакових результатів. По-друге, при вимірюваннях фізичної величини, що змінюється.

**Багаторазові вимірювання** проводять шляхом повторення однократних вимірювань однієї і тієї ж постійної

фізичної величини, це приводить до одержання набору даних. Остаточний результат багаторазового вимірювання, як правило, знаходять із набору даних у вигляді середнього арифметичного результату всіх окремих вимірювань. Вимірювання, проведені в науці і техніці, звичайно прагнуть виконати як багаторазові, щоб забезпечити підвищення точності результатів вимірювання шуканих величин.

Фізичні величини, які вимірюються, відносять до таких основних типів:

**Випадкова величина** - така фізична величина, яка пов'язана з випадковими процесами, тому результат окремого вимірювання не може бути однозначно передбачений заздалегідь. Разом з тим проведення досить великої кількості вимірювань випадкової величини дозволяє встановити, що результати вимірювання відповідають певним статистичним закономірностям.

**Постійна величина** - фізичні постійні, наприклад, швидкість світла у вакуумі, заряд електрона, постійна Больцмана і т.п. Можна вважати постійними величинами також певні фізичні характеристики конкретного об'єкта, що перебуває при фіксованих умовах. Постійна величина найчастіше проявляє себе як випадкова величина, а результати її вимірювання розкривають випадкову природу впливів і відповідають певним статистичним закономірностям

**Змінна величина** - така величина закономірно змінюється із часом внаслідок процесів, що проходять у досліджуваному об'єкті. Вимірювання, проведені в різні моменти часу, фіксують величину в нових умовах. Набір результатів однократних вимірювань являє собою результати принципово неповторних вимірювань, тому що час не можна повернути назад, а вимірювання у цілому не може розцінюватися як багаторазове.

**Нестабільна величина** - вона безсистемна, тобто під час відсутності яких би то не було статистичних закономірностей змінюється, «пливе» або «дрейфує» із часом. До основної характеристики нестабільної величини варто віднести відсутність у експериментаторів інформації про її залежності від

часу. Вимірювання такої величини дає набір даних, що не мають ніяких корисних відомостей.

Особливість процесу вимірювання, яку необхідно враховувати при обробці результатів, пов'язана із впливом точності застосовуваних вимірювальних приладів на визначення типу досліджуваної фізичної величини. Випадковий характер величини може взагалі не виявитися, якщо використані малочутливі прилади.

## 1.2 Види і методи вимірювання

Вимірювання фізичних величин поділяють на *промислові (технічні) і лабораторні*.

**Промислові вимірювання** мають порівняно невисоку точність, достатню для практичних цілей, і виконуються приладами, будова яких відповідає їх призначенню і умовам роботи.

**Лабораторні вимірювання** відрізняються високою точністю завдяки застосуванню більш удосконалених методів і приладів та обліку можливих похибок. Цей вид вимірювання проводиться при виконанні науково-дослідних, налагоджувальних і перевірних робіт.

Для визначення значень вимірюваної величини служать *прямі і непрямі вимірювання*.

**Прямі вимірювання** полягають у безпосередньому порівнянні вимірюваної величини з одиницею вимірювання за допомогою міри або вимірювального приладу зі шкалою, вираженою в цих одиницях. Так, наприклад, до прямих відносять вимірювання довжини метром, тиску манометром, температури термометром і т.д. Завдяки наочності і простоті прямих вимірювання дістали в техніці великого поширення.

**Непрямі вимірювання** передбачають визначення шуканої величини не безпосередньо, а шляхом прямого вимірювання однієї або декількох інших величин:  $A, B, C, \dots$ , з якими вона пов'язана функціональною залежністю. При цьому обчислення вимірюваної величини виконується за формулою  $Q=f(A, B, C, \dots)$ .

**Методом вимірювання** називається сукупність прийомів використання принципів і засобів вимірювання. Існує ряд методів вимірювання, з яких найпоширенішими є *метод безпосередньої оцінки, метод порівняння з мірою і нульовий метод*.

**Метод безпосередньої оцінки** передбачає визначення шуканої величини за відліковим пристроєм вимірювального приладу, наприклад за положенням вказівної стрілки манометра щодо його шкали.

**Метод порівняння з мірою** полягає в тому, що вимірювана величина порівнюється зі значенням, відтвореним мірою для даної величини, наприклад, при вимірюванні довжини каліброваним метром.

**Нульовий метод** є різновидом методу порівняння з мірою; тут результируючий вплив двох величин (вимірювальної і відтвореної міри), спрямованих назустріч одна одній, доводить до нуля. Прикладом може служити вимірювання маси речовини на важільних вагах зі зрівноважуванням її каліброваними вантажами.

### 1.3 Системи одиниць вимірювання

Побудова систем одиниць вимірювання фізичних величин, що включають основні і похідні від них одиниці, обумовлено практичними потребами науки і техніки. Найменування і число основних одиниць вимірювання розкриває зміст і досконалість фізичних теорій, використовуваних на практиці.

Сучасна фізика вивчає рух і взаємодію мас і зарядів у просторі і часі. Отже, для фізичних вимірювань необхідні і достатні чотири основні, тобто незалежні одна від одної, одиниці вимірювання і чотири еталони для зберігання та відтворення цих одиниць - еталони маси, заряду, довжини і часу.

Діюча на цей час і обов'язкова до застосування у всіх країнах Міжнародна система одиниць *SI* як основні одиниці вимірювання використовує одиниці довжини – *метр* (м), маси – *кілограм* (кг), часу – *секунда* (с) і сили струму – *ампер* (А). До

основних одиниць у системі віднесена також *кандела* (кд) – одиниця сили світла, *моль* (моль) – одиниця кількості речовини і *кельвін* (К) – одиниця температури речовини, що мають специфічне призначення.

Інші одиниці вимірювання є похідними від основних, наприклад: частота – герц (Гц,  $\text{с}^{-1}$ ); сила – ньютон (Н,  $\text{кг}\cdot\text{м}/\text{с}^2$ ); тиск – паскаль (Па,  $\text{Н}/\text{м}^2$ ,  $\text{кг}/\text{м}\cdot\text{с}^2$ ); енергія, робота, кількість теплоти – джоуль (Дж,  $\text{Н}\cdot\text{м}$ ,  $\text{м}^2\cdot\text{кг}/\text{с}^2$ ); потужність, потік енергії – ват (Вт, Дж/с,  $\text{м}^2\cdot\text{кг}/\text{с}^3$ ).

## 2 КЛАСИФІКАЦІЯ І ХАРАКТЕРИСТИКА ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ

### 2.1 Основна класифікація вимірювальних приладів

Залежно від призначення прилади для вимірювання поділяють на ряд груп. Основна класифікація передбачає поділ приладів за родом вимірюваних величин. Умовно прийняті такі найменування найпоширеніших приладів, призначених для вимірювання:

*температури* — термометри, пірометри, тепловізори;

*тиску* — манометри, вакуумметри, мановакуумметри, тягоміри, напороміри і барометри;

*витрати і кількості речовини* — витратоміри, лічильники і ваги;

*рівня рідини і сипучих тіл* — рівнеміри і показчики рівня;

*складу газових сумішей та їх вологості* — газоаналізатори і психрометри;

*густини* — денсиметри;

*в'язкості* — віскозиметри;

*теплоти згорання* — калориметри;

*якості води і пари* — кондуктометри і вимірювачі кисню.

Додаткова класифікація підрозділяє зазначені прилади на такі групи:

*за призначенням* - промислові (технічні), лабораторні, зразкові і еталонні;

*за характером показань* — ті, що показують і реєструють (самописні і друкуючі) та інтегруючі;

*за формою подання показань* — аналогові і цифрові;

*за принципом дії* — механічні, електричні, рідинні, хімічні, радіоізотопні та ін.;

*за характером використання* — оперативні, облікові і розрахункові;

*за місцем розташування* — місцеві і з дистанційною передачею показань;

*за умовами роботи* — стаціонарні (щитові) і переносні.

**Промислові прилади** є найпоширенішими засобами вимірювання, застосовуваними для практичних цілей, і мають порівняно просту і міцну конструкцію і високу надійність дії. Точність цих приладів, призначених для роботи в несприятливих умовах (за наявності пилу, вологи, вібрації і т.п.), порівняно невисока. Показання промислових приладів добре бачимо на відстані.

**Лабораторні прилади** служать звичайно для точних вимірювань. Ними користуються, як правило, при дослідницьких і налагоджувальних роботах. Для одержання великої точності вимірювання лабораторні прилади мають ретельне виконання, удосконалені схеми і спеціальні пристосування для відліку показань. При користуванні цими приладами до їх показань вводяться виправлення, обумовлені дослідним або розрахунковим шляхом.

**Еталонні і зразкові прилади** призначені головним чином для перевірки засобів вимірювання. Еталонами називаються міри і прилади, призначені для зберігання одиниць вимірювання і відтворення їх з найвищою точністю. Еталони бувають первинними і вторинними. Найбільш точними є первинні еталони, які є державними еталонами одиниць вимірювання. Значення вторинних еталонів устанавлюються за первинними. До вторинних відносять також робочі еталони, призначені для передачі розмірів одиниць зразковим мірам і приладам. Зразкові прилади використовуються для передачі шляхом перевірки і градирування правильних значень одиниць вимірювання від еталонів до інших приладів. Зразкові прилади бувають чотирьох розрядів залежно від їхньої точності і способів перевірки. Прилади 1-го розряду перевіряються тільки за робочими еталонами, 2-го розряду - за приладами 1-го розряду і т.д.

**Прилади, що показують**, дають миттєве значення вимірюваної величини, відлічуваної за шкалою, а **прилади, що реєструють**, записують зміну цього значення в часі на діаграмному папері (самописні прилади) або друкують ці показання в цифровій формі (друкуючі прилади).

**Самописні прилади** виконуються для запису однієї (одноточкові, або одноканальні прилади) або декількох (багатоточкові, або багатоканальні прилади) вимірювальних величин.

**Інтегруючі прилади** (лічильники або інтегратори) дозволяють визначати сумарне значення вимірювальної величини за будь-який проміжок часу. Для цього показання приладу відраховують на початку і кінці вимірювання, і сумарне значення вимірюваної величини визначається як різниця між кінцевим і початковим відрахуванням.

**Аналогові прилади** дають показання у вигляді безперервної функції вимірюваної величини. До них відносять, наприклад стрілочні, що показують, і більшість самописних приладів.

**Цифрові прилади** мають показання у вигляді окремих дискретних сигналів вимірювальної інформації в цифровій формі. До цих приладів входять прилади-показчики із цифровим відліком, друкуючі і більшість самописних.

**Оперативні прилади** є промисловими засобами вимірювання. За їх показниками проводиться керування роботою виробничих установок. Ці прилади мають велике значення для забезпечення корисної експлуатації технологічного устаткування, виконуються приладами-показчиками і самописними приладами.

**Облікові і розрахункові прилади** служать відповідно для технічного обліку роботи установок і взаємних розрахунків, бувають самописними та інтегруючими.

**Місцеві прилади** встановлюються безпосередньо в місцях вимірювання. У більшості випадків вони призначаються для менш відповідальних спостережень, а також для періодичних вимірювань при пуску і зупинці агрегатів.

Прилади з дистанційною передачею показань на щити керування є основним видом промислових приладів, що забезпечують централізацію контролю за роботою установок. Промислові вимірювальні прилади звичайно є стаціонарними, тобто призначеними для установа (монтажу) на щитах,

стінах, колонах, кронштейнах та ін. Більшість інших приладів (лабораторні, зразкові та ін.) виконуються переносними, установлюваними при вимірюваннях на столах, стендах і т.п.

## **2.2 Характеристика елементів і властивостей вимірювальних приладів**

Кожний вимірювальний прилад складається з ряду частин і вузлів і має задані метрологічні властивості. Головними вузлами вимірювального приладу є *вимірювальний і відліковий пристрій*. Перший з них безпосередньо здійснює вимірювання фізичної величини за допомогою чутливого елемента і за необхідності підсилює вхідний сигнал, а другий - показує, записує або інтегрує отримане значення.

**Вимірювальний пристрій** приладів досить різний і залежить від роду вимірювальної величини (тиск, температура і т.д.) і принципу дії приладу (механічний, електричний та ін.). У більшості випадків вимірювальний пристрій складається з рухливої і нерухомої частин. Переміщення рухливої частини відбувається під впливом вимірювальної величини на чутливий елемент приладу.

**Відліковий пристрій** залежно від характеру показань приладів виконується у вигляді: шкали і покажчика (прилади-покажчики), записуючого пристрою і діаграмного паперу (самописні прилади), рахункового пристрою (інтегруючі прилади).

**Шкала** приладу, який показує, складається з ряду послідовно нанесених на плоскому або профільному (циліндричному) циферблаті поділок, що відповідають числовим значенням вимірюваної величини.

Поділки і числа на циферблаті називаються *градируванням шкали*. Різниця значень, що відповідають двом сусіднім поділкам шкали, виражена в одиницях виміру, називається *ціною поділки шкали*.

Показання приладу, що характеризує значення вимірювальної величини, визначається відповідно як число

відлічених поділок, помножених на ціну поділки шкали. У певних випадках показання знаходиться множенням відліку на постійну приладу, що виражається в одиницях виміру, а також за даними градуйованої характеристики приладу, що являє залежність (синусоїди і т.п.). Точність відліку показань за рівномірною шкалою вище, ніж за нерівномірною.

Якщо шкала приладу починається з нуля, то вона називається *однобічною*, якщо поділки розміщені по обидві боки від нуля — *двобічною*. Іноді вимірювальні прилади виконуються з безнульовою шкалою, що починається не з нуля, а з певного значення. Вимірювання за приладом з безнульовою шкалою точніше, ніж з однобічною або двобічною шкалою, тому що вона має меншу ціну поділки. У певних вимірювальних приладах циферблат зі шкалою робиться обертовим.

Початкове і кінцеве значення шкали являють собою діапазон показань (межі шкали) приладу, а область вимірювання, що допускається за шкалою, за умовами точності являє собою діапазон вимірювання приладу. В окремому випадку діапазони показання і вимірювання можуть бути рівними між собою.

Шкала вимірювальних приладів буває *прямолінійною*, *дуговою* і *круговою* (рис.2.1). Дугова шкала має центральний кут менше, а кругова — більше  $180^0$ . Крім того, шкала може бути рівномірною і нерівномірною (рис.2.2). Рівномірна шкала має однакові відстані між поділками і тому більше зручна для вимірювання, ніж нерівномірна, у якій ці відстані звичайно змінюються за певним законом (параболи).

Покажчиком у промислових приладах служить добре помітна на відстані клинова або клинова-стрижнева стрілка, тоді як більш точні прилади забезпечуються ножовою стрілкою, кінець якої має вигляд леза, розміщеного за нормаллю до площини шкали.

У рідинних скляних приладів покажчиком є видимий рівень (меніск) рідини у вимірювальній трубці. Якщо рідиною є вода або спирт, то через хорошу змочуваність стінок утворюється ввігнутий меніск і відлік показань проводиться по

нижній його границі, а у випадку застосування ртуті - опуклий меніск дозволяє робити відлік по верхній його границі.

Діаграмний диск діаметром 250-300 мм має полярну координатну сітку у вигляді концентричних кіл, що відповідають значенням вимірюваної величини, і радіальних дуг, які відповідають значенням часу. Частота обертання діаграмного диска - 1 або 2 об/добу.

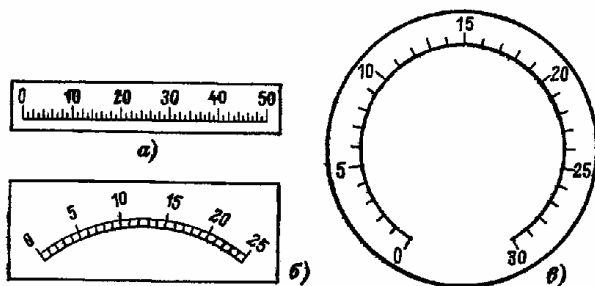


Рисунок 2.1 - Шкали вимірювальних приладів:

а) – прямолінійна; б) – дугова; в) – кругова

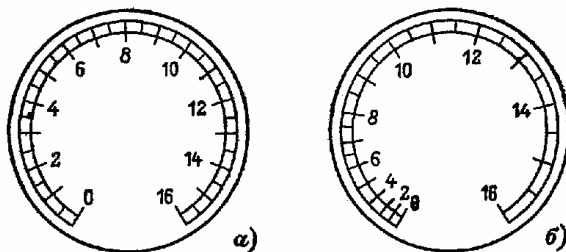


Рисунок 2.2 - Кругові шкали приладів:

а) – рівномірна; б) – нерівномірна

Вимірювальний прилад може бути конструктивно виконаний як одне ціле (у загальному корпусі) або складатися з декількох частин (в окремих корпусах), що самостійно беруть участь у процесі вимірювання і являють собою вимірювальний комплект.

Прилад, що має один корпус, найчастіше є місцевим, а який складається з декількох корпусів - дистанційним. В обох випадках прилад зв'язується з місцем вимірювання за допомогою сполучної лінії (проводів або трубок), яка передає йому значення вимірюваної величини.

Більшість вимірювальних приладів з дистанційною передачею показань містять у собі дві самостійні частини: *первинний вимірювальний перетворювач (датчик) і вторинний прилад*.

**Первинний перетворювач** - є сприймальною і передавальною частиною комплексу, чутливий елемент розміщується, як правило, у місці вимірювання і піддається безпосередньому впливу вимірювальної величини.

**Вторинний прилад**, або частина, що вимірює, видає показання вимірювальної величини, перетворюючи за допомогою вимірювального пристрою одержуваний ним сигнал.

Сигнал виходу надходить від первинного перетворювача у відповідне переміщення відлікового пристрою. Вторинний прилад зв'язується з первинним перетворювачем сполучною лінією і встановлюється звичайно на щиті керування агрегату.

## **2.3 Практичні аспекти під час виконання вимірювальних робіт**

При виборі конкретних видів вимірювального приладу користувач повинен брати до уваги три такі аспекти:

**1 Технічні аспекти** (діапазон вимірювання, похибка, відтворюваність результатів).

Необхідний діапазон буде залежати від знання користувачем очікуваних величин вимірювання. Якщо відсутні переносні для експрес-аналізу вимірювальні прилади, діапазон вимірювання необхідно оцінювати або розраховувати на основі власного досвіду користувача. Максимальне навантаження може бути розраховано, наприклад, на основі максимального навантаження технологічного процесу. Максимальні величини вимірювання попередньо можуть бути встановлені з технічних паспортів обстежуваних систем або механізмів. Мета полягає в тому, щоб максимально припустима величина за шкалою вимірювального приладу перевищувала максимально можливу величину вимірюваного параметра в досліджуваній системі. Крім того, вимірювальний прилад повинен забезпечити

корисний робочий діапазон вимірюваної змінної величини із прийнятною точністю (мінімальною похибкою). При проведенні робіт з енергообстеження енергетичних систем і механізмів дуже часто доводиться перевіряти ще раз вимірювальні величини у відповідних режимах експлуатації обстежуваних технологічних процесів з метою уточнення проведених результатів аналізу їх роботи. Тому обраний вимірювальний прилад повинен мати максимальну можливість відтворювати величини повторюваних вимірювань.

**2 Практичні аспекти** (обмеження щодо установлення, вимоги до технічного обслуговування).

При виборі вимірювального приладу варто брати до уваги вимоги до його механічної надійності і вимоги до корисного технічного обслуговування, можливості переградирування. У технологічній системі під час роботи можуть виникати часті і різкі коливання вимірювального параметра, тому необхідно вибрати такий прилад, що не вийде з ладу при такому динамічному режимі вимірювання, особливо, якщо прилад належить до контактних видів вимірювальних пристроїв.

**3 Врахування властивості рідини і газу** (коливання тиску і температури, ступінь сухості). Якщо існують умови перегріву, нестабільного тиску в системах або техпроцесах, на яких проводяться вимірювання, то вимірювальний прилад повинен бути додатково оснащений компенсаторами тиску, контрольного датчика температури і вологості або мати можливість коректувати показання із введенням поправочних коефіцієнтів.

## 3 ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ

### 3.1 Характеристика похибок

При багаторазовому вимірюванні певної величини легко переконатися, що результат вимірювання увесь час змінюється, тобто в кожному випадку спостерігається відхилення результату вимірювання від середнього значення вимірювальної величини. Крім того, проведення вимірювань тієї самої величини в інший проміжок часу дає не тільки інші відхилення від середнього значення, але й інше середнє значення вимірювальної величини. Це пояснюється тим, що вимірювальна фізична величина досліджуваного тіла так само, як і використовувана міра, протягом часу вимірювань зазнає змін. Ці зміни викликані впливом зовнішніх факторів: зміною температури навколишнього середовища, атмосферного тиску, вологості повітря, вібрації приміщення, електростатичними блукаючими зарядами, струмами і так далі. Отже, “точне” визначення вимірювальної величини, тобто без появи певних відхилень при багаторазових вимірюваннях, неможливе.

Відхилення від середнього результату вимірювань ми називаємо помилками, або похибками вимірювань, і в підсумку вимірювань зазначаємо не тільки середню величину, але і можливе відхилення від цієї величини. Наприклад, довжина тіла дорівнює  $1,2 \pm 0,3$  м.

На практиці при постановці вимірювального завдання потрібно не просто визначити значення вимірюваної величини, але і визначити її з максимально припустимою похибкою. Максимально припустима похибка визначається технологією подальших практичних дій з матеріальним об'єктом. Таким чином, визначення похибки результату вимірювання є не самоціллю, а вимогою практики.

**Похибка** – кількісна характеристика невизначеності, або неоднозначності, результату вимірювання. Її оцінюють, виходячи із всієї інформації, накопиченої при підготовці і виконанні вимірювань. Цю інформацію обробляють для

спільного одночасного визначення остаточного результату вимірювання і його похибок. Остаточний результат не можна розцінювати як “істинне значення” вимірюваної фізичної величини, тому що в цьому нема сенсу через наявність похибки.

З вищесказаного зрозуміло, що чим більшу кількість однакових вимірювань ми проводимо за одиницю часу, тим більше осереднюємо вплив зовнішніх факторів на вимірювальну величину, тим менше відхилення від середнього значення вимірювальної величини, тобто менше похибка вимірювання.

Основними джерелами похибок вимірювань може бути таке:

1. **Похибка інструмента.** Вимірювальний прилад неможливо виготовити абсолютно точно.

2. **Похибка методу вимірювань.** Наприклад, при зважуванні тіла ми не враховуємо виштовхувальну силу повітря, а вона по-різному впливає на тіла, що мають різну густину.

3. **Похибки, пов'язані з фізіологією спостерігача.** Наприклад, відраховуючи показання за стрілковим приладом, спостерігач помиляється через поганий зір або має повільну реакцію при спостереженні за миттєвими змінами величини, яка вимірюється.

4. **Похибки, пов'язані з особливостями об'єкта і залежністю вимірювальної величини від контрольованих навколишніх умов.** Наприклад, ми вимірюємо діаметр деталі на токарському верстаті, а деталь у результаті обробки нагрілася і має температуру вище кімнатної або, наприклад, сильно шорстка.

5. **Похибки, пов'язані із впливом неконтрольованих зовнішніх умов.** Наприклад, при зважуванні тіла на аналітичних вагах на точність показань можуть впливати потоки повітря, електричні поля, порошини, що осідають на зважуване тіло і гирі.

При кожному вимірюванні повинна бути відома ступінь точності його результату, оцінювана похибкою вимірювання. Тільки тоді отримане значення тієї або іншої величини має практичний сенс. Похибка вимірювання може бути виражена у

вигляді *абсолютної* або *відносної величини* і буває позитивною або негативною.

Оскільки не існує абсолютно точних приладів і методів вимірювань, то результат вимірювання  $x_{\text{вим}}$  певною мірою відрізняється від істинного значення  $x$ .

**Абсолютною похибкою** (помилкою) вимірювання називають різницю між обмірюваним та істинним значенням фізичної величини:

$$\pm \delta x = x_{\text{вим}} - x . \quad (3.1)$$

До завдання вимірювання входить також оцінка похибки вимірювання, тому що без цього не можна робити висновки про те, у якій мірі достовірний отриманий результат. Оскільки істинне значення звичайно невідоме, обчислити похибку за (3.1), зрозуміло, не можна. Похибку визначають, виходячи з точності вимірювальних приладів, розкиду експериментальних даних, методики вимірювання і т.д. У результаті одержують не  $\delta x$ , а її наближене значення  $\Delta x$ , у якому невідомий, як правило, навіть знак.

Типова форма подання результату вимірювання така:

$$x = x_{\text{вим}} \pm \Delta x . \quad (3.2)$$

Це означає, що істинне значення з досить високою ймовірністю перебуває в інтервалі

$$x_{\text{вим}} - \Delta x < x < x_{\text{вим}} + \Delta x . \quad (3.3)$$

Інтервал (3.3) називається *інтервалом довіри*.

Іноді для одержання точного результату показання приладу множаться на поправочний множник  $k$ , тобто  $x = k \cdot x_{\text{вим}}$ .

Звичайно для визначення дійсного значення до показання приладу вводиться виправлення  $s$ , що чисельно дорівнює абсолютній похибці, узятій з оберненим знаком. Значення  $\Delta$ ,  $s$  і

$k$  у більшості випадків отримують експериментальним шляхом. Для стаціонарних промислових вимірювань використовуються прилади, найбільші похибки яких перебувають у межах існуючих норм (стандартів), що задовольняють вимоги практики. Тому до показань цих приладів виправлення не вводяться.

**Відносна похибка вимірювання** — відношення абсолютної похибки до вимірюваної величини, виражена в одиницях (відсотках) вимірювальної величини:

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{x} \approx \frac{\Delta x}{x_{\text{вим}}} \times 100. \quad (3.4)$$

Якість вимірювань, їх точність зручно характеризувати саме відносною похибкою. Наприклад, швидкість світла  $c=299792459$  м/с обмірювана з абсолютною похибкою  $\Delta c=1$  м/с або відносною похибкою  $\varepsilon=3 \times 10^{-9}=3 \times 10^{-7}\%$ . Це дуже висока точність вимірювання. Якщо з такою ж абсолютною похибкою вимірюється мала швидкість, наприклад,  $v=10 \pm 1$  м/с, то  $\varepsilon=10\%$  - це досить посередня точність.

При лабораторних і точних промислових вимірюваннях враховуються по можливості всі виникаючі похибки. У цих випадках відлік показань приладу проводиться кілька разів підряд з метою визначення середнього значення вимірювальної величини, вірогідність якого зростає зі збільшенням числа відліку.

### 3.2 Класифікація похибок

Похибки вимірювань залежно від їх характеру поділяють на *систематичні, грубі, випадкові і динамічні*.

**Систематичними похибками** називаються такі похибки, які при повторних вимірюваннях однієї і тієї самої величини залишаються постійними або змінюються за певним законом. Вплив цих похибок на результати вимірювань у здебільшого може бути врахований.

Систематичні похибки можна поділити на кілька груп.

1. Похибки, природа яких відома і які можуть бути досить точно визначені. У цьому випадку в результаті вимірювань можна внести виправлення і тим самим виключити похибку або істотно її зменшити.

2. Похибки відомого походження, але невідомої величини.

3. Похибки, про існування яких ми не підозрюємо, хоча їх величина може бути значною. Такого типу похибки самі небезпечні, особливо при складних вимірюваннях і в маловивчених областях дослідження.

4. Похибки вимірювальних приладів значною мірою також є систематичними.

Систематичні похибки можуть бути настільки великими, що зовсім перевертають результати вимірювань. Тому облік і виключення систематичних похибок становлять важливу частину вимірювальної роботи. Необхідно дуже ретельно продумувати методику вимірювань і підбирати прилади, проводити контрольні вимірювання, оцінювати роль факторів, що заважають, і т.д. Один зі способів переконатися у відсутності систематичних похибок - це повторити вимірювання іншим методом і в інших умовах. Збіг отриманих результатів служить деякою гарантією їх правильності.

Систематичні похибки звичайно складаються з *основної* і *додаткової похибок*.

**Основна (інструментальна) похибка** залежить від призначення, будови і якості виготовлення вимірювального приладу. Кожний, навіть новий, прилад має основну похибку, що із часом звичайно зростає за рахунок появи залишкових деформацій пружин, зношування тертьових частин та ін.

**Додаткові похибки** – це такі, що виникають через неправильне установлення приладу, вплив несприятливих зовнішніх умов (вібрацію, високу або низьку температуру і вологість навколишнього повітря, відхилення напруги і частоти джерела живлення та ін.). Застосування недосконалого методу вимірювання і впливу індивідуальних особливостей спостерігача можуть становити значну величину.

Вплив на результати вимірювань систематичних похибок враховується введенням до показань приладів виправлень, обумовлених розрахунковим або експериментальним шляхом. Виключення становлять лише похибки, що виникають з вини спостерігача, які обліку не піддаються.

**Грубі похибки** пов'язані з факторами, які свідомо та істотно перевертають результат вимірювання, наприклад раптовим зниженням напруги електричного живлення приладу. Сюди ж відносять так звані *промахи* — похибки, пов'язані з помилковими діями спостерігача, — неправильне визначення показань приладу, неправильний їх запис і т.п. Результати вимірювань, що містять грубі похибки, відкидаються як явно неточні.

**Випадкова похибка** — похибка вимірювання, викликана невідомими причинами або відомими причинами випадкового прояву. Випадкові похибки є свідомо невизначеними за своєю величиною і природою. При повторних вимірюваннях вони не залишаються постійними, тому що виникають у підсумку спільного впливу на процес вимірювання багатьох причин, кожна з яких проявляє себе по-різному і незалежна одна від одної. Наприклад, похибки через тертя і вібрацію при зважуванні, похибки через флуктуації температури і густини повітря і т.д.

Випадкові похибки піддаються строгому математичному опису, що дозволяє робити висновки про якість вимірювань, у яких вони наявні. Похибки інших типів більш складні для аналізу, їх виявляють і аналізують тільки в умовах конкретного експерименту. Для одного вимірювання випадкові похибки не піддаються обліку, однак для ряду повторних вимірювань однієї тієї самої постійної величини, проведених з однаковою старанністю, їх вплив на отриманий результат після виключення систематичних і грубих похибок можна оцінити з певною імовірністю.

Теорія випадкових похибок, заснована на методах теорії ймовірностей і математичної статистики, дозволяє при проведенні певної кількості повторних вимірювань уточнити

кінцевий результат. Внаслідок цього теорія випадкових похибок широко використовується для оцінки точності вимірювань і надійності роботи вимірювальних приладів.

Нехай величина  $X$  виміряна  $n$  раз. Тоді відповідно до теорії ймовірності найбільш імовірне значення вимірюваної величини дорівнює її середньому вимірювальному значенню при нескінченно великому  $n$ , тобто

$$\bar{x}_{\text{вим}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (3.5)$$

де  $x_i$  – результат  $i$ -го вимірювання ( $i=1, 2, \dots, n$ )

Умова, в якій  $x \rightarrow X$  при  $n \rightarrow \infty$ , правильна тільки в тому ідеальному випадку, коли систематичні похибки повністю виключені. Якщо кількість  $n$  вимірювань обмежена, то найбільш близьким до цього значення є **середнє арифметичне значення**:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (3.6)$$

Середнє значення  $\bar{x}$  вимірюваної величини  $x$  показує центр розподілу, біля якого групуються результати окремих вимірювань.

Абсолютна похибка  $i$ -го вимірювання

$$\Delta x_i = |\bar{x} - x_i|. \quad (3.7)$$

**Дисперсію** вводять як середній квадрат відхилення окремих результатів від середнього значення випадкової величини:

$$\sigma^2 = \frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{n-1} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}. \quad (3.8)$$

Основною характеристикою випадкової похибки є *середня квадратична похибка*. Необхідно чітко розрізняти середню квадратичну похибку  $\sigma$  для одиничного (окремого) вимірювання і середню квадратичну похибку  $\sigma_{\bar{x}}$  для середнього значення  $\bar{x}$ .

**Середня квадратична похибка** одиничного вимірювання обчислюється за результатами  $n$  вимірювань  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , тобто визначають як квадратний корінь із дисперсії

$$\sigma = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}. \quad (3.9)$$

Як наслідок, зі способу обчислення ця величина характеризує розкид результатів окремих вимірювань навколо середнього значення, одержуваного після обробки всіх даних багаторазового вимірювання. Значення  $\sigma$  є основною характеристикою для визначення точності даного способу вимірювань. Хоча величина  $\sigma$  характеризує випадкову похибку результату одиничного вимірювання, виконаного даним методом, сама вона може бути визначена тільки з результатів досить великої кількості вимірювань і тим точніше, чим більше  $n$  (на практиці можна обмежитися значенням  $n = 10-50$ ). При кінцевих  $n$  правильніше використати термін *експериментальна оцінка*, що так само відносять і до середнього значення, і до дисперсії.

Зі збільшенням кількості  $n$  вимірювань середньоквадратична похибка зменшується. Через обмеження кількості  $n$  вимірювань  $\sigma$  збігається з випадковою похибкою тільки з певною ймовірністю, так званою довірчою ймовірністю  $p$ , тому результат вимірювань величини  $x$  подають у вигляді

$$x = \bar{x} \pm \alpha_{n,p} \cdot \sigma, \quad (3.10)$$

де  $\alpha_{n,p}$  - коефіцієнт Стюдента, залежить як від кількості  $n$  вимірювань, так і від заданої випробувачем довірчої ймовірності  $p$ .

Для попередньої оцінки ступеня вірогідності окремого ряду вимірювань, крім середнього квадратичного відхилення, застосовується також *імовірна похибка*  $\Delta_{im}$ :

$$\Delta_{im} = 0,675 \times \sigma.$$

### 3.3 Графічна характеристика похибок

Вивчення закономірностей, яким підпорядковуються випадкові похибки, можна зробити наочними, якщо побудувати діаграму, що показує, як часто отримуються ті або інші результати вимірювання. Така діаграма називається гістограмою розподілу результатів вимірювання.

**Гістограма** – східчаста діаграма, що показує, як часто при вимірюваннях виникають результати, що потрапили у той або інший інтервал  $\Delta x$  між найменшим  $x_{min}$  і найбільшим  $x_{max}$  з обмірюваних значень величини  $x$ . Гістограму будують у таких координатах: по осі абсцис відкладають вимірювану величину  $x$ , по осі ординат –  $\Delta n/n\Delta x$  (рис.3.1). Тут  $n$  – повна кількість проведених вимірювань,  $\Delta n$  – кількість результатів, що потрапили в інтервал  $[x, x+\Delta x]$ .

Відношення  $\Delta n/n$  є часткою результатів, що попали в зазначений інтервал. Воно має сенс імовірності потрапляння результату окремого вимірювання в даний інтервал. Вираз  $\Delta n/(n \cdot \Delta x)$ , одержуване після розподілу  $\Delta n/n$  на ширину інтервалу  $\Delta x$ , набуває сенсу щільності ймовірності.

При дуже великій кількості вимірювань ( $n \rightarrow \infty$ ) весь діапазон зміни величини  $x$  можна розбити на нескінченно малі інтервали  $\Delta x$ , як це робиться в математиці, і знайти кількість результатів  $\Delta n$  у кожному з них. У цьому випадку гістограма перетвориться в плавну криву - графік функції

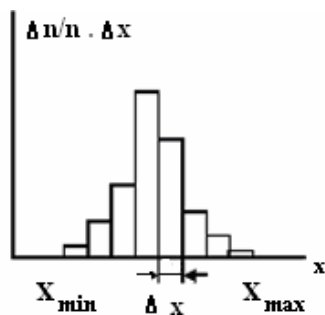


Рисунок 3.1 - Гістограма

$$\rho(x) = \frac{dn}{n \cdot dx} = \lim_{\substack{n \rightarrow \infty \\ \Delta x \rightarrow 0}} \frac{\Delta n}{n \cdot \Delta x}. \quad (3.11)$$

Таку функцію називають **щільністю ймовірності**, або **розподілом** ймовірності, іноді – просто розподілом величини  $x$ . Розподіл виступає в ролі остаточної характеристики випадкової величини. Закон розподілу можна задати у вигляді функціонального вираження, графіка, таблиці або іншим способом. При будь-якому варіанті завдання встановлюється зв'язок між ймовірністю того, що результат однократного вимірювання випадкової величини потрапить у заданий інтервал можливих значень і шириною цього інтервалу.

Розподіл містить найбільш повну інформацію про випадкову величину, однак користуватися ним не завжди зручно. Оперуючи результатами проведеного експерименту, замість функції розподілу краще мати звичні числові величини – ними є *середнє значення* і *дисперсія*.

На рис.3.2 наведені гістограми, побудовані для різної кількості  $n$  вимірювань. На гістограмі (рис.3.2а) для  $n=5$  тільки визначається картина розкиду результатів; на гістограмі (рис.3.2б) для  $n=50$  уже проявляється певна закономірність, що стає ще більш виразною на рис.3.2в для  $n=300$ .

Гістограми, побудовані за великою кількістю вимірювань, дозволяють вивчити закономірності, властиві випадковим похибкам. Гістограма на рис.3.2 в практично симетрична, має вигляд дзвону, положення її максимуму близьке до  $X$ . Це

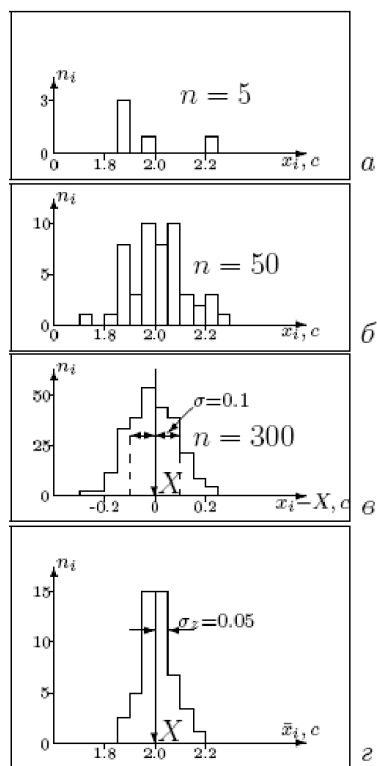


Рисунок 3.2 – Гістограми результатів проведених вимірювань

означає, що випадкові похибки приблизно з однаковою частотою набувають як позитивних, так і негативних значень; більші похибки трапляються рідше, ніж менші.

Ширина гістограми, що практично не залежить від кількості вимірювань, характеризує зону розсіювання результатів вимірювань, тобто випадкові похибки одиничних (окремих) вимірювань. Вона залежить від приладів, методів і умов вимірювань. Це бачимо з порівняння з гістограмою на рис.3.3, отриманої при тих самих вимірюваннях іншим, більш удосконаленим методом. Гістограма (рис.3.3) також має вигляд дзвону але ширина її в 5 разів менша, ніж на рис.3.2в.

Необхідно відзначити таку важливу обставину. Гістограми розподілу результатів вимірювання, отримані при вимірюваннях фізичних величин, виконаних за допомогою різноманітних приладів і методів, здебільшого дуже схожі за формою на гістограмах рис.3.2 в і рис.3.3. Вони розрізняються тільки шириною гістограми і положенням максимуму, тобто величиною  $X$ . При такому розподілі говорять, що вони підпорядковуються закону Гауса (розподіл Гауса, або нормальний розподіл). У теорії похибок наводиться математичний вираз для розподілу Гауса (нормального розподілу):

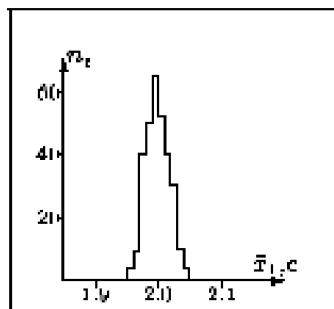


Рисунок 3.3 - Гістограма результатів проведених вимірювань удосконаленим методом

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-X)^2}{2\cdot\sigma^2}}, \quad (3.12)$$

де  $X$  — істинне значення вимірюваної величини;  
 $\sigma$  - середня квадратична похибка;  
 $\sigma^2$  - дисперсія.

На рис.3.4 показані криві 1 і 2 нормального розподілу випадкових похибок, побудованих за формулою (3.12), для двох значень середнього квадратичного відхилення  $\sigma$ , причому в кривій 1 це відхилення у два рази менше, ніж у кривій 2. Криві розподілу симетричні щодо осі ординат, тобто поява рівних за величиною, але протилежних за знаком випадкових похибок має однакову ймовірність, у середній частині криві утворюють опуклість, по обидва боки від якої перебувають точки перегину  $a$  і  $b$ , нижче яких криві стають угнутими, асимптотично наближаючись до осі абсцис. Найбільша ймовірність для обох кривих відповідає випадковій похибці  $\Delta_c=0$ . При зростанні похибки з будь-яким знаком імовірність її появи зменшується.

Як бачимо з рис.3.4, криві розподілу 1 і 2 мають різні відстані між точками  $a$  і  $b$  перегину кривих. Проміжки між цими точками і віссю ординат дорівнюють середньому квадратичному відхиленню  $\pm\sigma$  результату вимірювання, що характеризує ступінь розсіювання (розкиду) значень випадкових похибок.

Чим нижче значення  $\sigma$ , тим менше розсіювання похибок, тому що при цьому майже вся площа під кривою розподілу розміщується поблизу осі ординат, що збільшує ймовірність появи менших і зменшує появу більших похибок. Отже, зменшення  $\sigma$  приводить до підвищення точності вимірювань.

Основні характеристики кривої нормального розподілу

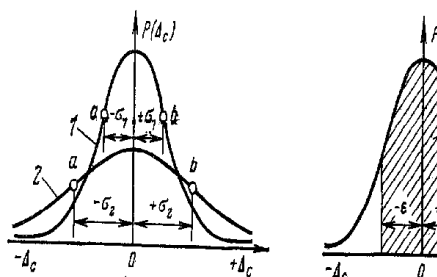


Рисунок 3.4 - Криві нормального розподілу випадкових похибок: 1 – при  $\sigma_1$ ; 2 – при  $\sigma_2=2\sigma$

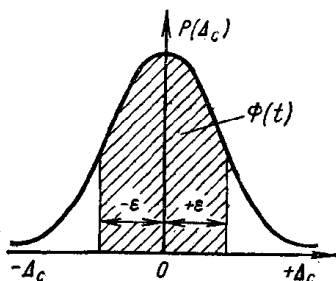


Рисунок 3.5 - Основні характеристики кривої нормального розподілу випадкових похибок

випадкових похибок наведені на рис.3.5. Імовірність того, що випадкові похибки не вийдуть за межі (границі) якого-небудь інтервалу, визначається за площею, обмеженої кривою розподілу і цим інтервалом, відкладеним по осі абсцис. Такий інтервал  $\pm\epsilon$  називається **довірчим інтервалом**, а відповідна йому ймовірність появи випадкової похибки (заштрихована площа)  $\Phi(t)$  — **довірчою ймовірністю**.

Довірчий інтервал, що характеризує ступінь відтворюваності результатів вимірювання, може мати різні значення, причому при великому довірчому інтервалі виходить і більша довірка ймовірність. При вимірюванні може задаватися або довірчий інтервал і за ним визначатися довірка ймовірність, або, навпаки, за довірчою ймовірністю підраховуватися довірчий інтервал. Таким чином, для характеристики значення випадкової похибки необхідно мати дві величини - довірчий інтервал і довірчу ймовірність.

Функція  $f(x)$ , що називається щільністю розподілу результатів вимірювання (3.12), має такий сенс:  $f(x)dx$  є ймовірність того, що окреме випадково обране значення багаторазово вимірюваної величини виявиться в інтервалі від  $x$  до  $x+dx$ . З рис.3.4 бачимо, що при зменшенні  $\sigma$  крива нормального розподілу стискується уздовж осі  $Ox$  і витягується уздовж осі  $f(x)$  ( $P(\Delta_c)$ ). Результати вимірювання групуються навколо істинного значення  $X$  і тим тісніше, чим менше  $\sigma$ . Імовірність того, що результат вимірювання потрапить у довірчий інтервал  $(X-\Delta x, X+\Delta x)$ :

$$P = \int_{X-\Delta x}^{X+\Delta x} f(x)dx .$$

Для повноти опису випадкової похибки необхідно вміти зазначати ймовірність  $P(k)$  потрапляння результату вимірювання  $x_i$  в інтервал будь-якої заданої напівширини  $\Delta x$ , тобто в довірчий інтервал  $\epsilon$  ( $\epsilon = \Delta x$ ):

$$X - \Delta x < x_i < X + \Delta x , \quad (3.13)$$

де  $\Delta x$  зручно виражати через  $\sigma$  і певний множник  $k$ :

$$\Delta x = k \cdot \sigma. \quad (3.14)$$

У таблиці 3.1 наведені значення цього інтеграла для різних значень  $\Delta x = k\sigma$ , а також визначені теоретично значення  $P(k)$ . Імовірність  $P(k)$  змінюється від 0 до 1 при зміні  $k$  від 0 до  $\infty$ . Однак уже при  $k=2$  імовірність  $P(2) = 0,95$ , а при  $k=3$  маємо  $P(3) = 0,997$ . Імовірність 0,997 означає, що з 1000 вимірювань у середньому 997 потраплять в інтервал від  $X - 3\sigma$  до  $X + 3\sigma$  і тільки три вимірювання будуть мати відхилення більше  $3\sigma$ . Тому з деякою часткою умовності величину  $\Delta x=3\sigma$  називають **граничною похибкою вимірювання**.

Таблиця 3.1 - Значення величини довірчої ймовірності

| $k = \frac{\Delta x}{\sigma}$ або $k = \frac{\Delta \bar{x}}{\sigma_{\bar{x}}}$ | Довірча ймовірність $P(k)$ |
|---|----------------------------|
| 1   | 0,68                       |
| 2   | 0,95                       |
| 2,6   | 0,99                       |
| 3   | 0,997                      |

Нерівність (3.13) можна записати в іншому вигляді:

$$x_i - \Delta x < X < x_i + \Delta x, \quad (3.15)$$

або

$$X = x_i \pm \Delta x. \quad (3.16)$$

Цей запис має наступну важливу інтерпретацію. Зробивши одне вимірювання певної величини і одержавши її значення  $x_i$ , можна стверджувати, що істинне значення величини  $X$  перебуває в інтервалі від  $x_i - \Delta x$  до  $x_i + \Delta x$  з імовірністю  $P(k)$ . Інтервал, у якому із заданою ймовірністю  $P$  перебуває істинне значення вимірюваної величини, називається *довірчим інтервалом*. Відповідна ймовірність  $P$  — *довірча ймовірність* цього інтервалу. Напівширина довірчого інтервалу є оцінкою похибки результату вимірювання.

*Примітка.* Імовірність  $P$  іноді називають надійністю.

Якщо в завданні вимірювання задана максимально припустима похибка вимірювання, то зменшити похибку до заданої величини можна, або збільшуючи кількість  $n$  вимірювань при незмінній довірчій імовірності, або зменшуючи довірчу ймовірність при тій самій кількості  $n$  вимірювань, або збільшуючи  $n$  і зменшуючи  $P$  одночасно.

На практиці прийнято обирати  $P$  такою, що дорівнює 0,7 для всіх видів вимірювань. Клас точності засобу вимірювання визначають на заводі-виробнику за умови, що  $P=0,7$ .

### 3.4 Похибка середнього значення

Випадкову похибку можна зменшити, якщо провести не одне, а кілька вимірювань і як результат вимірювання взяти середнє значення  $\Delta\bar{x}$ . Вивчаючи випадкові похибки одиничних вимірювань, розглядалася велика сукупність однорідних вимірювань. Діємо так само із середніми, одержавши з досвіду велику кількість різних середніх значень однієї тієї самої вимірюваної величини. Нехай, наприклад, виконано чотири вимірювання і знайдено їхнє середнє значення  $\Delta\bar{x}_1$ . Виконавши ще чотири вимірювання, одержимо трохи інше  $\Delta\bar{x}_2$ . Зробивши таку операцію досить велику кількість раз, можна побудувати гістограму розподілу середніх значень  $\Delta\bar{x}_i$ .

Теорія дає такий зв'язок між середньою квадратичною похибкою середнього значення, середньою квадратичною похибкою одиничного вимірювання  $\sigma_{\bar{x}}$  і кількістю вимірювань  $n$ , використаних для обчислення середнього  $\Delta\bar{x}$ :

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}. \quad (3.17)$$

Співвідношення (3.17) має велике значення для теорії похибок. По-перше, з нього проглядається значна роль  $\sigma$ , від якої залежать похибки не тільки одиничного вимірювання, але й усередненого результату. По-друге, (3.17) являє собою закон

зменшення випадкової похибки при зростанні кількості вимірювань. Наприклад, бажаючи зменшити похибку в 2 рази, ми повинні зробити замість одного чотири вимірювання; щоб зменшити похибку в 3 рази - 9 вимірювань, а 100 вимірювань зменшують похибку результату в 10 разів. Цей шлях зменшення випадкової похибки часто використовують на практиці. При цьому не слід забувати, що формула (3.17) справедлива тільки для випадкової складової похибки вимірювань. Систематична похибка, а також значною мірою інструментальна похибка не зменшуються при зростанні кількості вимірювань.

Таким чином, все сказане про зв'язок між довірчою ймовірністю  $P(k)$  і похибкою  $\Delta x = k\sigma$  одиничного вимірювання справедливо і для похибки  $\Delta \bar{x}$  середнього. При цьому потрібно тільки замінити  $\sigma$  на  $\sigma_{\bar{x}}$ .

Якщо як результат вимірювання береться середнє  $\bar{x}$  з  $n$  вимірювань, то

$$X = \bar{x} \pm \sigma. \quad (3.18)$$

Причому напівширину довірчого інтервалу  $\Delta \bar{x}$  (похибка середнього) для заданої довірчої ймовірності  $P(k)$  можна визначити в такий спосіб.

1. Припустимо, що з великої серії певних вимірювань значення  $\sigma_{\bar{x}}$  відомо; воно характеризує похибку даного методу вимірювань. Тоді для нової серії подібних вимірювань похибка середнього значення

$$\Delta \bar{x} = k \cdot \sigma_{\bar{x}} = \frac{k \cdot \sigma}{\sqrt{n}}, \quad (3.19)$$

де  $n$  — кількість проведених вимірювань досліджуваної величини.

2. Якщо значення  $\sigma_{\bar{x}}$  невідомо, але оброблювана серія вимірювань ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ ) досить велика ( $n$  більше 10-20), то  $\sigma$  і  $\sigma_{\bar{x}}$  знаходять із цієї серії. Тоді

$$\Delta\bar{x} = k \cdot \sigma_{\bar{x}} = \frac{k \cdot \sigma}{\sqrt{n}} = k \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n-1)}}. \quad (3.20)$$

У такий спосіб для характеристики випадкової похибки необхідно зазначити два числа — саму похибку, тобто напівширину довірчого інтервалу  $\Delta x$  або  $\Delta \bar{x}$ , і пов'язану з нею довірчу ймовірність  $P$ . У фізичній науковій літературі звичайно беруть  $P=0,68$ , тобто зазначають середню квадратичну похибку.

### 3.5 Похибка середнього, обумовлена малою кількістю вимірювань

На практиці часто зустрічається випадок, коли проводиться невелика кількість вимірювань ( $n$  2-10). Для них обчислюється середнє і на підставі тільки цих вимірювань оцінюється похибка середнього  $\Delta \bar{x}$ . У цьому випадку похибки вимірювань заздалегідь не вивчалися і значення  $\sigma$  невідомо. Тому не можна скористатися формулою (3.19), а формула (3.20) для малої кількості вимірювань дає погані результати. Похибка  $\Delta \bar{x}$  обчислена за (3.20) для малої кількості вимірювань, має інше значення довірчої ймовірності. У випадку малого  $n$  правильна оцінка похибки заснована на використанні так званого розподілу Стюдента (*t-розподілу*).

За результатами  $n$  вимірювань ( $n \geq 2$ ) обчислюємо середнє  $\Delta \bar{x}$  і напівширину довірчого інтервалу:

$$\Delta \bar{x} = t_{P,f} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n-1)}}. \quad (3.21)$$

Цей вираз відрізняється від (3.20) множником перед радикалом. Замість множника  $k$  (функції довірчої ймовірності  $P$ ) використовується множник  $t_{P,f}$ , що є функцією не тільки  $P$ , але й кількості вимірювань. Параметр  $f$ , названий числом ступенів

свободи, у цьому випадку відповідає  $f=n-1$ , де  $n$  — кількість вимірювань. Значення  $t_{P,f}$ , розраховані за теорією ймовірностей, наведені в табл.3.2.

Даний метод оцінки похибки середнього значення придатний для будь-якої кількості вимірювань — як для малої, так і великої. При більших  $n$  він переходить у більш простий метод (3.20). Дійсно, з табл.3.2 бачимо, що при зростанні  $n$  значення  $t_{P,f}$  прагне до відповідного значення  $k$ ; наприклад,  $t_{P,f} \rightarrow 1,96 \approx 2$  при  $P = 0,95$ . Відношення  $t_{P,f} / k > 1$  зростає зі зменшенням  $n$  і збільшенням  $P$ . Розбіжність у значеннях  $\Delta\bar{x}$ , обчислених за (3.21) і наближеною формулою (3.20) тим більше, чим менше  $n$ .

Таблиця 3.2 - Значення коефіцієнта  $t_{P,f}$

| $f=n-1$  | Значення коефіцієнта $t_{P,f}$ |           |          |           |
|----------|--------------------------------|-----------|----------|-----------|
|          | $P=0,9$                        | $P=0,935$ | $P=0,95$ | $P=0,957$ |
| 1        | 6,31                           | 12,71     | 63,66    | 636,6     |
| 2        | 2,92                           | 4,3       | 9,93     | 31,6      |
| 3        | 2,35                           | 3,18      | 5,84     | 12,9      |
| 4        | 2,13                           | 2,78      | 4,6      | 8,6       |
| 5        | 2,02                           | 2,57      | 4,03     | 6,9       |
| 6        | 1,94                           | 2,45      | 3,71     | 5,96      |
| 7        | 1,9                            | 2,37      | 3,5      | 5,4       |
| 8        | 1,86                           | 2,31      | 3,36     | 5,04      |
| 9        | 1,83                           | 2,26      | 3,25     | 4,78      |
| 10       | 1,81                           | 2,23      | 3,17     | 4,6       |
| 20       | 1,73                           | 2,09      | 2,85     | 3,85      |
| 120      | 1,66                           | 1,98      | 2,62     | 3,37      |
| $\infty$ | 1,65                           | 1,96      | 2,58     | 3,29      |

### 3.6 Інструментальна похибка

Інструментальна похибка вимірювання визначається похибкою застосовуваних засобів вимірювання, тобто вимірювальних приладів і мір. Інструментальна похибка, названа іноді *приладовою похибкою*, обумовлена багатьма

причинами, пов'язаними з конструкцією приладу, якістю його виготовлення і застосовуваних матеріалів, старанністю регулювання, умовами застосування і т.д. Інструментальна похибка має як систематичну, так і випадкову складову. Співвідношення між ними може бути неоднаковим для різних приладів (зазначається в паспорті приладу), однак частіше переважає систематична похибка. Інструментальну похибку можна встановити при порівнянні показань даного приладу з показаннями більш точного. У цьому випадку можна одержати таблицю або графік виправлень, використання яких підвищує точність приладу.

Для багатьох засобів вимірювання широкого застосування виробники зазначають, що інструментальна похибка із досить великою ймовірністю ( $P \geq 0,95$ ) не перевищує певного значення  $\Delta_{instr}$ , називаного межею похибки, яка допускається. Наприклад, вимірювальна лінійка довжиною 1000 мм має  $\Delta_{instr} = \pm 0,20$  мм, тобто виробник не гарантує, що штрихи нанесені з більшою точністю.

Зв'язок між ціною поділки шкали і  $\Delta_{instr}$  строго не встановлюється, тому судити про точність приладу на підставі ціни поділки шкали можна тільки дуже орієнтовно.

Вимірювальні прилади служать, як відомо, для вимірювання змінних в часі величин і являють собою матеріальні системи, що характеризуються різними інерційними властивостями (механічними, тепловими та ін.). Інерційність приладів при змінному режимі роботи приводить до запізнювання їх показань, тобто до відставання показань від зміни вимірюваної величини, що викликає динамічні **похибки**.

Величина запізнювання показань залежить в основному від принципу дії і будови вимірювального приладу. На неї впливають інерція рухливої частини приладу, теплоємність і теплопровідність термочутливого елемента і спосіб його установа, довжина і діаметр сполучних трубок та ін.

Залежність показань приладу від зміни вимірюваної величини в несталому режимі (перехідному процесі) називається **динамічною характеристикою** вимірювального

приладу. Вид динамічної характеристики визначається характером зміни, що відбувається з вимірювальною величиною і типом вимірювального приладу.

Похибка кожного конкретного приладу є систематичною, але її значення звичайно невідоме, а виходить її неможливо виключити введенням у результат вимірювання відповідного виправлення.

Звичайно ціна найменшої поділки шкали стрілкового приладу погоджена з похибкою самого приладу. Якщо клас точності використовуваного приладу невідомий, за похибку  $\sigma_{\text{прил}}$  завжди беруть половину ціни її найменшої поділки. Зрозуміло, що при зчитуванні показань зі шкали недоцільно намагатися визначити одиниці розподілу, тому що результат вимірювання від цього не стане точнішим. Межа припустимої похибки цифрового вимірювального приладу розраховують за паспортним даними, утримуючу формулу для розрахунку похибки саме даного приладу.

Тому що “приладова” похибка  $\Delta x$  має випадковий характер і не залежить від випадкової похибки багаторазових вимірювань, то при тому самому  $p=0,7$  загальна випадкова похибка багаторазових вимірювань

$$\Delta x_{\text{вип}} = \alpha_{n,p} \cdot \sigma + \Delta x_{\text{прил}} . \quad (3.22)$$

У підсумку випадкова помилка вимірювань є сумою випадкових помилок різної природи:

$$\Delta x_{\text{вип}} = \alpha_{n,p} \cdot \sigma + \Delta x_{\text{прил}} + \Delta x_{\text{відлік}} . \quad (3.23)$$

Результат вимірювань записують у вигляді

$$x = \bar{x} \pm \Delta x_{\text{вип}} . \quad (3.24)$$

Відносна випадкова похибка

$$\mathcal{E} = \frac{\Delta x_{\text{вип}}}{\bar{x}} . \quad (3.25)$$

Сумарну середню квадратичну похибку, обумовлену спільною дією інструментальної і випадкової похибок, можна оцінити за формулою

$$\sigma_{\text{сум}} = \sqrt{\frac{1}{3} \Delta_{\text{інстр}}^2 + \sigma^2}. \quad (3.26)$$

Якщо вимірювання виконані кілька разів і як результат взято середнє значення, то в (3.26) замість  $\sigma$  треба поставити  $\sigma_{\bar{x}}$ . У випадках, коли одна із цих складових переважає над іншою, можна знехтувати малою похибкою. Випадкова похибка вважається нехтовно малою, якщо  $\Delta_{\text{інстр}} > 8\sigma$  ( $\Delta_{\text{інстр}} > 8\sigma_{\bar{x}}$ ). Інструментальна похибка вважається нехтовно малою, якщо  $\Delta_{\text{інстр}} < 8\sigma$  ( $\Delta_{\text{інстр}} < 8\sigma_{\bar{x}}$ ).

Кінцевий результат багаторазового вимірювання містить у собі як випадкову, так і приладову похибку. Випадкова похибка зменшується зі збільшенням кількості окремих вимірювань, а приладова похибка не змінюється, залишаючись у межах  $\pm\sigma_{\text{прил}}$ . При виконанні багаторазового вимірювання бажано одержати стільки окремих вимірювань, скільки необхідно для виконання співвідношення  $\Delta x_{\text{вип}} \ll \sigma_{\text{прил}}$ .

У такому випадку похибка остаточного результату буде цілком визначена лише приладовою похибкою. Однак частіше трапляється ситуація, коли випадкова і приладова похибки близькі за значенням, а тому обидві впливають на остаточний результат. Тоді їх необхідно враховувати спільно і за сумарну похибку беруть

$$\Delta x = \sqrt{(\Delta x_{\text{вип}})^2 + (\sigma_{\text{прил}})^2}. \quad (3.27)$$

Оскільки випадкову похибку звичайно оцінюють із довірчою ймовірністю 0,68, а  $\sigma_{\text{прил}}$  - оцінка максимальної похибки приладу, то можна вважати, що вираз (3.27) задає довірчий інтервал також з імовірністю не менше 0,68. При

виконанні однократного вимірювання оцінкою похибки результату служить  $\Delta x = \sigma_{\text{прил}}/3$ , що враховує тільки гранично припустиму приладову похибку.

Трапляються ситуації, коли випадкову і приладову похибки вдається зрівняти без обчислень  $\Delta x_{\text{вип}}$ . Це можливо, якщо результати окремих вимірювань не виходять за межі припустимої приладової похибки:

$$(x_{\text{max}} - x_{\text{min}}) \leq 2 \sigma_{\text{прил}},$$

де  $x_{\text{min}}$ ,  $x_{\text{max}}$  - найбільше і найменше значення вимірюваної величини. Підвищення точності багаторазового вимірювання в такому випадку неможливе, а похибкою остаточного результату буде  $\sigma_{\text{прил}}/3$ .

### 3.7 Класи точності приладів вимірювання

Дуже часто на шкалі вимірювального приладу, на передній панелі або в технічному документі (паспорті), зазначений його клас точності. Клас точності - це число, знаючи яке можна визначити похибку вимірювання цього приладу. Береться вираження класу точності за допомогою відносних чисел і абсолютних значень похибки. У випадку якщо клас точності виражається відносним числом, то це число вибирається з ряду  $[1; 1,5; (1,6); 2; 2,5; (3); 4; 5; 6] \times 10^n$ , де показник ступеня  $n$  може дорівнювати 1; 0; -1; -2 і т.д. Величини, зазначені в круглих дужках, для знову розроблювальних засобів вимірювання застосовувати не рекомендується. Наприклад: на шкалі приладу просто зазначене число з наведеного ряду, наприклад 0,2 - це означає, що наведена похибка дорівнює  $\gamma = \pm 0,2 \%$ .

**Клас точності** – найбільше значення наведеної похибки вимірювального приладу.

**Наведеною похибкою** вимірювального приладу називають відношення абсолютної похибки вимірювального приладу  $\Delta_c$  до нормованого значення  $X_N$ , вираженого у відсотках:

$$\gamma = \frac{\Delta_c}{X_N} \times 100. \quad (3.28)$$

За нормоване значення використовується верхня межа вимірювань, діапазон вимірювань та ін., тобто

$$\gamma = \frac{\Delta_c}{(X_e - X_n)} \times 100 \quad (3.29)$$

**Відносною похибкою вимірювального приладу** називають відношення абсолютної похибки вимірювального приладу  $\Delta_c$  до дійсного значення вимірювальної величини  $X_D$ , яка виражена у відсотках,

$$\delta = \frac{\Delta_c}{X_D} \times 100. \quad (3.30)$$

На шкалі приладу зазначене число з наведеного ряду, обведене кружком. Наприклад, на шкалі написано 1,0. У цьому випадку нарисоване число встановлює відносну похибку, виражену у відсотках :  $\delta = \pm 1,0\%$ . Нехай, наприклад, межа вимірювання приладу 100 мА, при вимірюванні стрілка показує 80 мА. У цьому випадку  $\Delta_c = \delta \cdot X = \pm 0,01 \cdot 80 \text{ мА} = \pm 0,8 \text{ мА}$ .

Клас точності на приладі може бути виражений за допомогою двох чисел з того самого ряду, розділених косою рисою. Наприклад, на лицьовому боці приладу написано 0,02/0,01. У цьому випадку відносна похибка обчислюється за формулою

$$\delta = \frac{\Delta_c}{X} = \pm \left[ c + d \cdot \left( \left| \frac{X_K}{X} \right| - 1 \right) \right], \quad (3.31)$$

де  $c=0,02\%$ ;  $d=0,01$ ;  $X_K$  – більша (за модулем) межа вимірювань.

### 3.8 Облік похибки і порядок виконання округлення в записі остаточного результату вимірювання

Завершенням обробки даних багаторазового прямого вимірювання при заданій довірчій імовірності є два числа: середнє значення обмірюваної величини і його похибка (напівширина довірчого інтервалу). Ці числа є остаточним результатом багаторазового вимірювання і повинні бути спільно записані в стандартній формі, що містить тільки достовірні, тобто надійно обмірювані цифри цих чисел:

$$x = \bar{x} \pm \Delta x . \quad (3.32)$$

Помилкою було б вважати, що висока точність обчислень при обробці даних може сприяти одержанню більше точного результату вимірювання. Адже обробка даних, якою б складною і трудомісткою вона не була, є вторинною стосовно природи досліджуваного об'єкта і процесу вимірювання. В остаточних числових значеннях це варто враховувати, що і роблять шляхом їхнього округлення.

Необхідність округлення є простим наслідком невизначеності при оцінюванні остаточних результатів, що знаходять за даними експерименту. Обмежена кількість вимірювань вносить невизначеність як у середнє значення, так і в похибку. У математичній статистиці показано, що відносна неточність оцінювання величини  $s(\bar{x})$  становить приблизно  $1/\sqrt{n-1}$ , де  $n$  – кількість використовуваних окремих вимірювань. При  $n \sim 10$  відносна похибка оцінювання  $s(\bar{x})$  може досягати 30%. Зрозуміло, що тоді немає сенсу приводити в похибки зайві цифри, які виявляться свідомо ненадійними. Правда, при виконанні проміжних розрахунків корисно мати одну або дві додаткові цифри, які знадобляться в процесі округлення. Порядок округлення результатів вимірювання проводиться за таким принципом:

1. Виконати попередній запис остаточного результату вимірювання у вигляді  $x = \bar{x} \pm \Delta x$  і винести за загальну дужку

однакові порядки середнього і похибки, тобто множник вигляду  $10^k$ , де  $k$  – ціле число. Числа в дужках переписати в десятковому вигляді з використанням коми, забравши тим самим порядкові множники, що залишилися.

2. Округлити в дужках число, що відповідає похибці: до однієї значущої (ненульовій) цифри ліворуч, якщо ця цифра більше 2, або до двох перших цифр у протилежному разі. При округленні використовують правило: якщо цифра, яка розміщена за тією, що менше 5, то її просто відкидають, інакше цифру, яку залишають, збільшують на одиницю. Якщо цифра, що відкидається дорівнює 5, то найменша помилка досягається при округленні за правилом Гауса до найближчого парного числа. Наприклад, 4,5 округляють до 4, у той самий час 3,5 округляють до 4.

3. Округлити в дужках число, що відповідає середньому значенню: останніми праворуч залишають цифри тих розрядів, які збереглися в похибці після її округлення.

4. Остаточного записати  $x = \bar{x} \pm \Delta x$  з урахуванням виконаних округлень. Загальний порядок і одиниці вимірювання величини приводять за дужками - отримана стандартна форма запису.

Таблиця 3.3 - Запис остаточного результату вимірювання

| Попередній запис  | Стандартна форма запису                         |
|---|---|
| $U = (528,112 \pm 152,4) \cdot 10^1 \text{ мВ}$         | $U = (5,3 \pm 1,5) \cdot 10^2 \text{ мВ}$       |
| $I = (0,418 \pm 0,042) \text{ А}$                       | $I = (0,42 \pm 0,04) \text{ А}$                 |
| $R = (0,03643 \pm 0,00021) \text{ Ом}$                  | $R = (36,43 \pm 0,21) \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$ |
| $f = (125,3 \pm 41) \text{ Гц}$                         | $f = (0,13 \pm 0,04) \cdot 10^3 \text{ Гц}$     |
| $t = (8,72 \cdot 10^2 \pm 30) \cdot 10^{-1} \text{ мс}$ | $t = (87 \pm 3) \text{ мс}$                     |

### 3.9 Похибки непрямих вимірювань

У більшості експериментів використовують непрямі вимірювання. Досліджувану величину  $f$  визначають за результатами прямих вимірювань інших фізичних величин,

наприклад,  $x, y, z, \dots$ , з якими вона зв'язана заздалегідь установленим функціональним математичним співвідношенням

$$f = f(x, y, z, \dots) . \quad (3.33)$$

Цей зв'язок повинен бути відомим експериментаторові. Крім даних прямих вимірювань, параметрами (3.33) можуть виявитися інші величини, точно задані або отримані в інших вимірюваннях, – вони становлять набір вихідних даних. Вираз (3.33), записаний у явному вигляді, називають *робочою формулою* і використовують як для оцінювання результату непрямого вимірювання  $\bar{f}$ , так і для оцінювання похибки вимірювання  $\Delta f$ . Як правило, обидві оцінки пов'язані з остаточними результатами прямих вимірювань  $\bar{x} \pm \Delta x$ ,  $\bar{y} \pm \Delta y$ ,  $\bar{z} \pm \Delta z \dots$ . Звичайно, щоб одержати (3.33), використовують модельний опис, і щоб уникнути модельних похибок при вимірюванні  $f$ , воно повинне адекватно відбивати досліджуване фізичне явище. Якщо модель точна, то модельні похибки виключені, а непряме вимірювання дає надійні результати.

Розглянемо випадок, коли похибки вимірювання величин  $x, y, z, \dots$  мають тільки випадковий характер і відповідають нормальному закону розподілу. Крім цього, похибка кожного окремо взятого прямого вимірювання незалежна, тобто не піддається впливу випадкових факторів, що викликають похибки інших прямих вимірювань, виконаних в експерименті. Такі вимірювання і самі вимірювані величини звуться *статистично незалежними*, або просто незалежними. При виконанні зазначених умов середнє значення величини  $f$  визначають на основі (5.1), виходячи із середніх значень величин  $x, y, z, \dots$ :

$$\bar{f} = f(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \dots) . \quad (3.34)$$

Якщо точність прямих вимірювань досить висока, тобто  $\Delta x \ll \bar{x}$ ,  $\Delta y \ll \bar{y}$ ,  $\Delta z \ll \bar{z}$ , ... , то похибки результатів прямих вимірювань переносяться на результат непрямого вимірювання

як незалежні нормальні розподіли  $f$  навколо  $\bar{f}$  за кожним з аргументів (3.33).

Спільний розподіл навколо  $f$ , що враховує окремі розподіли кожного з аргументів (3.33), повинна визначати похибка непрямого вимірювання  $\Delta f$ . Ці розподіли нормальні і незалежні, тому дисперсія їх спільного розподілу дорівнює сумі їх дисперсій, що строго доведено в математичній статистиці. Тоді середнє квадратичне відхилення спільного розподілу, що обчислюється як корінь із дисперсії, знаходиться з виразу:

$$\Delta f = \sqrt{(\Delta f_x^2 + \Delta f_y^2 + \Delta f_z^2 + \dots)}. \quad (3.35)$$

Цей вираз має загальний характер і його можна використати для оцінювання похибки непрямого вимірювання, виконаного при будь-якому вигляді функції  $f(x,y,z,\dots)$ . Однак варто твердо пам'ятати, що при безпосередніх розрахунках у (3.35) необхідно підставляти похибки  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ , ..., знайдені для того самого значення довірчої ймовірності. Похибка непрямого вимірювання  $\bar{f}$  також буде відповідати цьому значенню довірчої ймовірності. Рекомендується використовувати значення ймовірності  $p=0,68$ . Застосуємо (3.35) до певних поширених залежностей. Інтерес становлять ті випадки, коли за допомогою (3.35) вдається встановити функціональний зв'язок між похибками прямих вимірювань і похибкою непрямого вимірювання. Таблиця 3.4 містить вирази, що задають такий зв'язок.

Таблиця 3.4 - Зв'язок похибок прямих і непрямих вимірювань

| Робоча формула  | Формула похибки  |
|---|--|
| $f=A \cdot x \pm B \cdot y \pm C \cdot z$                           | $\Delta f = \sqrt{(A \cdot \Delta x)^2 + (B \cdot \Delta y)^2 + (C \cdot \Delta z)^2}$                                 |
| $f=A \cdot x^{\pm \alpha} \cdot y^{\pm \beta} \cdot z^{\pm \gamma}$ | $\Delta f = \sqrt{(\alpha \cdot \delta \cdot x)^2 + (\beta \cdot \delta \cdot y)^2 + (\gamma \cdot \delta \cdot z)^2}$ |
| $f=\ln x$   | $\Delta f = \frac{\Delta x}{x}$  |
| $f=e^x$   | $\delta f = \Delta x$  |
| $f=A \cdot \sin \varphi$  | $\Delta f = A \cdot \cos \varphi \cdot \Delta \varphi$   |

У таблиці взяті такі позначення:  $\Delta$  – для абсолютної похибки;  $\delta$  – для відносної похибки;  $A, B, C, a, b, g$  – постійні;  $x, y, z, j$  – результати прямих вимірювань;  $f$  – результат непрямого вимірювання.

## 4 ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

В енергетичних установках і системах теплотехнічні вимірювання служать для безперервного виробничого контролю за роботою устаткування. При проведенні робіт з енергетичного аудиту різних систем, у яких основним об'єктивним показником відповідності їх експлуатаційних характеристик з нормативними вимогами або вимогами технологічних умов є температура, точність її вимірювання буде обумовлювати прийнятність подальших заходів щодо впровадження енергозберігаючих заходів. Як правило, величина температури найбільш значуща в системах з потужними енергетичними потоками, в яких головним чином проводяться вимірювання ряду основних величин (тиску, температури, витрати та ін.) таких робочих речовин:

- свіжої пари, перегрітої пари, відібраної і відпрацьованої пари;
- води живильної, охолодженої, хімічно очищеної, мережевої і конденсату;
- димових газів у топці і газоходах котлоагрегату;
- повітря атмосферного, а також повітря для охолодження турбогенератора;
- насосів, вентиляторів, димососів і в системах перетворення енергій;
- палива твердого, рідкого і газоподібного.

**Температурою** називається ступінь нагріву речовини. Це ствердження про температуру засновано на теплообміні між двома тілами, що перебувають у тепловому контакті. Тіло, більше нагріте, що віддає тепло, має і більш високу температуру, ніж тіло, що сприймає тепло. За відсутності передачі тепла від одного тіла до іншого, тобто в стані теплової рівноваги, температури тіл рівні.

Головним завданням інженера (інженера-енергоменеджера), що проводить температурні вимірювання, є подальше забезпечення надійної і раціональної експлуатації обстежуваної енергосистеми. Успішне виконання цього

завдання, а також організація технічного обліку роботи устаткування неможливі без енергетичного контролю, здійснюваного за допомогою вимірювальних приладів різного призначення, що дозволяє забезпечити:

- надійну і безпечну експлуатацію енергетичних установок;
- економічно найвигідніший режим роботи устаткування;
- організацію технічного обліку роботи агрегатів у цілому.

#### **4.1 Методи вимірювання температури і види температурних шкал**

Виміряти температуру певного тіла безпосередньо, тобто так, як вимірюють інші фізичні величини, наприклад довжину, масу, об'єм або час, не є можливим, тому що в природі не існує еталона або зразка одиниці цієї величини. Тому визначення температури речовини роблять за допомогою спостереження за зміною фізичних властивостей іншої, так званої термометричної речовини, яка зіткнулася з нагрітим тілом, вступає з ним через деякий час у теплову рівновагу. Такий метод вимірювання дає не абсолютне значення температури нагрітого середовища, а лише різницю щодо вихідної температури робочої речовини, умовно прийнятої за нуль.

Внаслідок зміни при нагріванні внутрішньої енергії речовини практично всі фізичні властивості останнього більшою або меншою мірою залежать від температури, але для її вимірювання вибираються по можливості ті з них, які однозначно міняються зі зміною температури, не піддані впливу інших факторів і порівняно легко вимірюються. Цим вимогам найбільше повно відповідають такі властивості робочих речовин, як об'ємне розширення, зміна тиску в замкнутому об'ємі, зміна електричного опору, виникнення термоелектрорушійної сили та інтенсивність випромінювання, покладені в основу будови приладів для вимірювання температури.

Зміна агрегатного стану хімічно чистої речовини (плавлення або затвердіння, кипіння або конденсація), як відомо, проходить при постійній температурі, значення якої визначаються складом речовини, характером її агрегатної зміни і тиском. Значення цих відтворених температур рівноваги між твердою і рідкою або рідкою і газоподібною фазами різних речовин при нормальному атмосферному тиску, що дорівнює 101325 Па (760 мм рт. ст.), називаються *реперними точками*.

Якщо взяти за основу інтервал температур між реперними точками плавлення льоду і кипіння води, позначивши їх відповідно 0 і 100, у межах цих температур виміряти об'ємне розширення певної робочої речовини, наприклад ртуті, що перебуває у вузькій циліндричній скляній посудині, і розділити на 100 рівних частин зміну висоти її стовпа, то в результаті буде побудована так звана температурна шкала.

Для вимірювання температури, що лежить вище або нижче обраних значень реперних точок, отримані поділки наносять на шкалі і за межами відміток 0 і 100. Поділки температурної шкали називаються градусами.

При побудові зазначеної температурної шкали була довільно взята пропорційна залежність об'ємного розширення ртуті від температури, що, однак, не відповідає дійсності, особливо при температурах вище 100 градусів. Тому за допомогою такої шкали можна точно виміряти температуру тільки у двох вихідних точках 0 і 100 градусів, тоді як результати вимірювання у всьому іншому діапазоні шкали будуть неточними. Те саме явище спостерігалось б і при побудові температурної шкали з використанням інших фізичних властивостей робочої речовини, таких, як зміна електричного опору провідника, збудження термоелектрорушійної сили і т.п.

Користуючись другим законом термодинаміки, англійський фізик Кельвін у 1848 р. запропонував дуже точну і рівномірну, що не залежить від властивостей робочої речовини шкалу, яка отримала назву термодинамічної температурної шкали (шкали Кельвіна). Остання заснована на рівнянні термодинаміки для оборотного процесу (циклу Карно).

Термодинамічна температурна шкала починається з абсолютного нуля і у цей час є основною. Одиниці термодинамічної температури позначаються знаком  $K$  (кельвін), а умовне значення її буквою  $T$ .

На Генеральній конференції по мірах і вагах Міжнародний комітет мір і ваг прийняв нову практичну температурну шкалу 1968 р. (МПТШ-68), градуси якої позначаються знаком  $^{\circ}C$  (градус Цельсія), а умовне значення температури – буквою  $t$ . Для цієї шкали градус Цельсія дорівнює градусу Кельвіна.

Крім Міжнародної практичної температурної шкали, існує ще шкала Фаренгейта, запропонована у 1715 р. Шкала побудована шляхом поділу інтервалу між реперними точками плавлення льоду і кипіння води на 180 рівних частин (градусів), позначуваних знаком  $^{\circ}\Phi$ . За цією шкалою точка плавлення льоду дорівнює 32, а кипіння води  $212^{\circ}\Phi$ .

Для перерахування температури, вираженої в кельвінах або градусах Фаренгейта, у градуси Цельсія користуються рівнянням

$$t^{\circ}C = T K - 273,15 = 0,556 (n^{\circ}\Phi - 32), \quad (4.1)$$

де  $n^{\circ}\Phi$  — число градусів за шкалою Фаренгейта.

## 4.2 Класифікація приладів для вимірювання температури

Прилади для вимірювання температури поділяють залежно від використовуваних ними фізичних властивостей речовин на такі групи з діапазоном показань:

**Термометри розширення** ( $-190\dots+650^{\circ}C$ ) засновані на властивості тіл змінювати під дією температури свій об'єм.

**Манометричні термометри** ( $-160\dots+200^{\circ}C$ ) працюють за принципом зміни тиску рідини, газу або пари з рідиною в замкнутому об'ємі при нагріванні або охолодженні цих речовин.

**Термометри опору** ( $-200\dots+650^{\circ}C$ ) засновані на властивості металевих провідників змінювати залежно від нагрівання їх електричний опір.

**Термоелектричні термометри** ( $-50\dots+1800^{\circ}\text{C}$ ) побудовані на властивості різнорідних металів і сплавів утворювати в парі (спаї) термоелектрорушійну силу, що залежить від температури спаю.

**Пірометри** ( $-30\dots+6000^{\circ}\text{C}$ ) працюють за принципом вимірювання випромінюваної нагрітими тілами енергії, що залежить від температури цих тіл.

*Термометри розширення.* Фізична властивість тіл змінювати свій об'єм залежно від нагрівання широко використовується для вимірювання температури. На цьому принципі заснований пристрій *рідинних скляних і дилатометричних* термометрів, які з'явилися дуже давно і послужили для створення перших температурних шкал.

У *рідинних термометрах*, побудованих на принципі теплового розширення рідини в скляному резервуарі, як робочі речовини використовуються ртуть і органічні рідини — етиловий спирт, толуол і ін.

Найбільш широкого застосування дістали ртутні термометри, що мають у порівнянні з термометрами, заповненими органічними рідинами, істотні переваги: великий діапазон вимірювання температури, при якому ртуть залишається рідкою, незмочення скла ртуттю, можливість заповнення термометра хімічно чистою ртуттю через легкість її одержання та ін. При нормальному атмосферному тиску ртуть перебуває в рідкому стані при температурах від  $-39$  (точка замерзання) до  $357^{\circ}\text{C}$  (точка кипіння) і середній температурний коефіцієнт об'ємного розширення  $0,18 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$ .

Термометри з органічними рідинами здебільшого придатні лише для вимірювання низьких температур у межах до  $100^{\circ}\text{C}$ .

Рідинні термометри, виготовлені зі скла, є місцевими показуючими приладами. Вони складаються з резервуара з рідиною, капілярної трубки, приєднаної до резервуара і закритої із протилежного кінця, шкали і захисної оболонки.

### 4.3 Ртутні термометри

Ртутні термометри за призначенням поділяють на *промислові (технічні), лабораторні і зразкові*. Основна похибка ртутних термометрів залежить від діапазону показань і ціни поділки шкали, зі збільшенням яких вона зростає. Внаслідок невеликого відхилення видимого коефіцієнта розширення ртуті в склі при зміні температури ртутні термометри мають майже рівномірну шкалу. Ртутні термометри виготовляються двох видів: із вкладеною шкалою і паличні (рис.4.1).

Термометр із вкладеною шкалою має заповнений ртуттю резервуар 1 (рис.4.1 а), капілярну трубку 2, циферблат 3 з молочного скла зі шкалою і зовнішньою циліндричною оболонкою 4, у якій укріплені капіляр і циферблат. Зовнішня оболонка з одного кінця щільно закрита, а з іншого - припаяна до резервуара.

Паличний термометр складається з резервуара 1 (рис.4.1 б), з'єданого з товстостінним капіляром 2 зовнішнім діаметром 6-8 мм. Шкала термометра нанесена безпосередньо на поверхні

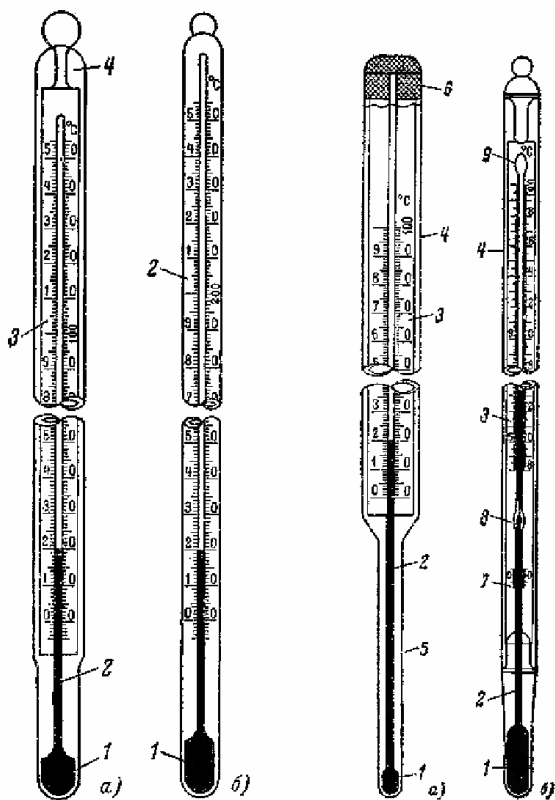


Рисунок 4.1 - Ртутні термометри:  
а - з вкладеною шкалою; б - паличний

капіляра у вигляді насічки на склі. Паличні термометри є більш точними в порівнянні з термометрами із вкладеною шкалою.

Недоліками ртутних термометрів є їх крихкість, неможливість дистанційної передачі і автоматичного запису показань, більша інерційність і труднощі відліку через нечіткість шкали і поганої видимості ртуті в капілярі. Все це значною мірою обмежує їх застосування, залишаючи за ними головним чином область місцевого контролю і лабораторні вимірювання.

Точність показань ртутного термометра, як і будь-якого приладу, що вимірює температуру, залежить від способу його установлення, тобто від правильного вирішення питань, пов'язаних із теплообміном між вимірюваною речовиною, термометром і зовнішнім середовищем. Це завдання зводиться до двох основних вимог: по-перше, до забезпечення найбільш сприятливих умов передачі тепла від вимірюваного середовища чутливої частини (резервуара) термометра і, по-друге, до зменшення по можливості віддачі тепла приладом навколишньому повітрю.

Особливо значно впливає на точність вимірювання витікання тепла від термометра, що при рідкому вимірюваному середовищі визначається теплопровідністю частин приладу, а при газовій і паровій - ще додатковим обміном тепла випромінюванням з навколишніми поверхнями. Крім того, уведена у вимірюване середовище чутлива частина приладу тією чи іншою мірою змінює навколишнє температурне поле внаслідок відведення тепла. У цих умовах вимірювання температури не дає правильних результатів, тому що показання приладу відповідають його власній температурі, що відрізняється від температури вимірювального середовища. Неправильне установлення термометра, що дає більшу втрату тепла в навколишнє середовище, може привести до заниження його показань на 10-15%.

Розглянуті нижче способи установлення ртутних термометрів є в основному загальними для різних типів термометрів.

Застосовуються два способи установлення ртутних термометрів: у захисних оправах (або гільзах) і шляхом безпосереднього занурення термометрів у вимірювальне середовище.

Досить поширеним є установлення термометра в захисній гільзі (рис.4.2), що оберігає його від поломки і забезпечує необхідну щільність з'єднання у місці розміщення приладу. Довжина захисної гільзи вибирається залежно від необхідної глибини занурення термометра. Для поліпшення теплопередачі

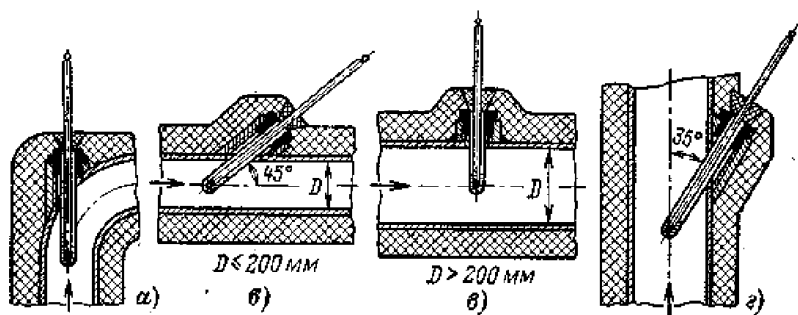


Рисунок 4.2 - Установлення ртутного термометра у захисній гільзі

від гільзи до резервуара термометра кільцевий зазор, що утвориться в гільзі, між резервуаром та її стінкою заповнюється при вимірюванні температури до 150<sup>0</sup>С машинним маслом, а при більш високій температурі - мідною стружкою. Заповнення гільзи маслом або стружкою проводиться так, щоб у це середовище був занурений тільки резервуар термометра. Надмірне заповнення гільзи знижує точність вимірювання через зростання відтоку тепла і збільшує інерційність приладу.

При вимірюванні температури в трубопроводі термометр установлюється в положення, при якому вісь труби проходить посередині резервуара. Занурення кінця термометра до центра труби, тобто в зону найбільшої швидкості потоку, поліпшує теплообмін між середовищем, що рухається.

Найбільш правильним є установлення термометра уздовж осі трубопроводу на коліні з висхідним потоком (рис.4.2 а), тому що при цьому умови обтікання кінця гільзи досить

сприятливі. На горизонтальному трубопроводі діаметром до 200 мм термометр встановлюється похило до осі труби, назустріч потоку (рис.4.2 б). При діаметрі трубопроводу більше 200 мм термометр може бути розміщений за нормаллю до осі труби (рис.4.2 в). На прямій вертикальній ділянці трубопроводу з висхідним потоком термометр завжди встановлюється похило, назустріч потоку (рис.4.2 г). Установлювати термометри на вертикальних трубопроводах зі спадним потоком не рекомендується.

#### 4.4 Дилатометричні термометри

До дилатометричних термометрів відносять *стрижневі* і *пластинчастий* (біметалічний) термометри, дія яких заснована на відносному подовженні під впливом температури двох твердих тіл, що мають різні температурні коефіцієнти лінійного розширення.

Стрижневий термометр (рис.4.3 а) має закриту з одного кінця трубку 1, що розміщується у вимірювальному середовищі і виготовлена з матеріалу з більшим коефіцієнтом лінійного розширення. У трубку вставлений стрижень 2, що притискається до її дна важелем 3, з'єднаним із пружиною 4. Стрижень виготовлений з матеріалу з малим коефіцієнтом розширення. При зміні температури трубка змінює свою довжину, що приводить до переміщення в ній стрижня, який зберігає майже постійні розміри і з'єднаний за допомогою важеля 3 із вказівною стрілкою приладу.

Пластинчастий термометр (рис.4.3 б) складається із двох вигнутих і спаяних між собою по краях металевих смужок, з яких смужка 1 має великий коефіцієнт лінійного розширення, а смужка 2 — малий. Отримана пластинка змінює залежно від температури ступінь свого вигину, величина якого за допомогою тяги 3, важеля 4 і з'єднаної з ним стрілки зазначається за шкалою приладу. При збільшенні температури пластинка вигинається убік металу з меншим коефіцієнтом лінійного розширення.

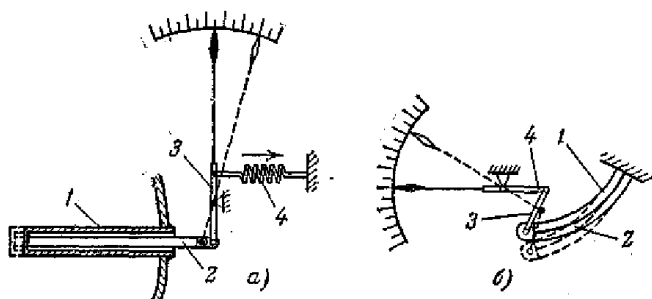


Рисунок 4.3 - Дилатометричні термометри:  
а – стрижневий; б – пластинчастий

Дилатометричні термометри не дістали поширення як самостійні прилади, а використовуються головним чином як чутливі елементи в сигналізаторах температури. Крім того, пластинчасті термометри іноді застосовуються для компенсації впливу змінної температури навколишнього повітря на показання інших приладів, у які вони вбудовуються.

## 4.5 Манометричні термометри

Дія манометричних термометрів заснована на залежності тиску рідини, газу або пари з рідиною в замкнутому об'ємі (термосистемі) від температури. Зазначені термометри є показуючими промисловими і самописними приладами, призначеними для вимірювання температури в діапазоні до 200°C. Клас точності їх 1-2,5.

Залежно від робочої речовини, яка використовується в термосистемі, манометричні термометри поділяють на *газові*, *рідинні* і *конденсаційні* (мають як робочу речовину органічні рідини з низькою температурою кипіння: хлористий метил, ацетон і фреон). Вибір робочої речовини виконується виходячи із заданого діапазону показань і умов вимірювання.

Схема манометричного термометра, що показує, наведена на рис.4.4. Термосистема приладу, заповнена робочою речовиною, складається з термобалона 1, що занурюється у вимірювальне середовище, манометричної трубчастої пружини

2, що діє за допомогою тяги 3 на вказівну стрілку 4, і капіляра 5, що з'єднує пружину з термобалоном.

Термобалон являє собою металеву трубку, закриту з одного кінця, а з іншого - з'єднану з капіляром. За допомогою знімного штуцера 6 з різьбленням і сальником термобалон установлюється в трубопроводах, баках і т.п. Можливе установлення його і у захисній гільзі. При нагріванні термобалона збільшення тиску робочої речовини передається через капіляр трубчастій пружині і приводить до розкручування останньої до того часу, доти діюче на неї зусилля, пропорційне різниці тисків у системі і навколишнім повітрі, не зрівноважиться силою її пружної деформації.

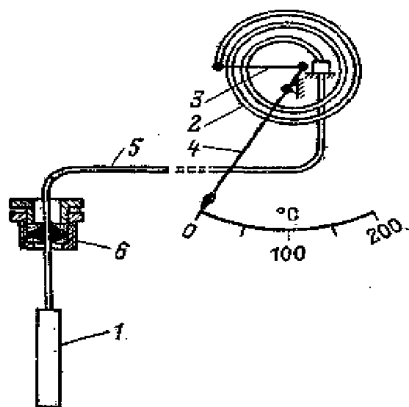


Рисунок 4.4 - Схема манометричного показуючого термометра

#### 4.6 Термоелектричні термометри

Дія термоелектричних термометрів заснована на властивості металів і сплавів створювати термоелектрорушійну силу (термоерс), що залежить від температури місця з'єднання (спаю) кінців двох різнорідних провідників (термоелектродів), що утворюють чутливий елемент термометра — **термопару**. Маючи у своєму розпорядженні закон зміни термоерс термометра від температури і визначаючи значення термоерс електровимірjuвальним приладом, можна знайти реальне значення температури в місці вимірювання.

Термоелектричний термометр, що складається із двох спаяних і ізолюваних по довжині термоелектродів, захисного чохла і головки із затискачами для підключення сполучної лінії, є первинним вимірювальним перетворювачем. Як вторинні

прилади, що працюють із термоелектричними термометрами, застосовуються магнітоелектричні мілівольтметри і потенціометри.

Термоелектричні термометри широко застосовуються в енергетичних установках для вимірювання температури перегрітої пари, димових газів, металу труб котлоагрегатів і т.п. Позитивними властивостями їх є: великий діапазон вимірювання, висока чутливість, незначна інерційність, відсутність стороннього джерела електричного струму і легкість здійснення дистанційної передачі показань.

Для одержання порівняно високих значень термоерс вибір термоелектродів проводиться таким чином, щоб у парі із платиною один з них створював позитивну, а інший - негативну термоерс.

Термоелектричні термометри, що набули практичного застосування, поділяють за матеріалами термоелектродів на дві групи: із благородних (платина, платинородій) і неблагородних металів або сплавів (хром-алюмель, хромель-копелевий сплав). Термометри типів ТПП і ТПР із термоелектродами із благородних металів і сплавів застосовуються головним чином для вимірювання температури вище 1000°C, тому що вони мають високу термостійкість. Незважаючи на відносно малі значення, що розвиває термоерс, термометри типу ТПП завдяки винятковій сталості термоелектричних властивостей і великому діапазону вимірювання дістали великого поширення головним чином як лабораторні, зразкові та еталонні.

Випускаються *одинарні* (з одним чутливим елементом) і *подвійні* (із двома чутливими елементами) термоелектричні термометри різних типів.

Подвійні термометри застосовуються для вимірювання температури в тому самому місці одночасно двома вторинними приладами, установленими в різних пунктах спостереження. Вони містять два однакових чутливих елементи, з'єднаних у загальні арматури. Термоелектроди ізольовані один від одного і знаходяться у захисному чохлі.

На рис.4.5 показано будову термометра типу ТПП. Термоелектроди, що утворюють робочий кінець (спай) 1, ізольовані по довжині порцеляновими трубками 2 і 3 і поміщені в захисний чохол 4, розрахований на атмосферний тиск. Для надання чохла додаткової міцності неробоча частина його вставлена в сталеву трубку 5. За допомогою сталевих втулок 6 і 7 захисний чохол з'єднаний з корпусом 8, у якому закріплені два затискачі 9 із припаяними до них термоелектродами, ущільненими мастикою 10. Корпус закритий знімною кришкою 11 на різьбленні, ущільненим прокладкою 12. Для уведення в корпус зовнішніх сполучних проводів служить штуцер 13 з ущільненням 14. На поверхні закріплена металева табличка 15, на якій зазначені: тип термометра, тиск, що допускається, і кінцева температура вимірюваного середовища, матеріал захисного чохла, дата виготовлення термометра і марка підприємства-виробника.

На точність вимірювання термоелектричного термометра значно впливають спосіб установлення і правильність проведення перевірки термометра і вторинного приладу.

Одним з основних вимог, які рекомендуються при установленні термоелектричного термометра, є досягнення мінімального витоку тепла по його арматурах. Для цього термометр можливо глибше занурюють у вимірювальне середовище, що приводить до збільшення теплосприймаючої поверхні і розташовується в місцях з великою швидкістю потоку, що поліпшує умови теплообміну.

#### **4.7 Термометри опору**

Для вимірювання температури широкого застосування дістали термометри опору, дія яких заснована на зміні електричного опору металевих провідників залежно від температури. Метали, як відомо, збільшують при нагріванні свій опір. Отже, знаючи залежність опору провідника від температури і визначаючи цей опір за допомогою

електровимірювального приладу, можна робити висновки про температуру провідника.

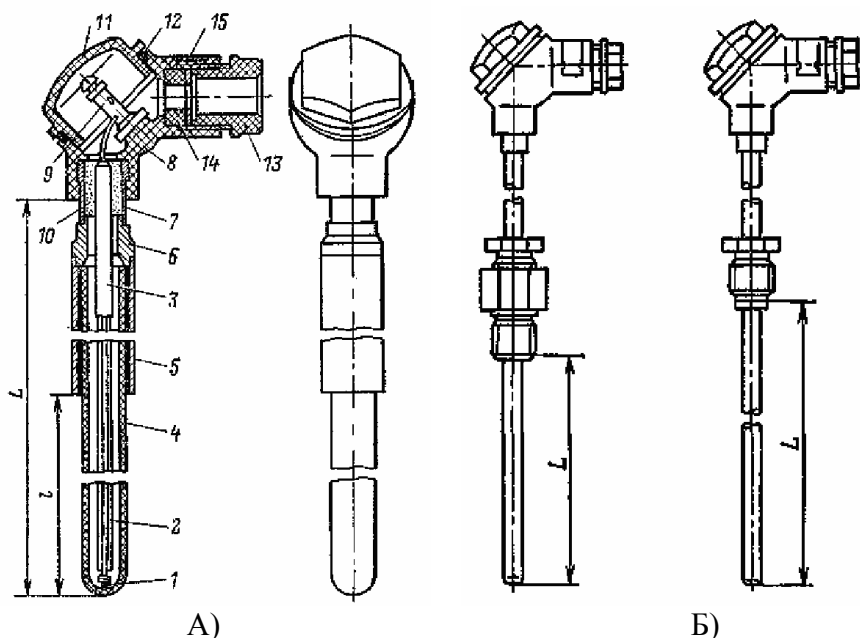


Рисунок 4.5 - Термоелектричний термометр типу ТПП (А) і ТХА (Б)

Застосовуються *технічні* (промислові), *зразкові* та *еталонні платинові* термометри опору.

Термометр опору, чутливий елемент якого складається з тонкого спірального дроту (обмотки), ізольованого і поміщеного в металевий захисний чохол з голівкою для підключення з'єднувальних проводів, є первинним вимірювальним перетворювачем, який живиться від стороннього джерела струму.

Як вторинні прилади, що працюють із термометрами опору, застосовуються рівноважені і нерівноважені вимірювальні мости і магнітоелектричні логометри.

Кінцева межа вимірювань дрових термометрів опору, обумовлена стійкістю їх при нагріванні, дорівнює  $650^{\circ}\text{C}$ .

Перевагами термометрів опору є висока точність вимірювання, можливість одержання приладів з безнульовою шкалою на вузький діапазон температур, легкість здійснення автоматичного запису і дистанційної передачі показань і можливість приєднання до одного вторинного приладу за допомогою перемикача декількох однотипних термометрів. До недоліків цих приладів відносять потребу в сторонньому джерелі струму.

#### 4.8 Пірометри

Пірометри застосовуються для вимірювання температури тіл у діапазоні від мінус 30 до плюс 6000<sup>0</sup>С. Дія цих приладів заснована на залежності теплового випромінювання нагрітих тіл від їх температури і фізико-хімічних властивостей. На відміну від термометрів первинний перетворювач пірометра не підпадає під вплив високої температури і не змінює температурне поле, тому що перебуває поза вимірювальним середовищем.

З підвищенням температури нагрітого тіла інтенсивність його теплового випромінювання у вигляді електромагнітних хвиль різної довжини швидко зростає. При нагріванні до 500<sup>0</sup>С тіло випромінює невидимі інфрачервоні промені великої довжини хвилі, однак подальше збільшення температури викликає появу видимих променів меншої довжини, завдяки яким тіло починає світитися. Спочатку розпечене тіло має темно-червоні кольори, у міру підвищення температури і появи променів, що поступово зменшуються за довжиною хвилі, переходить у червоний, жовтогарячий, жовтий і, нарешті, білі кольори, що складається з комплексу променів різної довжини хвилі.

Одночасно зі збільшенням температури нагрітого тіла і зміною його кольору сильно зростає інтенсивність часткового (монохроматичного або одноколірного) випромінювання (яскравість) для даної ефективної довжини хвилі, а також помітно збільшується інтенсивність сумарного випромінювання (радіація) тілом енергії, що дозволяє використовувати ці

властивості для вимірювання температури нагрітих тіл.

Різні фізичні тіла, що нагріті до тієї самої температури, мають неоднакові часткову і сумарну інтенсивності випромінювання і мають різні коефіцієнти поглинання, що являє собою відношення енергії, поглиненої тілом, до енергії, що падає на тіло.

Найбільшу здатність випромінювання і поглинання енергії має так зване *абсолютно чорне тіло*, у природі не існуюче, що становить собою уявлюваний ідеальний випромінювач. Це тіло поглинає всі падаючі на нього промені, тобто має коефіцієнт поглинання, що дорівнює одиниці, і має найбільшу інтенсивність випромінювання. Фізичні тіла мають здатність відбивати частину падаючих на них променів і, отже, завжди мають коефіцієнт поглинання менше одиниці. Інтенсивність випромінювання і коефіцієнт поглинання при даній температурі залежать від складу речовини і стану його поверхні. Тіло, що має темну і шорсткувату поверхню, ближче за своїми властивостями до чорного тіла, ніж тіло зі світлою і полірованою поверхнею.

Внаслідок цього шкалу пірометра доводиться градувати за випромінюванням чорного тіла, тому що випромінювальна здатність реальних тіл менша, ніж чорних тіл, то показання пірометра будуть відповідати не дійсній температурі реального тіла, а дають умовну температуру або у цьому випадку так звану температуру яскравості. Пірометри, що вимірюють температуру яскравості за спектральною яскравістю у видимій частині спектра, називають *оптичними (квазімонохроматичними) візуальними пірометрами і фотоелектричними*.

Прилади, що вимірюють температуру за значенням відношень енергетичних яскравостей у двох спектральних інтервалах, називають *колірними пірометрами*, або *пірометрими спектрального відношення*.

**Оптичні пірометри** широко застосовуються в лабораторних і виробничих умовах для вимірювання температур вище 800°C. Принцип дії оптичних пірометрів заснований на порівнянні спектральної яскравості тіла зі спектральною

яскравістю градуйованого джерела випромінювання. Як чутливий елемент, що визначає збіг спектральних яскравостей у візуальних оптичних пірометрах, служать очі людини. Найпоширенішим є оптичний пірометр зі зникаючою ниткою, схема якого наведена на рис.4.6 а. Для вимірювання температури об'єктів приладу спрямовується на об'єкт вимірювання *ОВ* так, щоб спостерігач на його фоні побачив в окулярі 7 нитку оптичної лампи 4.

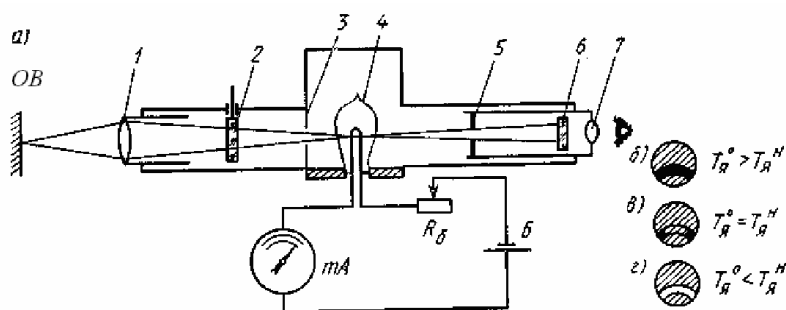


Рисунок 4.6 - Схема візуального оптичного пірометра

Порівняння спектральних яскравостей об'єкта вимірювання і нитки лампи 4 здійснюються звичайно при довжині хвилі, що дорівнює 0,65 мкм, для чого перед окуляром установлений червоний світлофільтр 6. Вибір червоного світлофільтра обумовлений тим, що око людини сприймає через цей фільтр тільки частину спектра його пропущення, що наближається до монохроматичного променя. Крім того, застосування червоного світлофільтра дозволяє знизити нижню межу вимірювання пірометра. Діафрагми (вхідна 3 і вихідна 5) обмежують вхідний і вихідний кути пірометра, оптимальні значення яких дозволяють забезпечити незалежність показань приладу від зміни відстані між об'єктом вимірювання і об'єктивом.

Спостерігаючи за зображенням нитки лампи на фоні об'єкта вимірювання (світлий фон — темна нитка (рис.4.6 б), темний фон — світла нитка (рис.4.6 в), за допомогою реостата змінюють силу струму, що йде від батареї Б до нитки лампи, до

того часу, доти яскравість нитки не стане рівною видимій яскравості об'єкта вимірювання. При досягненні зазначеної рівності нитка «зникає» на фоні зображення об'єкта вимірювання (рис.4.6 в). У цей момент за шкалою міліамперметра, попередньо градуированого за значеннями температури яскравості нитки лампи, визначають яскравісну температуру об'єкта. За обмірюваною яскравісною температурою і відповідними виразами розраховують істинну температуру об'єкта.

Звичайно в оптичних пірометрах є дві шкали, однією з яких користуються при невстановленому поглинаючому світлофільтрі, наприклад від 800 до 1200°C, а іншою — при встановленому світлофільтрі від 1200 до 2000°C. Існуючі в цей час оптичні пірометри призначені для вимірювання температур в інтервалі від 800 до 6000°C і мають різні модифікації з різними межами вимірювання. Клас точності оптичних пірометрів 1,5-4,0.

На точність вимірювання температури оптичними пірометрами впливають ступінь відхилення властивостей випромінювача від властивостей чорного тіла, а також поглинання променів проміжним середовищем, через яке проводиться спостереження. На результати вимірювання впливають наявність у навколишньому повітрі пилу, диму і великого вмісту двоокису вуглецю. Крім того, усяке забруднення оптичної системи пірометрів також проводить до збільшення похибки вимірювання.

Перевагами оптичних пірометрів є порівняно висока точність вимірювання, компактність приладу і простота роботи з ними. До недоліків варто віднести потребу в джерелі живлення, неможливість стаціонарного вимірювання температури і автоматичного її запису, а також суб'єктивність методу вимірювання, заснованого на спектральній чутливості очей спостерігача.

Багато реальних тіл, такі, як кераміка, оксиди металів, вогнестійкі вироби, графіт та ін. є практично сірими. У цьому зв'язку переваги колірного методу вимірювання очевидні, тому

що колірна температура багатьох твердих і рідких тіл значно менше відрізняється від істинної температури, ніж яскравісна або радіаційна.

**Фотоелектричні пірометри.** На відміну від оптичних візуальних пірометрів фотоелектричні пірометри є автоматичними. Чутливими елементами, що сприймають променисту енергію, у цих приладах можуть служити *фотоелементи, фотомножники, фотоелементи опору і фотодіоди*. Вимірювання температури фотоелектричними пірометрами, як і оптичними візуальними, засновано на залежності спектральної яскравості тіла від його температури.

Фотоелектричні пірометри за принципом дії бувають двох типів. До першого типу відносять прилади, у яких сприймана приладом промениста енергія, потрапляючи на чутливий елемент, змінює його параметри (фотострум, опір). У приладах другого типу вимірювання променистої енергії здійснюється компенсаційним методом, тут чутливий елемент працює в режимі нуль-індикатора, порівнюючи інтенсивності випромінювання від вимірюваного тіла і стабільного джерела випромінювання - мініатюрної лампочки розжарювання.

**Пірометри сумарного випромінювання.** Вимірювання температури пірометрами сумарного випромінювання засновано на використанні теплового випромінювання нагрітих тіл. Теплові промені, які уловлюються пірометром, концентруються за допомогою збірної лінзи на термочутливому елементі, що складається з невеликої термобатарей. Променистий потік направляється лінзою на робочі кінці термобатарей, за ступенем нагрівання яких роблять висновок про температуру випромінювача. Вторинним приладом пірометра служить мілівольтметр або автоматичний потенціометр.

Пірометр сумарного випромінювання характеризується рядом переваг у порівнянні з візуальним, що полягають в об'єктивності методу вимірювання, відсутності стороннього джерела живлення і можливості застосування дистанційної передачі показань на вторинні прилади, але уступає йому, як було зазначено раніше, у точності вимірювання.

Шкала пірометра, градуйована в  $^{\circ}\text{C}$  радіаційної температури, має нерівномірні розподіли, сильно стислі на початку і розтягнуті наприкінці.

Для вимірювання температур вище  $3000^{\circ}\text{C}$  методи пірометрії є практично єдиними, тому що вони безконтактні, тобто не вимагають безпосереднього контакту датчика приладу з об'єктом вимірювання. Теоретично верхня межа вимірювання температури пірометрами випромінювання необмежена.

## 4.9 Тепловізори

**Тепловізор** (інфрачервона камера) - оптико-електронний вимірювальний прилад, що працює в інфрачервоній області електромагнітного спектра, який "переводить" у видиму область спектра власне теплове випромінювання людей або техніки.

Тепловізор може використатися як прилад для безконтактного вимірювання температури об'єктів і температурних полів.

Сучасний тепловізор має досить просту будову: об'єктив, тепловізійну матрицю (чутливий елемент) і електронний блок обробки сигналу. Матриця - це ґратка мініатюрних детекторів, що сприймає інфрачервоні сигнали і перетворює їх в електричні імпульси, які після посилення перетворюються у відеосигнал. Розмір фотоелектричних матриць у середньому  $640 \times 480$  пікселів.

Тепловізори поділяють на дві категорії: з *охолоджуваною* і *неохолоджуваною матрицею*.

Охолоджувані – самі чутливі, дорогі і масивні, адже для охолодження використовуються криогенні технології, що дозволяють охолоджувати матрицю до температур мінус  $170-210^{\circ}\text{C}$ . Ціна і маса визначають і сферу застосування таких приладів. Мінуси камер з охолоджуваними матрицями - велике енергоспоживання і короткий термін служби криогенної системи, дорожнеча, а також те, що охолодження матриці до робочої температури займає звичайно кілька хвилин.

Неохолоджувані - на порядок дешевше, компактніше, але

ціна за це - знижена чутливість. Перевага їх у тім, що вони починають працювати відразу після включення, мають довгий термін служби і низьке споживання енергії. Простота і відносна дешевизна неохолоджуваних тепловізорів зробили їх масовими.

На рис.4.7 наведена узагальнена функціональна схема тепловізора з фокальною ІК-матрицею.

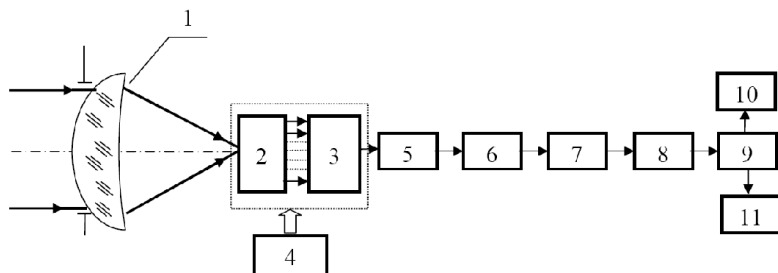


Рисунок 4.7 - Узагальнена функціональна схема тепловізора з фокальною матрицею: 1 - оптична система; 2 - фокальна матриця із підсилювачами; 3 - мультиплексор; 4 - система охолодження; 5 - коректор неоднорідності характеристик чутливих елементів; 6 - аналого-цифровий перетворювач; 7 - цифровий коректор неоднорідності; 8 - коректор; 9 - формувач зображення; 10 - дисплей; 11 - цифровий вихід

#### 4.9.1 Принцип дії тепловізорів

Принцип роботи тепловізорів полягає в тому, що вони "бачать" не відбите інфрачервоне випромінювання, а власне випромінювання цілей і предметів. Кожне нагріте тіло випускає теплове випромінювання, інтенсивність і спектр якого залежать від властивостей тіла і його температури. Принцип дії тепловізора такий: інфрачервоне (теплове) випромінювання від досліджуваного об'єкта через оптичну систему передається на приймач, що являє собою неохолоджувану матрицю термодетекторів. Далі отриманий відеосигнал за допомогою електронного блока вимірювання, реєстрації і математичної обробки оцифровується і відображається на екрані комп'ютера або дисплеї тепловізора. Тобто фізична картина фотоефекта така: ІК-фотони, потрапляючи на поверхню вузькозонного

напівпровідника (*HgCdTe*, *InSb*), переводять носіїв заряду зі зв'язаного стану у вільний. Їх кількість пропорційна інтенсивності теплового випромінювання об'єкта. Матриця фотоелектричних детекторів, яка встановлена у тепловізорі, обов'язково повинна охолоджуватися, інакше власні теплові коливання ґратки напівпровідника викликають настільки інтенсивне вивільнення носіїв заряду, що на його фоні генерація носіїв ІК-випромінювання стає просто непомітною.

Тепловізор зовсім безпечний для людини. Цей прилад тільки приймає інфрачервоне випромінювання, нічого при цьому не випромінюючи на відміну від рентгена, що шкодить здоров'ю людини.

Тепловізори поставляються із програмним забезпеченням, необхідним для зберігання і аналізу інфрачервоних зображень і для створення професійних звітів. Програмне забезпечення тепловізора дозволяє налаштовувати і змінювати основні параметри збереженого зображення (компенсацію відбитого тепла, колірну палітру і т.д.). Це не тільки підвищує зручність і вірогідність обстеження тепловізором, але і відкидає необхідність повторного сканування встаткування.

Головна проблема тепловізорів - об'єктиви. Для виготовлення тепловізійних об'єктивів застосовується дуже дорогий матеріал - чистий германій. Зараз вартість об'єктива становить приблизно 45% вартості всього приладу, ще 45% - матриця.

#### **4.9.2 Области застосування тепловізорів**

Тепловізори застосовуються для контролю стану об'єктів і технологічних процесів у різних галузях промисловості, а також при проведенні наукових досліджень.

Області застосування тепловізорів: енергетика і енергоаудит, машинобудування, будівництво, нафтова і хімічна промисловість, транспорт і т.д. За допомогою тепловізора можна оперативно визначити передумови виникнення і наявність дефектів у нафто- і газопроводах, у теплотрасах, водопроводах і електричних з'єднаннях. Своєчасне виявлення за допомогою тепловізора температурних аномалій, що відбивають невидимі

небезпечні процеси навколо нас, дозволить вжити заходів для усунення причин можливих аварій.

### Приклади використання тепловізорів

#### 1. Тепловізор у будівництві будинків і котеджів:

- виявлення порушення теплоізоляції та інших тепловтрат;
- виявлення дефектів стиків панелей, тріщин, погіршення теплоізоляційних властивостей, ділянок інфільтрації води, обривів арматур, ділянок більш пізнього ремонту.

#### 2. Тепловізор в енергетиці:

- тепловізійний моніторинг ліній електропередач;
- виявлення дефектних контактів з'єднань комутаційних апаратів;
- виявлення засмічення теплообмінників на теплотрасах;
- виявлення проблем у теплоізоляції турбін, паро- і трубопроводів.

#### 3. Тепловізор в енергозбереженні:

- енергоаудит;
- визначення теплоізоляційних властивостей матеріалів;
- діагностика огорожуючих конструкцій;
- виявлення тепловтрат у внутрішніх приміщеннях і зовні будинків і споруджень.

#### 4. Тепловізор у хімічній промисловості:

- контроль температури продукту;
- перевірка герметичності та ізоляції ємностей для зберігання різних рідин і газів.

#### 5 Тепловізор в авіакосмічній і військовій техніці:

- системи самонаведення на ціль, системи оповіщення про ранній запуск ракет;
- тепла розвідка (виявлення живої сили і техніки);
- авіакосмічна зйомка тепловізором. Спостереження за елементами земного ландшафту, підземними теплотрасами, льодовиками, ділянками геотермальної діяльності, лісами і водними просторами, фауною і т.ін.

#### 6 Тепловізори в медицині:

- моніторинг запальних процесів, локальних пухлин, порушення кровообігу, процесів загоєння ран, травм і т.ін.

#### **4.9.3 Методика роботи з тепловізором**

Тепловізійні вимірювання зовнішніх поверхонь проводять у зимовий або перехідний період відповідно до норм, установлених державою. У випадку відсутності проектно-технічної документації, вони проводяться при температурному перепаді повітря у внутрішніх і зовнішніх приміщеннях не менше 15<sup>0</sup>С.

Температурні поля поверхонь виходять у вигляді кольорового зображення, де градації кольору відповідають градації температур. Найясніші ділянки означають місця самих більших тепловтрат.

Вимірювання повинні проводитися за відсутності атмосферних опадів, туману, задимленості повітря, інею на поверхнях, прямого сонячного опромінення поверхонь. Тобто обстежувані поверхні не повинні перебувати в зоні певного сонячного опромінення за 12 годин до початку вимірювань.

Місця установлення тепловізійної камери вибирають таким чином, щоб поверхня об'єкта вимірювань перебувала в прямій видимості під кутом спостереження. На плані забудови відзначаються обрані точки зйомки. Об'єкт фотографують, реєструють порушення і дефекти зовнішніх поверхонь огорожуваних конструкцій, а також ділянки, що вимагають уточнення даних.

Одночасно з тепловізійною зйомкою зовнішніх поверхонь будинку відбувається реєстрація метеоумов - вимірюється температура повітря, напрямок і швидкість вітру. Вимірювання проводять також і у внутрішніх приміщеннях - температуру, рухливість і вологість повітря.

Коли вимірювання проведені, отримані термограми обробляються і порівнюються з розрахунковими даними.

Звичайно досвідчений фахівець за результатами може визначити місця зі зниженою теплоізоляцією, з різними дефектами через неякісний монтаж конструкцій або неправильні рішення. Тепловізійна зйомка останнім часом стає просто обов'язковим елементом в енергоаудиті.

## 5 ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ

### 5.1 Загальна класифікація

**Тиском** називають відношення сили, що діє перпендикулярно до поверхні, до площі цієї поверхні. Тиск - одна з основних величин, що визначає термодинамічний стан речовин. Тиском багато в чому визначається хід технологічного процесу, стан технологічних апаратів і режими їх функціонування. Із завданням вимірювання тиску доводиться стикатися при вимірюваннях певних технологічних параметрів, наприклад витрати газу або пари, при термодинамічних параметрах, що змінюються, рівня рідини та ін.

Розрізняють такі основні види тиску: *атмосферний, абсолютний, надлишковий і вакуум (розрідження)*.

**Атмосферний (барометричний) тиск ( $P_{\phi}$ )** — тиск, створюваний масою повітряного стовпа земної атмосфери. Він має змінне значення, що залежить від висоти місцевості над рівнем моря, географічної широти і метеорологічних умов (погоди).

**Надлишковий тиск ( $P$ )** — різниця між абсолютним і барометричним тисками.

**Абсолютний тиск ( $P_a$ )**— тиск, відлічений від абсолютного нуля. За початок відліку абсолютного тиску беруть тиск усередині посудини, з якої повністю видалене повітря. Абсолютний тиск  $P_a$  середовища може бути більшим або меншим атмосферного. У першому випадку абсолютний тиск дорівнює сумі атмосферного і надлишкового тисків:

$$P_a = P_{\phi} + P. \quad (5.1)$$

У другому випадку абсолютний тиск менше атмосферного на величину вакуумметричного тиску, тобто

$$P_a = P_{\phi} - P. \quad (5.2)$$

В окремому випадку, коли  $P$  або  $P_e$  дорівнює нулю, абсолютний тиск дорівнює атмосферному.

**Вакуум** (розрідження) ( $P_e$ ) — різниця між барометричним і абсолютним тисками. Іноді вакуумметричний тиск виражають у вигляді відносної величини  $V$  у відсотках атмосферного тиску:

$$V = \frac{P_e}{P_0} \cdot 100. \quad (5.3)$$

**Статичний тиск** ( $P_c$ ) потоку може бути надлишковим або вакуумметричним, в окремому випадку він може дорівнювати атмосферному.

**Повний тиск середовища, що рухається** ( $P_{\Pi}$ ), складається зі статичного ( $P_c$ ) і динамічного ( $P_D$ ) тисків:

$$P_{\Pi} = P_c + P_D. \quad (5.4)$$

**Динамічний тиск** ( $P_D$ ) (Па), що залежить від швидкості потоку (швидкісний напір) для рідини, а також для газу і пари при помірних швидкостях, визначається за формулою

$$P_D = \frac{v^2 \cdot \rho}{2}, \quad (5.5)$$

де  $v$  — швидкість руху речовини, м/с;

$\rho$  — густина речовини, кг/м<sup>3</sup>.

У Міжнародній системі одиниць (SI) за одиницю тиску береться *паскаль* (Па) — тиск, створюваний силою в 1 *ньютон* (Н), рівномірно розподіленої по поверхні площею 1 м<sup>2</sup> і спрямованої нормально до неї.

Несистемна одиниця тиску (1 кгс/см<sup>2</sup>) дорівнює тиску на площу 1 см<sup>2</sup> сили в 1 кгс, де 1 кгс — сила, що надає масі в 1 кг нормального прискорення вільного падіння в 9,81 м/с<sup>2</sup>. Одиниця тиску системи МКГСС (метр, кілограм-сила, секунда) дорівнює 1 кгс/м<sup>2</sup>.

У рідинних приладах з водяним або ртутним заповненням скляних трубок вимірювання тиску виконується в міліметрах водяного або ртутного стовпа (мм вод.ст. або мм рт.ст.). Значення, вимірювані в цих одиницях, звичайно відносять до нормального прискорення вільного падіння тіл і нормальної температури, що дорівнює для води 4°C і ртуті 0°C. Незавжди встановити, що тиск в 1 мм.вод.ст. дорівнює тиску в 1 кгс/м<sup>2</sup>.

Несистемна одиниця тиску — бар дорівнює тиску 1·10<sup>5</sup> Па, або 1,01972 кгс/см<sup>2</sup>. Ця одиниця зручна у тому відношенні, що числа, що виражають тиск у барах і кгс/см<sup>2</sup>, відрізняються між собою не більше ніж на 2%.

Через те, що зазначені одиниці — кгс/см<sup>2</sup>, мм вод.ст., мм рт.ст. і бар — у цей час дістали поширення, вони тимчасово допускаються до застосування поряд з одиницями системи SI.

В англійських мірах одиницею тиску є 1 англ. фунт-сила (4,45 Н) на 1 кв. дюйм, дорівнює 6890 Па (0,645·10<sup>-3</sup> м<sup>2</sup>).

Співвідношення між одиницею тиску системи SI і колишніми наведені в табл.5.1.

Таблиця 5.1 - Співвідношення між одиницями тиску

| Одиниця тиску       | Па                   | Бар                    | Кгс/см <sup>2</sup>   | Кгс/м <sup>2</sup>   | Мм рт. ст.             |
|---------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|------------------------|
| Па                  | -                    | 1×10 <sup>-5</sup>     | 10,2×10 <sup>-6</sup> | 0,102                | 7,5×10 <sup>-3</sup>   |
| Бар                 | 1×10 <sup>5</sup>    | -                      | 1,02                  | 10,2×10 <sup>3</sup> | 750                    |
| Кгс/см <sup>2</sup> | 98,1×10 <sup>3</sup> | 0,981                  | -                     | 1×10 <sup>4</sup>    | 735,6                  |
| Кгс/м <sup>2</sup>  | 9,81                 | 98,1×10 <sup>-6</sup>  | 1,10 <sup>-4</sup>    | -                    | 73,56×10 <sup>-3</sup> |
| Мм рт. ст.          | 133,3                | 1,333×10 <sup>-3</sup> | 1,36×10 <sup>-3</sup> | 13,6                 | -                      |

Для наближеного перелічення тиску, вираженого в кгс/см<sup>2</sup> і кгс/м<sup>2</sup>, і у тиску, вираженому відповідно в МПа і Па, необхідно в першому випадку числове значення зменшити в 10 разів, а в другому — збільшити в 10 разів. Так, наприклад, тиск у 100 кгс/см<sup>2</sup> відповідає тиску в 10 МПа, а тиск у 100 кгс/м<sup>2</sup> — тиску в 1000 Па.

Засоби вимірювання тиску класифікують за видом вимірювального тиску і принципом дії. За видом вимірювального тиску засоби вимірювання поділяють на такі:

- **манометри надлишкового тиску** — для вимірювання надлишкового тиску;

- **манометри абсолютного тиску** — для вимірювання тиску, відліченого від абсолютного нуля;

- **барометри** — для вимірювання атмосферного тиску. Барометри поділяють на *ртутні* і *мембранні*;

- **вакуумметри** — для вимірювання вакууму (розрідження);

- **мановакуумметри** — для вимірювання надлишкового тиску і вакууму (розрідження).

Крім перелічених засобів вимірювання у практиці вимірювання дістали поширення:

- **напороміри** — манометри малих надлишкових тисків (до 40 кПа);

- **тягоміри** — вакуумметри з верхньою межею вимірювання не більше 40 кПа;

- **тягонапороміри** — мановакуумметри з діапазоном вимірювання від плюс 20 до мінус 20 кПа;

- **вакуумметри залишкового тиску** — вакуумметри, призначені для вимірювання глибокого вакууму або залишкового тиску, тобто абсолютних тисків менше 200 Па;

**диференційні манометри** — прилади вимірювання різниці тисків.

За принципом дії засоби вимірювання тиску поділяють на такі: **рідинні, поршневі, деформаційні (пружинні), іонізаційні, теплові, електричні**. Така кваліфікація не є вичерпною і може бути доповнена засобами вимірювання, заснованими на інших фізичних явищах.

Найбільша кількість приладів, які застосовуються для вимірювання тиску, є манометрами надлишкового тиску. У цей час існує великий парк приладів вимірювання тиску, що дозволяє здійснювати вимірювання тиску в діапазоні  $10^{-12}$ - $10^{11}$  Па.

Далі розглянуті прилади вимірювання тиску, широко застосовувані як робочі при технологічних вимірюваннях.

## 5.2. Рідинні засоби вимірювання тиску

Для рідинних манометрів величиною, що характеризує вимірювальний тиск, є видима висота стовпа (рівня) рідини, який зрівноважується, у скляній вимірювальній трубці. До приладів цього виду відносять *однотрубні* (чашкові) і *двотрубні* (U-подібні) манометри. До рідинних засобів вимірювання тиску (різниці тисків і розрідження) з гідростатичним зрівноважуванням, які ще застосовуються у технологічних процесах, відносять *поплавкові* і *дзвонові дифманометри*.

Рідинні манометри є досить простими і точними приладами, що служать для визначення невеликих надлишкових тисків, що не перевищують 0,2 МПа. Вони широко застосовуються при дослідницьких і налагоджувальних роботах. У цих манометрах за врівноважувальну рідину використовують ртуть, дистильовану воду або етиловий спирт.

У цей час номенклатура рідинних засобів вимірювання тиску з гідростатичним зрівноважуванням істотно обмежена. Здебільшого вони замінені більш удосконаленими деформаційними засобами вимірювання.

**Двотрубні манометри.** Найбільш часто застосовується двотрубний манометр (рис.5.1), що складається зі скляних вимірювальних трубок 1 і 2, з'єднаних унизу і закріплених на вертикальній підставці 3. Між трубками поміщена міліметрова шкала 4 з нульовою поділкою посередині.

Вимірювальні трубки заповнюються зрівноважувальною рідиною до нульової позначки шкали. Трубка 1 з'єднана

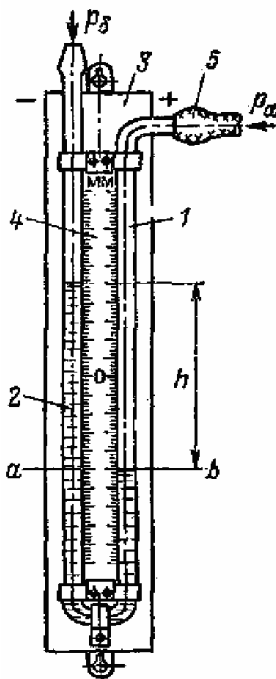


Рисунок 5.1 -  
Двотрубний манометр

гумовою трубкою 5 з вимірювальним середовищем, яке перебуває під абсолютним тиском  $P_a$ , а трубка 2 — з атмосферою, яка має тиск  $P_b$ . Як правило, трубка 1, зв'язана із середовищем більшого тиску, позначається знаком “+” (плюсова трубка), а трубка 2, зв'язана із середовищем меншого тиску, позначається знаком “—” (мінусова трубка).

При включенні манометра вимірювальний тиск зрівноважується стовпом рідини висотою  $h$ , який відлічується за шкалою приладу. Внаслідок того, що рівень рідини в трубці 1 знизиться, а в трубці 2 відповідно зросте, то загальна висота стовпа  $h$  буде дорівнювати сумі поділок, позначених на шкалі вище і нижче нульової поділки.

Якщо зрівноважувальною рідиною є вода або спирт, то відлік показань проводиться по нижній межі меніска, а якщо ртуть - то по верхній. Тоді тиск визначається як

$$P = h \cdot \rho \cdot g. \quad (5.6)$$

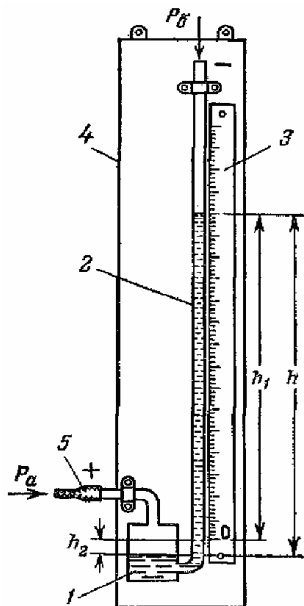


Рисунок 5.2 - Однотрубний манометр

Таким чином, при вимірюванні надлишкового тиску висота стовпа зрівноважувальної рідини не залежить від площі отвору вимірювальних трубок.

З рівняння (5.6) бачимо, що висоти трубок манометра, обмежуються міцністю і зручністю відліку і не повинні перевищувати 1,5 м, при вимірюванні надлишкових тисків 0,015-0,2 МПа варто застосовувати зрівноважувальну рідину з великою густиною (ртуть), а при більш низьких тисках - з малою (вода, спирт та ін.).

Випускаються двотрубні манометри з діапазоном показань 100, 160, 250, 400, 600 і 1000 мм стовпа рідини.

При вимірюванні тиску двотрубним манометром становить незручність відлік рівнів рідини одночасно в обох вимірювальних трубках. При значних коливаннях вимірювального тиску це утрудняє точне визначення показань приладу. У таких випадках для зменшення коливань рівнів рідини застосовують місцеве звуження перетину сполучної лінії.

**Однотрубні манометри.** На рис.5.2 показана схема однотрубного манометра, що відрізняється від двотрубного тим, що замість другої вимірювальної трубки має широку посудину (чашку) 1. До нижньої частини посудини приєднана скляна вимірювальна трубка 2, поруч із якою закріплена міліметрова шкала 3. Прилад змонтований на вертикальній підставці 4. Посудина манометра контактує з вимірювальним середовищем за допомогою трубки 5. Вільний кінець вимірювальної трубки з'єднаний з атмосферою. Посудина і вимірювальна трубка заповнюються зрівноважувальною рідиною до нульової поділки шкали. У більшості випадків зниженням рівня рідини в посудині, тобто  $h_2$  (див. рис. 5.2), можна знехтувати і вважати  $h \approx h_1$ . Тоді

$$P = h_1 \cdot \rho \cdot g . \quad (5.7)$$

Похибка вимірювання однотрубним манометром вища, ніж двотрубним, зате більш зручним для першого є вимірювання рівня рідини в одній трубці.

**Мікроманометри.** Розглянуті вище рідинні манометри непридатні для вимірювання невеликих тисків, що дорівнюють одиницям або десяткам міліметрів висоти стовпа зрівноважувальної рідини тому що при цьому похибка стає досить значною. Так, наприклад, при вимірюванні стовпа висотою 10 мм і можливій помилці у відліку показань неозброєним оком в 1 мм відносна похибка становитиме 10%, що неприпустимо.

Для точних вимірювань невеликих тисків газу (повітря) набуває застосування широкий за інтервалом вимірювання рідинний мікроманометр із похилою трубкою.

Цей прилад (рис.5.3) має широку металеву посудину 1, яка з'єднана гнучкою трубкою з вимірювальною скляною трубкою 2, закріпленою на міліметровій шкалі 3. Посудина контактує з вимірювальним середовищем гумовою трубкою 4. Установлення рівня рідини на нульову поділку шкали проводиться гвинтом коректора 5, що переміщає в посудині поршень 6. За допомогою дугоподібної стійки 7 з отворами шкала з вимірювальною трубкою може бути закріплена під п'ятьома кутами нахилу до горизонталі. Прилад змонтований на трикутній плиті 8, обладнаний для правильного установлення двома гвинтовими ніжками 9 і двома взаємно перпендикулярними рівнями 10. Застосування похилої скляної трубки дозволяє, зменшивши кут  $\alpha$  при тій самій висоті стовпа рідини, збільшити його довжину, що підвищує точність відліку.

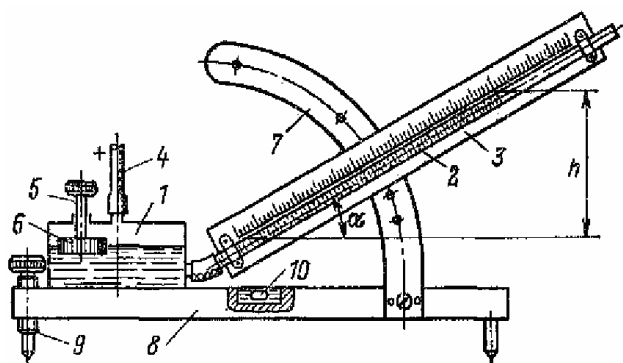


Рисунок 5.3 - Схема мікроманометра

Тиск  $P$  (Па) за допомогою мікроманометра визначається за формулою

$$P = 0,001 \cdot l \cdot \rho \cdot g \cdot \sin \alpha, \quad (5.8)$$

де  $l$  — довжина стовпа рідини, відлічуваної за шкалою приладу, мм.

Зрівноважувальною рідиною для мікроманометра служить етиловий спирт. Діапазон показань залежно від кута нахилу

трубки при нормальному прискоренні вільного падіння тіл ( $9,81 \text{ м/с}^2$ ) становить 600, 900, 1200, 1800 і 2400 Па. Клас точності мікроманометра 1. Прилад випускається на робочий тиск середовища 0,01 МПа.

**Установлення і виправлення до показань рідинних манометрів.** На точність вимірювання тиску за допомогою рідинних манометрів впливають правильність установлення приладу, відлік висоти стовпа і визначення густини зрівноважувальної рідини.

Щоб уникнути перекручування результатів вимірювання, рідинні манометри закріплюються у вертикальному положенні за рівнем в місцях, не підданих вібрації і нагріванню, і які перебувають поблизу місця відбору тиску.

Якщо манометр установлений вище або нижче місця відбору тиску, а сполучна лінія і простір над рідиною в плюсовій вимірювальній трубці або посудині заповнені іншою, більш легкою рідиною (наприклад, водою при вимірюванні ртутним манометром тиску води або пари), необхідно до показань приладу вводити виправлення, що враховує тиск, який створюється стовпом цієї рідини.

Абсолютна похибка вимірювання, що залежить від правильності відліку висоти стовпа рідини неозброєним оком, звичайно становить  $\pm(0,5-1)$  мм. Застосування оптичних пристосувань (візуалізаторів) помітно зменшує цю похибку.

### 5.3 Деформаційні прилади для вимірювання тиску

Висока точність, простота конструкції, надійність і низька вартість є основними факторами, що обумовлюють велике поширення деформаційних приладів для вимірювання тиску в промисловості і наукових дослідженнях.

Досить поширеним видом деформаційних приладів, які використовуються для визначення надлишкового тиску, є *трубчасто-пружинні манометри*, що відіграють винятково важливу роль у технічних вимірюваннях. Ці манометри виготовляються з одновитковою трубчастою пружиною, що

являє собою вигнуту по колу металеву пружну трубку овального перетину. Під дією вимірювального тиску усередині трубки вона частково розкручується внаслідок деформації її перетину, що прагне набрати форми кола.

*Вимірювальні прилади з одновитковою трубчастою пружиною* призначені для вимірювання надлишкового тиску і розрідження неагресивних рідких і газоподібних середовищ. Прилади цього типу випускаються тільки показуючими у звичайному, вібростійкому, антикорозійному, вогне- і вибухозахищеному виконаннях.

Однією з основних характеристик деформаційного чутливого елемента зазначених приладів є залежність переміщення  $\delta$  робочої точки від діючого тиску  $P$  або різниці тисків. Ця характеристика  $\delta=f(P)$ , яка називається статичною, може бути лінійною або нелінійною. Хід статичної характеристики в межах пружної деформації неоднозначний і утворює петлю гістерезису. Значення гістерезису визначає систематичну похибку деформаційних засобів вимірювання.

Крім відзначеного недоліку, чутливі елементи мають властивість пружної післядії, суть якого полягає в тому, що після припинення зміни тиску деформація продовжує зменшуватися, асимптотично наближаючись до межового значення. Поряд із пружною післядією при експлуатації чутливих елементів має місце залишкова деформація, яка полягає в тому, що після зняття тиску чутливий елемент не повертається у вихідне положення. При багаторазових вимірюваннях залишкова деформація накопичується, що приводить до значних похибок.

Викладені особливості деформаційних чутливих елементів пояснюють той факт, що для технічних манометрів верхня межа вимірювання обмежується половиною тиску, що відповідає межі пропорційності статичної характеристики, у той час як для зразкових приладів межа вимірювання обмежується четвертою частиною тиску, що відповідає межі пропорційності.

Для передачі переміщення вільного кінця деформаційного чутливого елемента до показчика манометра приєднані секторні

і важільні передавальні механізми. За допомогою передавального механізму переміщення вільного кінця трубчастої пружини в кілька градусів або міліметрів перетвориться в кутове переміщення стрілки на  $270\text{—}300^\circ$ .

Важільний передавальний механізм застосовується в тих випадках, коли від манометра не потрібна висока точність вимірювання і він зазнає вібрації. Секторний передавальний механізм застосовується в зразкових приладах і в приладах, де за умовами експлуатації виключена вібрація.

На рис.5.4 показана конструкція манометра із секторним передавальним механізмом. Прилад складається із трубчастої пружини 5, один кінець якої впаяний в отвір утримувача 1, а інший (рухливий) кінець наглухо запаяний і несе на собі наконечник 10. Порожнина пружини пов'язана з вимірювальним середовищем через канал в утримувачі 1, об'єднаному з радіальним штуцером 14. Утримувач приладу оснащений платою 2, на якій

монтується трибно-секторний механізм. Останній включає зубчасте колесо (трибку) 8 і зубчастий сектор 9. Для виключення люфту в передавальному механізмі

використовується спіральна пружина 7, один кінець якої за допомогою штифта кріпиться на осі трибки, а інший - до колонки 6, укріпленої на платі 2. До хвостовика сектора 9 за допомогою гвинта 12 кріпиться тяга 11. За

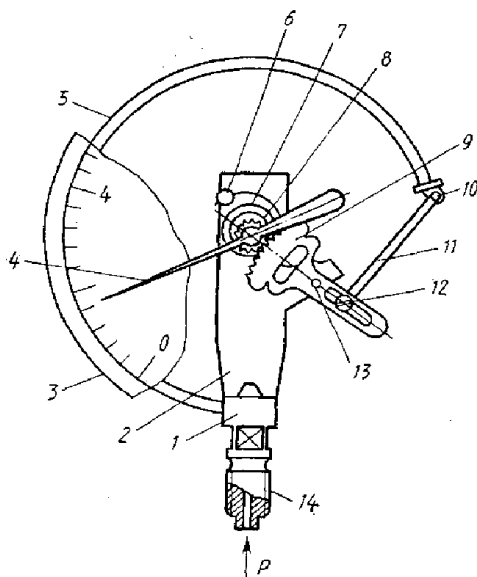


Рисунок 5.4 - Схема манометра з одновитковою трубчастою пружиною

допомогою тяги переміщення вільного кінця пружини передається зубчастому сектору, що має вісь обертання 13. Обертання зубчастого сектора передається на трибку, на осі якої насаджена стрілка 4 для відліку показань на шкалі 3. Шкала манометра рівномірна, тому що переміщення вільного кінця пружини пропорційне вимірювальному тиску. Регулювання ходу стрілки проводиться гвинтом 12.

Вакуумметр із одновитковою трубчастою пружиною конструктивно ідентичний розглянутому манометру. Відмінність полягає тільки у шкалі і напрямку переміщення стрілки. У вакуумметрах переміщення стрілки може відбуватися як за годинниковою стрілкою, так і проти. Відмінною рисою мановакуумметра є шкала, що виконується з нулем у середній частині. Шкала, розміщена ліворуч від нуля, служить для вимірювання вакууму, а шкала, розміщена праворуч, - для вимірювання надлишкового тиску.

Діапазони вимірювання манометрів від 0-0,1 МПа до 0-103 МПа; вакуумметрів— від -0,1 до 0 МПа. Класи точності приладів: 0,4(0,5); 0,6; 1,0; 1,5(1,6); 2,5; 4,0.

Поряд з розглянутими приладами, оснащеними однаковою трубчастою пружиною, у практиці вимірювання тиску і розрідження дістали великого поширення манометри і вакуумметри, оснащеними електроконтактними сигналізовальними пристроями. Ці засоби вимірювання тиску мають назву **електроконтактних**. Клас точності електроконтактних манометрів і вакуумметрів 1,5. Похибка спрацьованості сигналізовального пристрою  $\pm 2,5\%$ .

Загальний вигляд манометра-сигналізатора електроконтактного типу показаний на рис.5.5. Прилад містить вказівну стрілку 1, сигнальні (мінімального і максимального тиску) стрілки 2 і 3, які установлюються на задані значення тисків за допомогою ключа, і коробку 4 із затискачами для приєднання до приладу ланцюга сигналізації. Механізм манометра вмонтований у корпус 5. Прилад контактує з вимірювальним середовищем через штуцер 6.

При досягненні кожного із заданих граничних тисків контакт, пов'язаний із вказівною стрілкою, стикається з контактом, розміщеним на відповідній сигнальній стрілці, і замикає ланцюг сигналізації. Зазначені манометри придатні для вимірювання плавно змінюючих тисків. Контактний пристрій їх живиться від мережі постійного або змінного струму напругою 220 В. Розривна потужність контактів 10 В·А.

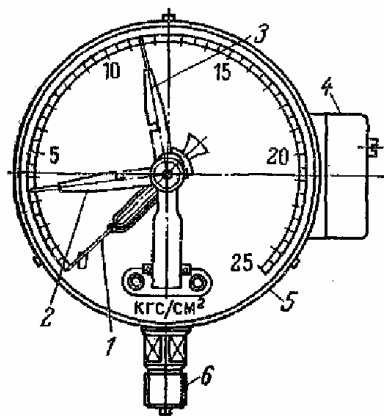


Рисунок 5.5 - Манометр-сигналізатор

Вимірювальні прилади із *сильфонним чутливим елементом*. Прилади цього типу призначені для вимірювання надлишкового тиску, розрідження і різниці тисків. Їх виконують показуючими і самописними. Схема самописного сильфонного манометра показана на рис.5.6. Вимірювальний тиск через

штуцер 11 подається в камеру 10, де розміщений деформаційний чутливий елемент — сильфон 9. Для збільшення твердості сильфона всередині нього розміщена гвинтова пружина 8. Під дією тиску сильфон деформується, і дно його піднімає шток 7, жорстко з'єднаний із двоплечим важелем 6, останній через систему важелів 5, 4, 3 повертає вісь 12 і укріплений на ній П-подібний важіль 2. До П-подібного важеля

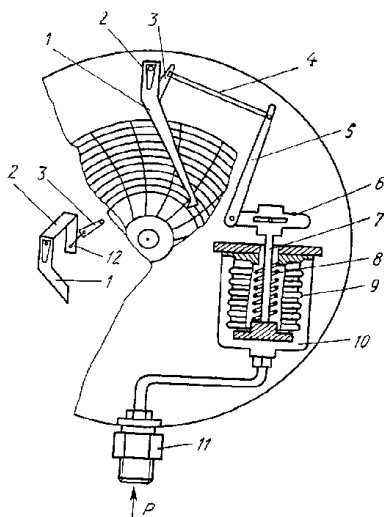


Рисунок 5.6 - Схема самописного сильфонного манометра

прикріплена стрілка 1 з пером. Запис вимірювального тиску виконується на дисковій діаграмі, привід якої здійснюється за допомогою синхронного двигуна або годинникового механізму. Верхня межа вимірювання сильфонних приладів обмежена тисками 0,025-0,4 МПа. Класи точності сильфонних манометрів надлишкового тиску, вакуумметрів і мановакуумметрів 1,5; 2,5.

Для вимірювання різниці тисків і витрати рідких і газоподібних середовищ широкого застосування набули *сильфонні дифманометри*. Граничні номінальні перепади тисків становлять 0,0063-0,25 МПа. Граничний припустимий робочий надлишковий тиск 6,3, 16 і 32 МПа. Класи точності сильфонних показуючих і самописних дифманометрів 1,0 і 1,5.

Зразкові манометри типу МО (рис.5.7) застосовуються для перевірки промислових манометрів, а також для виконання точного вимірювання тиску в лабораторних установках. Прилади мають трубчасту пружину і зубчато-секторний передавальний механізм, розміщені в металевому корпусі діаметром 160 або 250 мм. У зразкових манометрах застосовується пружина високої якості і ретельно виконаний передавальний механізм. Прилади випускаються з кінцевим значенням шкали 1-600 кгс/см<sup>2</sup>. Шкала має 100 умовних поділок із цифровими поділками через кожні 5 поділок. Для переведення умовних поділок у кгс/см<sup>2</sup> зразкові манометри забезпечуються перевідною таблицею або графіком. Кінцеве значення тиску зазначається на циферблаті приладу. Клас точності манометрів діаметром 250 мм — 0,16 і 0,25, а діаметром 160 мм — 0,4. Користування приладами допускається при температурі навколишнього повітря 10-35°C і відносної вологості до 80%.

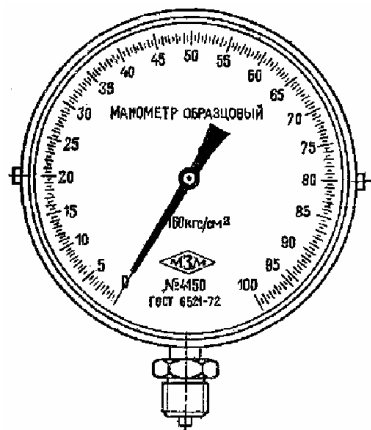


Рисунок 5.7 - Зразковий манометр типу МО

#### *Вимірювальні прилади з мембранним чутливим елементом.*

Ці прилади призначені для вимірювання атмосферного і надлишкового тисків і розрідження. Через малі зусилля, що розвиваються деформаційним чутливим елементом, мембранні прилади випускаються в основному показуючими. Принцип дії приладів полягає в перетворенні вимірювального тиску або розрідження в переміщення твердого центра мембранного чутливого елемента, що за допомогою передатного трибко-секторного механізму перетворюється в обертний рух покажчика. Максимальний діапазон вимірювання мембранних манометрів 0-2,5 МПа, вакуумметрів — від -0,1 до 0 МПа. Класи точності приладів 1,5 і 2,5. Крім розглянутих приладів, випускаються мембранні тягоміри, напороміри і тягонапороміри класів точності 1,5; 2,5.

#### **5.4 Установлення і обслуговування деформаційних трубчасто-пружинних манометрів**

При виборі манометра керуються насамперед необхідною точністю показань з огляду на особливості приладу і умови вимірювання. Виходячи з надійності роботи манометра, кінцеве значення шкали вибирається з таким розрахунком, щоб воно перевищувало вимірювальну величину при постійному тиску або плавно змінюючому тиску в 1,5 раза, а при змінному - в 2 рази. В обох випадках мінімальний вимірювальний тиск не повинен бути меншим  $1/3$  кінцевого значення шкали.

Показання трубчасто-пружинного манометра залежать від температури чутливого елемента, тому установлення приладу виконується таким чином, щоб по можливості виключити вплив на нього температури вимірювального і навколишнього середовища. Температура повітря, що оточує прилад, не повинна перевищувати  $40^{\circ}\text{C}$ , тому манометри не можна встановлювати біля сильно нагрітих поверхонь. При установленні манометра безпосередньо в місцях вимірювання тиску пари або гарячої води для захисту приладу від надмірного нагрівання на сполучній лінії перед ним установлюється

кільцева або U-подібна сифонна трубка, що утворить гідравлічний затвор з остиглої рідини.

Для установалення манометра при робочому тиску середовища до 2,5 МПа застосовується триходовий пробковий кран, а вище — триходовий вентиль. Іноді в сполучній лінії розміщуються два вентилі: один для відключення приладу, а інший — для з'єднання його з атмосферою. Загальний вигляд установки показуючого манометра на паропроводі високого тиску наведений на рис.5.8. Манометр 1 угвинчується штуцером у триходовий вентиль 2, з'єднаний з кільцевою сифонною трубкою 3, яка приварена до стінки труби 4. Права частина вентиля служить для включення манометра, а ліва — для продувки сифонної трубки, висота до якої береться не менше 350 мм.

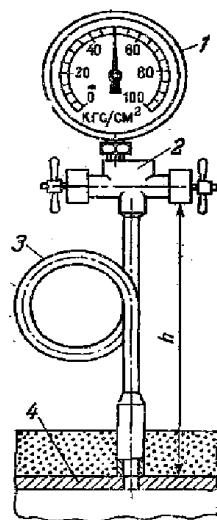


Рисунок 5.8 -  
Установлення манометра

У випадку застосування триходового крана манометр може бути з'єднаний з вимірювальним середовищем, а для відключення приладу або перевірки нульової поділки шкали - з атмосферою. За допомогою цього ж крана здійснюється періодична продувка сполучної лінії. Напрямок каналів у пробці крана зазначено на торці рукоятки рисками.

Деформаційні манометри повинні встановлюватися в місцях, що не зазнають вібрації і поштовхів, що шкодить роботі і стану приладів. Самописні манометри встановлюються строго вертикально.

З міркувань обмеження запізнювання показань довжина сполучної лінії до манометра звичайно не перевищує 50 м. Внутрішній діаметр мідної або сталеві трубки сполучної лінії вибирається в межах 3-15 мм залежно від її довжини. Сполучна лінія повинна бути щільною і прокладатися за найкоротшою відстанню з нахилом 0,1 до встановлюваного манометра вище

місця відбору тиску при вимірюванні тиску газу і нижче — при вимірюванні тиску рідини і пари. Якщо зазначене установлення манометрів неможливе, то при вимірюванні тиску газу в нижніх точках сполучної лінії застосовуються відстійні посудини, а при вимірюванні тиску рідини і пари у верхніх точках — газозбірники. Вигини лінії повинні бути плавними. Температура середовища в лінії перед манометром повинна дорівнювати температурі навколишнього повітря. Як ущільнювальні прокладки при установленні манометрів служать пароніт (до 6 МПа) і відпалена червона мідь (понад 6 МПа).

## **5.5 Правила вимірювання трубчасто-пружинними манометрами**

Вмикання і вимикання манометрів варто робити повільно, щоб уникнути пошкодження передавального механізму. Для запобігання у чутливому елементі появи залишкової деформації не можна допускати перевищення вимірювальним тиском кінцевого значення шкали.

Вимірювання швидко змінного тиску, наприклад після насосів, компресорів і т.п. спричиняє сильне зношування передавального механізму манометрів і утрудняє правильний відлік показань, тому для зменшення коливань вказівної стрілки в сполучній лінії встановлюють заспокійливі бачки або частково прикривають триходовий кран або вентиль.

Залежно від необхідної точності вимірювання до показань деформаційних манометрів вводяться в загальному випадку такі поправки:

- *основна* – визначається за паспортом манометра;
- *на розміщення манометра щодо місця відбору тиску* (якщо сполучна лінія заповнена рідиною) - залежить від висоти стовпа рідини в сполучній лінії і якщо буде потреба, вводиться так само, як і при вимірюванні тиску рідинними манометрами;
- *на температуру приладу* - збільшення температури манометра вище нормальної змінює його показання убік завищення вимірювального тиску. Для точного визначення

виправлення на температуру приладу необхідно знати його температурний коефіцієнт, значення якого для різних типів манометрів коливається в широких межах. Приблизно можна взяти, що додаткова похибка трубчасто-пружинного манометра становить  $\pm 0,4\%$  при відхиленні температури навколишнього повітря на кожні  $\pm 10^\circ\text{C}$  від значення  $20 \pm 5^\circ\text{C}$  у діапазоні температур  $0-60^\circ\text{C}$ .

## **5.6 Деформаційні вимірювальні перетворювачі тиску прямого перетворення**

Вимірювальні перетворювачі тиску, які випускаються у даний час, засновані на методі прямого перетворення, розрізняються як видом деформаційного чутливого елемента, так і способом перетворення його переміщення або зусилля, яке розвивається ним, у сигнал вимірювальної інформації. Для перетворення переміщення чутливого елемента в сигнали вимірювальної інформації широко застосовуються **індуктивні, диференціально-трансформаторні, ємнісні, тензорезисторні** і інші перетворювальні елементи. Перетворення зусилля, яке розвивається чутливим елементом, у сигнали вимірювальної інформації здійснюється п'єзоелектричними перетворювальними елементами.

*Індуктивні вимірювальні перетворювачі тиску.* На рис.5.9 а показана схема вимірювального перетворювача тиску, оснащеного перетворювальним елементом індуктивного типу. Мембрана 1, що сприймає тиск, є рухливим якорем електромагніта 2 з обмоткою 3. Під дією вимірювального тиску мембрана 1 переміщується, що викликає зміну електричного опору індуктивного перетворювального елемента.

*Диференціально-трансформаторні вимірювальні перетворювачі тиску.* Вимірювальний перетворювач тиску диференціально-трансформаторного (ДТ) типу (рис.5.9 б) містить деформаційний чутливий елемент 1 і ДТ-елемент 2. Перетворювальний елемент являє собою каркас із діелектрика, на якому розміщені катушка з первинною обмоткою 7, що

складається із двох секцій, відповідно намотаних, і двох секцій 4, вторинних обмоток 5, увімкнутих зустрічно. Усередині каналу катушки розміщене рухоме осердя 6 з магнітом'якого матеріалу, пов'язане із пружиною 1 тягою 3.

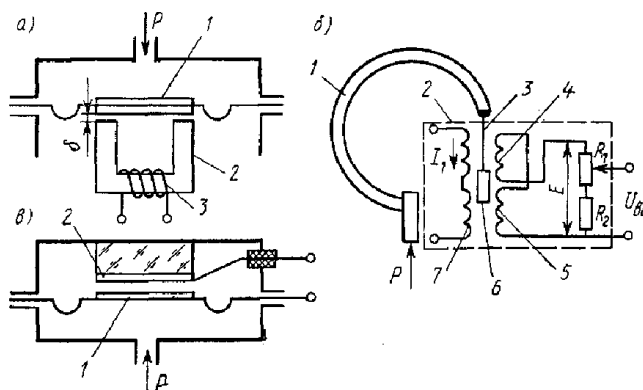


Рисунок 5.9 - Схеми вимірювальних перетворювачів тиску

Шляхом зміни регульованого опору  $R_1$  можна змінювати межі вимірювання на  $\pm 25\%$ . Формування вихідного сигналу ДТ-елемента здійснюється в такий спосіб. При проходженні по первинних обмотках струму виникають магнітні потоки, що пронизують обидві секції вторинної обмотки та індукують в них ЕРС. Значення цього ЕРС пов'язані із взаємними індуктивностями між первинною обмоткою і кожною із секцій вторинної обмотки.

Перетворення вимірювального тиску в електричні сигнали розглянутим перетворювачем тиску здійснюється шляхом перетворення тиску в деформацію (переміщення) чутливого елемента, жорстко з'єднаного із осердям 6, і наступного перетворення переміщення осердя 6 в електричний сигнал ДТ-елементом. Класи точності 1,0 і 1,5.

Для вимірювання перепаду тисків розроблені *мембранні дифманометри* із ДТ-елементом, що здійснює перетворення переміщення мембранного блока в сигнал вимірювальної інформації. Класи точності перетворювачів перепаду тиску 1,0 і 1,5. Час установлення вихідних сигналів не більше 1 с.

*Ємнісні вимірювальні перетворювачі тиску.* Схема вимірювального перетворювача тиску, оснащеного ємнісним перетворювальним елементом, наведена на рис.5.10 в. Вимірювальний тиск сприймається металевою мембраною 1, що є рухливим електродом ємнісного перетворювального елемента. Нерухомий електрод 2 ізолюється від корпусу за допомогою кварцових ізоляторів. За залежністю ємності  $C$  перетворювального елемента від переміщення  $\delta$  мембрани 1 вимірюється величина тиску.

*Тензорезисторні вимірювальні перетворювачі тиску.* Перетворювачі тиску цих видів являють собою деформаційний чутливий елемент, найчастіше мембрану, на яку наклеюються тензорезистори. В основу принципу роботи тензорезисторів покладено явище тензоефекту, суть якого полягає в зміні опору провідників і напівпровідників при їх деформації. Існує зв'язок між зміною опору тензорезистора і його деформацією.

Дістали поширення дрітотві і фольгові тензорезистори, що виготовляють із провідників типу манганіну, ніхрому, константану, а також напівпровідникові тензорезистори, що виготовляють із кремнію і германію *p*- і *n*-типів. Опір тензорезисторів, що виготовляють із провідників, становить 30-500 Ом, а опір напівпровідникових тензорезисторів від  $5 \cdot 10^{-2}$ -10 кОм.

Удосконалювання технології виготовлення напівпровідникових тензорезисторів створило можливість виготовляти тензорезистори безпосередньо на кристалічному елементі, виконаному із кремнію або сапфіру. Пружні елементи кристалічних матеріалів мають пружні властивості, що наближаються до ідеальних. Класи точності тензорезисторних вимірювальних перетворювачів надлишкового тиску, розрідження і різниці тисків 0,6; 1,0; 1,5. Діапазони вимірювання: надлишкового тиску — від  $0 \cdot 10^{-3}$  до 0-60 МПа; розрядження — від мінус 1-0 до мінус 10-0 кПа; абсолютного тиску — від 0-2,5 кПа до 0-2,5 МПа; різниці тисків — від 0-1 кПа до 0-2,5 МПа.

*П'єзоелектричні вимірювальні перетворювачі тиску.* В основу роботи цих перетворювачів покладене перетворення вимірювального тиску в зусилля за допомогою деформаційного чутливого елемента і наступного перетворення цього зусилля в сигнал вимірювальної інформації п'єзоелектричним перетворювальним елементом. Принцип дії п'єзоелектричного перетворювального елемента заснований на п'єзоелектричному ефекті, який спостерігається в ряді кристалів, таких, як кварц, турисин, титанат барію та ін. Суть п'єзоелектричного ефекту полягає в тому, що якщо кварцові пластини  $X$ -зрізу піддати стиску силою  $N$ , то на її поверхні виникнуть заряди різних знаків. Значення заряду  $Q$  пов'язане із силою  $N$  співвідношенням

$$Q = k \cdot N, \quad (5.9)$$

де  $k$  — п'єзоелектрична постійна, що не залежить від розміру пластини і визначається природою кристала.

На рис.5.10 показана схема п'єзоелектричного вимірювального перетворювача тиску. Вимірювальний тиск перетворюється мембраною 4 у зусилля, що викликає стиск стовпчиків кварцових пластин 2 діаметром 5 мм і товщиною 1 мм. Виникаючий електричний заряд  $Q$  через виводи 1 подається на електронний підсилювач 5, що має більший вхідний опір. Значення заряду пов'язане з вимірювальним тиском  $P$  залежністю

$$Q = k \cdot P \cdot F, \quad (5.10)$$

де  $F$  — ефективна площа мембрани.

Внаслідок того що частота власних коливань системи «мембрана — кварцові пластини» становить десятки кілогерців, то вимірювальні перетворювачі цього типу мають високі динамічні характеристики, що обумовило їх широке застосування при контролі тиску в системах з процесами, що мають швидкий перебіг.

Чутливість п'єзо-електричних вимірювальних перетворювачів тиску може бути підвищена шляхом застосування декількох, паралельно з'єднаних кварцових пластин, і збільшення ефективної площі мембрани.

Верхні межі вимірювання

п'єзоелектричних перетворювачів тиску із кварцовими чутливими елементами 2,5-100 МПа. Класи точності 1,5; 2,0. Через витікання заряду із кварцових пластин перетворювачі тисків цього типу не використовують для вимірювання статичних тисків.

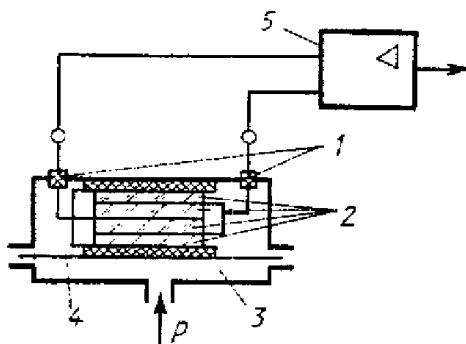


Рисунок 5.10 - Схема п'єзоелектричного вимірювального перетворювача тиску

## 6 ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ І КІЛЬКОСТІ РЕЧОВИНИ

### 6.1 Одиниці і методи вимірювання витрати і кількості речовини

Необхідність підвищення якості випускаючої продукції і ефективності автоматизованих систем керування технологічними процесами надає питанням точного вимірювання кількості і витрати різних речовин винятково важливого значення. До засобів, що вимірюють кількість і витрату речовин, ставляться високі вимоги щодо точності.

Різноманіття вимірювальних середовищ, що характеризуються різними фізико-хімічними властивостями, а також різні вимоги, пропоновані промисловістю до метрологічних характеристик і надійності вимірників витрати, привели до створення засобів вимірювання витрати, заснованих на різних принципах і методах вимірювання.

**Витрата речовини** – це кількість речовини, що проходить в одиницю часу по трубопроводу, каналу і т.п. Кількість і витрата речовини виражають в об'ємних або масових одиницях вимірювання. Об'ємними одиницями кількості звичайно служать літр (л) і кубічний метр (м<sup>3</sup>), а масовими — кілограм (кг) і тонна (т). Об'ємну кількість газу іноді для порівняння подають з наведеними до нормального стану — абсолютним тиском 101325 Па, температурою 20°C і відносною вологістю 0%.

Найпоширенішими одиницями об'ємної витрати є л/год, м<sup>3</sup>/с і м<sup>3</sup>/год, а масової — кг/с, кг/год и т/год.

Перехід від об'ємних одиниць витрати до масових і навпаки обчислюється за формулою

$$Q_m = Q_{об} \cdot \rho, \quad (6.1)$$

де  $Q_m$  — масова витрата речовини, кг/год;

$Q_{об}$  — об'ємна витрата речовини, м<sup>3</sup>/год;

$\rho$  — густина речовини, кг/м<sup>3</sup>.

Для зведення об'ємної витрати сухого газу  $Q_{об}$  у робочому стані до витрати  $Q'_{об}$  ( $\text{м}^3/\text{год}$ ) у нормальному стані є залежність

$$Q'_{об} = Q_{об} \frac{p \cdot T'}{p' \cdot T \cdot K}, \quad (6.2)$$

де  $p$  і  $p'$  - тиски газу в робочому і нормальному станах, Па;  
 $T$  і  $T'$  — температури газу в робочому і нормальному станах, К;

$K$  — коефіцієнт стиснення газу, що характеризує відхилення його властивостей від законів ідеального газу.

Прилади, що вимірюють витрату, називаються *витратомірами*. Залежно від виду вимірювальної речовини вони поділяються на витратоміри води, пари, газу та ін. Витратоміри бувають *показуючими* і *самописними*. Часто вони забезпечуються вбудованим рахунковим механізмом (інтегратором).

До приладів, що вимірюють кількість, відносять *лічильники* і *ваги*. За їх допомогою визначається кількість речовини, яка пройшла по тракту за відомий проміжок часу, для чого відраховують показання приладу на початку і в кінці періоду вимірювання і обчислюють різницю цих показань.

Для визначення витрати і кількості рідини, газу, пари і сипучих тіл найчастіше застосовуються такі основні методи вимірювання: *змінного перепаду тиску*, *швидкісне*, *об'ємне* і *вагове*. В окремих випадках використовуються й інші методи вимірювання.

**Метод змінного перепаду тиску**, що має велике практичне значення, ґрунтується на зміні статичного тиску середовища, що проходить через штучно звужений перетин трубопроводу.

**Швидкісний метод** — на визначенні середньої швидкості руху потоку.

**Об'ємний і ваговий методи** — на визначенні об'єму і маси речовини.

Перевагами перших двох методів вимірювання є порівняльна простота і компактність вимірювальних приладів, а останніх двох - більш висока точність вимірювання.

Відповідно до застосовуваних методів вимірювання витрати і кількості речовини вимірювальні прилади поділяються в основному на такі групи:

|  |   |
|--|---|
| <p><b>КОНТАКТНІ</b></p> <p><i>Статичні:</i></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Змінного перепаду тиску: <ul style="list-style-type: none"> <li>- діафрагми;</li> <li>- сопла;</li> <li>- сопла Вентурі;</li> <li>- труби Вентурі.</li> </ul> </li> <li>2. Трубки Піто.</li> <li>3. Щиткові.</li> <li>4. Вихрові.</li> </ol> <p><i>Динамічні:</i></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Об'ємної дії: <ul style="list-style-type: none"> <li>- кулачкові (шестеренні);</li> <li>- ротаційні;</li> <li>- поршневі;</li> <li>- мембранні.</li> </ul> </li> <li>2. Швидкісні: <ul style="list-style-type: none"> <li>- турбінні;</li> <li>- крильчасті.</li> </ul> </li> <li>3. Ротаметри</li> <li>4. Вібраційні</li> </ol> | <p><b>БЕЗКОНТАКТНІ</b></p> <p><i>Швидкісні:</i></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Теплові.</li> <li>2. Індукційні.</li> <li>3. З мітками.</li> <li>4. Ультразвукові: <ul style="list-style-type: none"> <li>- часоімпульсні;</li> <li>- частотно-імпульсні;</li> <li>- доплерівські;</li> <li>- фазові</li> </ul> </li> </ol> |
|--|---|

## 6.2 Витратоміри із звужуючим пристроєм

Принцип дії витратомірів із звужуючим пристроєм заснований на зміні потенційної енергії вимірювальної речовини при проходженні через штучно звужений перетин трубопроводу. Широке використання цього принципу пов'язане з рядом властивих йому переваг. До них відносять: простоту і

надійність, відсутність рухомих частин, легкість серійного виготовлення засобів вимірювання практично на будь-які тиски і температури вимірювального середовища, низьку вартість, можливість вимірювання практично будь-яких витрат і, що особливо істотно, можливість одержання градуированої характеристики витратомірів розрахунковим шляхом, тобто без використання дорогих метрологічних установок.

Витратомір складається із *звужуючого пристрою*, змонтованого в трубопроводі для створення місцевого стиску потоку (первинний перетворювач), *диференціального манометра*, призначеного для вимірювання різниці статичних тисків середовища, що має перебіг, до і після звужуючого пристрою (вторинний прилад), *і сполучних ліній* (двох трубок), що зв'язують між собою обидва прилади.

Звужуючий пристрій звичайно має круглий отвір, розміщений концентрично щодо стінок труби, діаметр якого менше внутрішнього діаметра трубопроводу.

Диференціальний манометр (дифманометр-витратомір) виконується показуючим або самописним і додатково може мати вбудований інтегратор. Шкала промислового дифманометра-витратоміра градується в об'ємних або масових одиницях витрати.

Витратомір із звужуючим пристроєм, що має електричну дистанційну передачу показань, містить, як правило, безшкальний дифманометр-витратомір (проміжний перетворювач) у комплекті з показуючим або самописним вторинним приладом.

Витратоміри із звужуючим пристроєм придатні для вимірювання речовини, що проходить по трубопроводу, за умови заповнення нею усього поперечного перерізу труби і встановленого у ній звужуючого пристрою.

При проходженні потоку через звужуючий пристрій відбувається зміна потенційної енергії речовини, частина якого внаслідок місцевого стиснення потоку і відповідного збільшення швидкості потоку перетворюється в кінетичну енергію. Зміна

потенційної енергії приводить до появи різниці статичних тисків (перепаду тиску), що визначається за допомогою дифманометра.

На рис.6.1 показана схема встановлення в трубопроводі найбільш простого звужуючого пристрою (діафрагми) у вигляді тонкого диска із круглим отвором посередині і зображенням характеру потоку. Там само показано розподіл статичного тиску  $P$  по довжині потоку  $l$ . Стиснення потоку починається перед діафрагмою і завдяки дії сил інерції досягає найбільшої величини на певній відстані за нею, після чого потік знову

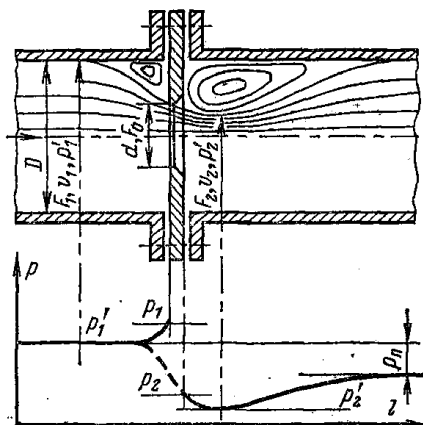


Рисунок 6.1 - Характер потоку при встановленні звужуючого пристрою

розширюється до повного перетину трубопроводу. Перед діафрагмою і за нею в кутах утворюються зони з вихровим рухом, причому зона вихрів після діафрагми більш значна, ніж до неї. Тиск потоку біля стінки трубопроводу (суцільна лінія) трохи зростає за рахунок підпору перед діафрагмою і знижується до мінімуму за діафрагмою в точці найбільшого звуження потоку, де перетин потоку менше, ніж отвір діафрагми. Далі, в міру розширення потоку, тиск біля стінки знову підвищується, але не досягає колишнього значення на величину  $P_n$  через наявність безповоротних втрат на завихрення, удар і тертя. Зміна тиску потоку по осі трубопроводу практично збігається зі зміною тиску біля його стінки, за винятком ділянки перед діафрагмою і безпосередньо в ній, де тиск потоку по осі труби знижується (пунктирна лінія). При проходженні вимірювального потоку через отвір звужуючого пристрою збільшується швидкість потоку в порівнянні з його швидкістю до звуження. Завдяки цьому тиск потоку на виході із звужуючого пристрою

зменшується, і на звужуючому пристрої створюється перепад тиску, вимірюваний дифманометром, який залежить від швидкості у звуженні або від витрати потоку.

Рівняння для масової  $G$  і об'ємної  $Q$  витрат нестисливої рідини

$$\begin{aligned} G &= \alpha \frac{\pi \cdot d^2}{4} \sqrt{2\rho(P_1 - P_2)}, \\ Q &= \alpha \frac{\pi \cdot d^2}{4} \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_1 - P_2)}. \end{aligned} \quad (6.3)$$

Якщо через звужуючий пристрій проходить стисливе середовище (газ або пара), то внаслідок зниження тиску збільшується її об'єм. Це приводить до того, що швидкість потоку зростає і стає більшою швидкість нестисливого середовища. У результаті на звужуючому пристрої збільшується перепад тиску. Врахування зазначеного явища виконується введенням у рівняння витрат (6.3) додаткового коефіцієнта  $\varepsilon < 1$ , що називається поправочним множником на розширення вимірювального середовища. Тоді рівняння для масової  $G$  і об'ємної  $Q$  витрат стисливого середовища записується у вигляді

$$\begin{aligned} G &= C \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot d^2 \cdot \sqrt{\rho \cdot (P_1 - P_2)}, \\ Q &= C \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot d^2 \cdot \sqrt{\frac{1}{\rho} \cdot (P_1 - P_2)}, \end{aligned} \quad (6.4)$$

де  $C = \frac{\pi}{4} \sqrt{2}$  - постійний коефіцієнт;

$\rho$  - густина середовища;

$d$  - діаметр отвору діафрагми;

$\alpha$  - коефіцієнт діафрагми (величина, яка тарується);

$P_1$  і  $P_2$  - відповідно тиск потоку перед діафрагмою і після неї.

Рівняння (6.3) і (6.4) є основними рівняннями витрати як для стисливих, так і нестисливих середовищ, при цьому для останніх  $\varepsilon = 1$ .

**Звужуючі пристрої.** Для вимірювання витрати середовища дістали поширення три види нормалізованих звужуючих пристрої: *витратомірна діафрагма* (рис.6.2 а), *витратомірне сопло* (рис.6.2 б), *сопло Вентурі* (рис.6.2 в) і *труби Вентурі* (рис.6.2 г), які мають посередині круглий отвір. Дослідним шляхом для цих звужуючих пристроїв знайдені точні значення коефіцієнта витрати  $\alpha$ , що дозволяє застосовувати їх без попереднього градирування. На рис.6.2 показані місця відбору тисків  $P_1$  і  $P_2$  від звужуючих пристроїв до дифманометра. Характерною рисою звужуючих пристроїв (рис.6.2 б, в, г) є менша, ніж для діафрагми, безповоротна втрата тиску.

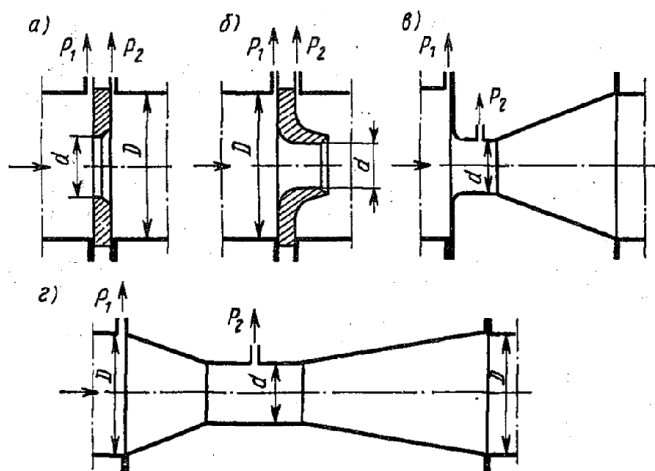


Рисунок 6.2 - Схеми стандартних звужуючих пристроїв

Втрата тиску при використанні діафрагми або сопла практично та сама. У соплах Вентурі втрата тиску значно менша, що фізично пояснюється наявністю дифузора на виході, завдяки якому йде відновлення потенційної енергії.

За способом відбору тиску до дифманометра витратомірні діафрагми і сопла поділяють на *камерні* і *безкамерні* (із точковим відбором). Більше удосконаленими з них є камерні пристрої.

На рис.6.3 показана схема установа на трубопроводі діафрагми, рис.6.3 а — камерного типу, а на рис.6.3 б —

безкамерного типу. У камерній діафрагмі тиски до дифманометра передаються за допомогою двох кільцевих зрівняльних камер, розміщених у її корпусі перед і за диском з отвором, з'єднаним з порожниною трубопроводу двома кільцевими щілинами або групою рівномірно розміщених по колу радіальних отворів (не менше чотирьох з кожного боку диска). Кільцева камера перед диском називається плюсовою, а за ним - мінусовою. Наявність у діафрагмі кільцевих камер дозволяє усереднити тиск по колу трубопроводу, що забезпечує більш точний вимір перепаду тиску.

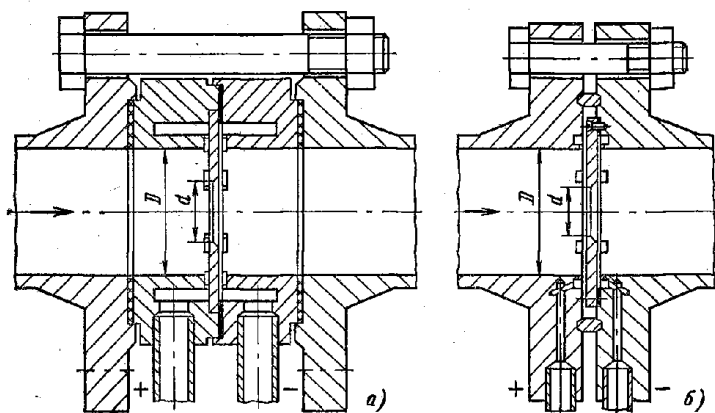


Рисунок 6.3 - Установлення діафрагм у трубопроводі:  
а – камерна; б - безкамерна

Відбір перепаду тиску в безкамерній діафрагмі виконується за допомогою двох окремих отворів у її корпусі або у фланцях трубопроводу перед і за диском. У цьому випадку вимірювальний перепад тиску є менш точним, ніж при кільцевих камерах.

Точність вимірювання витрати за допомогою діафрагм залежить від ступеня гостроти вхідної крайки отвору, що впливає на значення коефіцієнта витрати  $\alpha$ . Для виготовлення проточної частини діафрагм і сопел застосовуються матеріали, стійкі проти корозії та ерозії, тобто нержавіюча сталь, а в деяких випадках - латунь або бронза. За звужуючий пристрій найчастіше застосовується діафрагма. Сопло вибирається у

випадках, коли необхідно зменшити вплив корозії та ерозії звужуючого пристрою на результати вимірювання

Діафрагми і сопла більше вивчені і тому дають більш високу точність вимірювання, ніж сопла Вентурі. Основна похибка діафрагм і сопел становить  $\pm 0,6-2,5\%$ . Значно впливають на точність вимірювання умови монтажу звужуючих пристроїв у трубопроводах. При неправильному установленні похибка вимірювання значно зростає.

До і після звужуючого пристрою необхідно мати прямі заспокоювальні ділянки трубопроводу постійного діаметра, тому що різні місцеві опори (коліна, вентилі, засувки і т.п.) приводять до перекручування профілю швидкостей по перетину потоку і, отже, впливають на коефіцієнт витрати  $\alpha$ . Рекомендується зазначену арматуру по можливості розміщувати за звужуючим пристроєм.

**Установлення дифманометрів.** Дифманометри призначені для визначення перепаду тиску між двома точками вимірювання в рідкому, газовому або паровому середовищі. Особливо широкого застосування вони набули для вимірювання перепаду тиску у витратомірах із звужуючим пристроєм. Основна похибка двотрубних дифманометрів  $\pm 2$  мм висоти стовпа зрівноважувальної рідини.

Промислові дифманометри-витратоміри, які застосовуються в теплоенергетиці, звичайно є деформаційними приладами, що працюють у комплекті із звужуючим пристроєм при вимірюваннях витрати рідини, газу і пари. Механічні дифманометри-витратоміри можуть застосовуватися в тих випадках, коли відстань між звужуючим пристроєм і приладом не перевищує 50 м. При більш значних відстанях використовуються електричні дифманометри-витратоміри.

Механічні та електричні дифманометри і працюючі з ними в комплекті вторинні прилади встановлюються в місцях, що не зазнають вібрації і тряски, а також дії високої або низької температури і вологості навколишнього повітря. Вплив температури не повинен викликати в електричних дифманометрах надмірного нагрівання обмоток.

Щоб уникнути запізнювання показань, довжина сполучних ліній звичайно не перевищує 50 м, а внутрішній діаметр їх становить не менше 6 мм. Для вільного видалення зі сполучних трубок води (газові лінії) або повітря (водяні лінії) вони прокладаються вертикально або з нахилом не менше 0,1 убік продувних вентилів, газозбірників або відстійних посудин. Утворення в сполучних лініях повітряних пробок при вимірюванні витрати рідини або пари - при вимірюванні витрати газу (повітря) веде до перекручування результатів вимірювання. Рекомендується періодично продувати сполучні лінії.

Дифманометр 2 (рис.6.4) може бути встановлений вище або нижче звужуючого пристрою 1. При вимірюванні витрати рідини бажано установа його нижче звужуючого пристрою (рис.6.4 Ia) для того, щоб уникнути проникнення із трубопроводу повітря в сполучні лінії. Якщо ж дифманометр розміщується вище звужуючого пристрою, то у верхніх точках ліній установаються газозбірники із продувними вентилями (поз. 4, 5).

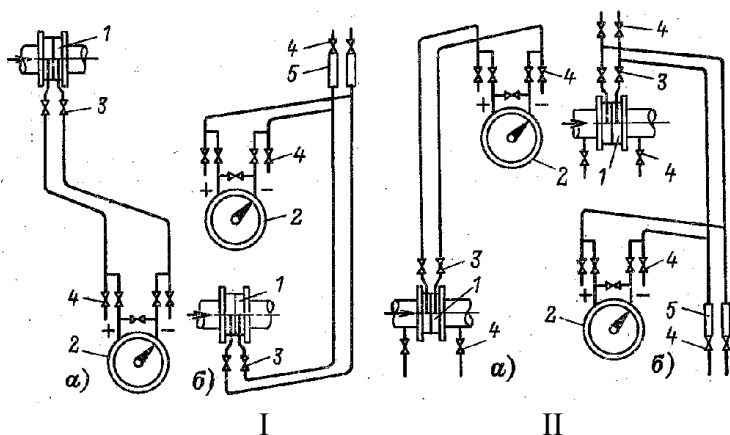


Рисунок 6.4 - Схема установа дифманометра у комплекті зі звужуючим пристроєм:

I – при вимірюванні витрати рідини; II – при вимірюванні витрати газу:  
а – нижче звужуючого пристрою; б – вище звужуючого пристрою

При вимірюванні витрати газу (повітря) дифманометр доцільно встановлювати вище звужуючого пристрою 1 (рис.6.4 Пб). У випадку зворотного розміщення в нижніх точках сполучних ліній містяться відстійні посудини для води 4, що утворюється під час конденсації пари.

При вимірюванні витрати пари більш бажаним є установлення дифманометра нижче звужуючого пристрою. У протилежному разі у верхніх точках ліній обов'язкове приєднання газозбірників. В обох випадках необхідно забезпечити сталість і однаковість рівнів конденсату в сполучних трубках для того, щоб тиски стовпів води на дифманометр взаємно врівноважувалися і не відбивалися на його показаннях.

### 6.3 Швидкісні витратоміри і лічильники

Швидкісний метод визначення витрати і кількості рідини і газу покладений в основу ряду витратомірів і лічильників, що мають досить простий пристрій і значний діапазон показань. Принцип дії цих приладів полягає у вимірюванні середньої швидкості потоку, пов'язаної з об'ємною витратою  $Q_{об}$  (м<sup>3</sup>/с) речовини залежністю

$$Q_{об} = v_{cp} \cdot F, \quad (6.5)$$

де  $v_{cp}$  — середня швидкість потоку, м/с;  
 $F$  — поперечний переріз потоку, м<sup>2</sup>.

За виконанням і призначенням швидкісні витратоміри і лічильники поділяються на *швидкісні витратоміри* і *лічильники рідини, напірні трубки* і *анемометри*.

**Швидкісні лічильники рідини** найчастіше застосовуються для вимірювання кількості води і тому називаються лічильниками води. Чутливим елементом їх є лопатева вертушка, що спричиняє в обертання потоком рідини. Вісь вертушки за допомогою передавального механізму

(редуктора), що зменшує частоту обертання, зв'язана з рахунковим пристроєм приладу. Таким чином, залежність витрати рідини, що протікає через швидкісний лічильник, визначається так:

$$Q_{об} = \frac{n \cdot F}{C}, \quad (6.6)$$

де  $n$  – частота обертання вертушки, об/хв ;  
 $C$  – постійний коефіцієнт.

З формули (6.6) бачимо, що частота обертання вертушки пропорційна витраті рідини, завдяки чому пристрій приладу значно спрощується. Однак при дуже малих витратах спостерігається відхилення від цієї залежності внаслідок перетікання рідини через зазори між вертушкою і корпусом приладу та тертя механізму в опорах. Формула (6.6) справедлива лише за відсутності завихрення рухомої рідини місцевими опорами (вигинами трубопроводу, вентилями та ін.) поблизу лічильника.

Характерною величиною швидкісних лічильників рідини (як і інших лічильників) є так званий поріг початку показань, що виражає найменшу витрату речовини, нижче якого лічильник перестає давати безперервні показання.

Швидкісні лічильники виготовляються для вимірювання кількості холодної (до температури 30°C) і гарячої (до 90°C) води при робочому тиску до 1 МПа. Вертушка їх виконується із пластмаси або металу.

Істотним недоліком швидкісних лічильників є залежність показань від в'язкості вимірювальної рідини.

За формою вертушки швидкісні лічильники поділяються на *крильчасті* і *турбінні*. Вертушка перших має прямі лопаті, спрямовані радіально до її осі, а других - вигнуті по гвинтовій лінії. Вісь вертушки в крильчастих лічильниках розміщена перпендикулярно до напрямку потоку, а в турбінних - паралельно йому.

Крильчасті лічильники призначені для установлення в горизонтальних трубопроводах і застосовуються при вимірюванні малих витрат води (до  $10 \text{ м}^3/\text{год}$ ). Турбінні лічильники можуть встановлюватися в будь-якому положенні і служать для вимірювання більших витрат води (до  $150 \text{ м}^3/\text{год}$ ).

На рис.6.5 наведена схема крильчастого лічильника води. У корпусі 1 із приєднувальними штуцерами виконані два тангенціально спрямованих канали для входу і виходу води, що надходить на крильчатку 2. У верхній частині корпусу розміщений стрілково-роликовий рахунковий показчик 3, відділений від крильчатки і редуктора 4 перегородкою із сальником 5 вихідної осі.

Крильчасті лічильники мають рахунковий пристрій із ціною поділки стрілкового показчика  $0,001$  і роликового -  $0,1 \text{ м}^3$ . Кінцеве показання рахункового пристрою  $1 \cdot 10^4 \text{ м}^3$  води. Лічильники встановлюються в трубопроводі відповідно до нанесеної на корпусі стрілки, що показує напрямок потоку рідини.

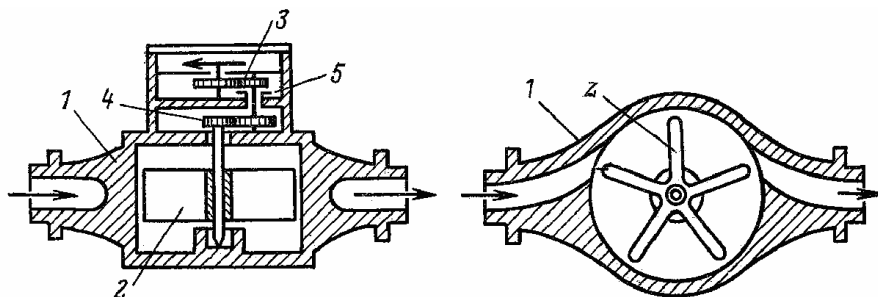


Рисунок 6.5 - Схема крильчастого лічильника води

**Турбінні лічильники** води мають лопатеві вертушки у вигляді багатоходового гвинта з великим кроком. Частота обертання цієї вертушки пропорційна швидкості потоку рідини і обернено пропорційна кроку лопаті. У цьому випадку рівняння (6.6) набирає вигляду

$$Q_{об} = \frac{n \cdot F \cdot l}{K}, \quad (6.7)$$

де  $l$  — крок лопаті вертушки, м;  
 $K$  — постійний коефіцієнт.

Схема швидкісного лічильника з аксіальною турбіною показана на рис.6.6. Усередині корпусу розміщена горизонтально уздовж напрямку вимірювального потоку рідини турбіна 6, виконана у вигляді багатозахідного гвинта. Перед турбіною установлений пристрій випрямлення потоку 1, призначений для згладжування потоку на вході і виключення завихрення. Обертання турбіни через черв'ячну пару 5 і передавальний механізм 2, розміщений у камері 4, передається через сальник рахунковому пристрою 3. Для регулювання швидкості обертання турбіни у процесі тарування лічильника передбачено регулювальний пристрій 7, що дозволяє повертати одну з радіальних перегородок пристрою випрямлення щодо напрямку потоку.

Звичайно діаметр умовного проходу турбінного лічильника вибирається меншим, ніж діаметр трубопроводу, що вимагає застосування при установленні лічильника перехідних конічних патрубків. Гідравлічний опір лічильників при номінальній витраті становить 2000-2500 Па.

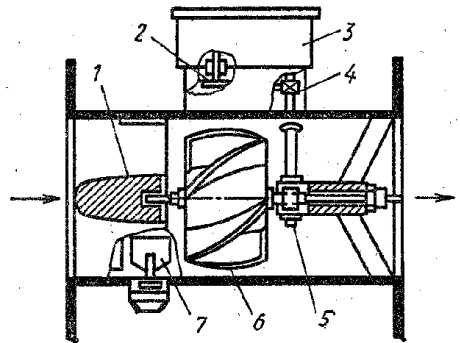


Рисунок 6.6 - Схема швидкісного лічильника з аксіальною турбіною

Турбінні лічильники з рахунковим пристроєм для приладів з діаметром умовного проходу 50 і 80 мм має ціну поділки стрілкового показчика 0,01; роликового — 1 і кінцеве показання  $1 \cdot 10^5 \text{ м}^3$ , а для приладів із проходом 100 і 150 мм відповідно 0,1; 10 і  $1 \cdot 10^6 \text{ м}^3$ .

Установлення турбінних лічильників найчастіше виконується в горизонтальних трубопроводах, хоча при висхідному потоці допускається установлення під кутом і вертикально. Для заспокоєння потоку довжина прямої ділянки трубопроводу перед лічильником вибирається такою, що дрівнює  $10D_y$ , і після нього  $5D_y$  (де  $D_y$  — умовний діаметр трубопроводу).

Основна похибка швидкісних лічильників у діапазоні від найменшої витрати до 10-12% від найбільшої становить  $\pm 5\%$  кількості пропущеної води. На всьому іншому діапазоні основна похибка дорівнює  $\pm 2\%$ . Похибка приладів визначається шляхом порівняння цих показань із об'ємом води, що надійшла через лічильник у мірний бак установки. При розбіжностях показань величини у бік збільшення виконується регулювання приладу шляхом зміни положення лопаті регулятора.

## 6.4 Анеометри

Для визначення швидкості потоку газу (повітря), особливо при малих її значеннях, коли через невеликий динамічний тиск вимірювання напірними трубками не забезпечує необхідної точності, набули застосування порівняно прості і чутливі прилади - анеометри, які придатні для вимірювання газових потоків, що перебувають під невеликим надлишковим тиском.

За допомогою анеометрів знаходиться швидкість газу в точці розміщення приладу, а за значенням середньої швидкості потоку можна зробити висновок про витрату вимірювального середовища. Анеометри застосовуються для визначення продуктивності повітродувних і повітровідвідних пристроїв, зокрема вентиляційних, а також дістали великого поширення при метеорологічних вимірюваннях. Класифікуються анеометри за двома типами: *механічні* та *електронні*.

**Механічний анеометр.** Чутливим елементом анеометра є алюмінієва вертушка з декількома радіально розміщеними лопатями, вісь якої зв'язана механічно із рахунковим пристроєм. У газовому потоці вертушка починає

обертатися зі швидкістю, пропорційною швидкості потоку, завдяки тиску, що подається газом на її лопаті.

Найбільше часто застосовується крильчастий анемометр, придатний для вимірювання швидкості потоку в межах 0,1-10 м/с. Цей прилад (рис.6.7) являє собою металеве кільце 1, усередині якого на горизонтальній осі закріплена крильчатка 2 з лопатями, що розміщені на спицях під  $45^\circ$  до площини, перпендикулярної до осі крильчатки. При вимірюванні анемометр розміщується так, щоб вісь крильчатки була паралельна напрямку потоку, що проходить через кільце. За допомогою черв'ячної пари і осі 3 обертання крильчатки передається рахунковому пристрою 4, закріпленому на зовнішній бічній стороні кільця.

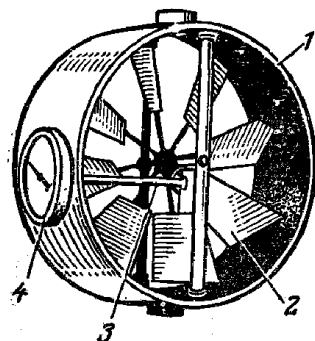


Рисунок 6.7 -  
Крильчастий анемометр

Рахунковий пристрій приладу показує кількість поділок, відлічених за шкалою 4, що умикається і вимикається одночасно з початком і кінцем роботи анемометра. На підставі середньої частоти обертання лопатів, одержуваної шляхом розподілу показань анемометра на час його роботи, обчислюється дійсна швидкість вимірювального потоку за паспортом, що додається до приладу.

У випадку вимірювання витрати газу в круглому трубопроводі діаметр останнього повинен дорівнювати не менше ніж шести діаметрам кільця анемометра. Анемометри непридатні для вимірювання швидкості різко пульсуючого потоку. Тривалість окремого вимірювання становить 1,5-2 хв. У кожному новому положенні приладу виконується декілька відрахувань показань рахункового пристрою і секундоміра, за яким потім визначається середня швидкість.

Відхилення площини обертання лопатей крильчатки від напрямку потоку в межах до  $\pm 10^\circ$  дає незначне зменшення показань анемометра (не більше 1%). Подальше збільшення кута

відхилення приводить до різкого зростання похибки вимірювання.

Крім підсумовуючих, застосовуються також показуючі анемометри з насадженим на вісь вертушки ротором мініатюрного генератора змінного струму. Залежно від частоти її обертання змінюється вироблювана генератором напруга, що вимірюється мілівольтметром, градуйованим у м/с.

## 6.5 Об'ємні лічильники

Принцип дії об'ємних лічильників ґрунтується на відмірюванні певного об'єму речовини, який проходить через прилад, і підсумовуванні результатів цього вимірювання. До таких пристроїв відносять: *мірні баки, об'ємні лічильники*.

**Мірний бак** є найбільш простим і точним вимірювальним пристроєм, застосовуваним для визначення кількості рідини при перевірці витратомірів і лічильників, а також при випробуваннях відповідних установок.

Схема мірних баків показана на рис.6.8. Пристрій складається зі спарених мірних баків 1 і 2 прямокутного, постійного по висоті перетину (іноді застосовуються два окремих циліндричних або прямокутних баки) і збірного бака 3. У середині мірних баків розміщені заспокоювачі 4 і 5 у вигляді патрубків з більшою кількістю отворів у стінках. Обидва мірних баки забезпечені вказівними скляними трубками 6 і 7, поруч із якими встановлені циферблати 8 і 9 з міліметровими шкалами. Вимірювана рідина, що надходить по трубопроводу 10, направляється по черзі в кожен з мірних баків за допомогою перекидного пристрою 11. Для

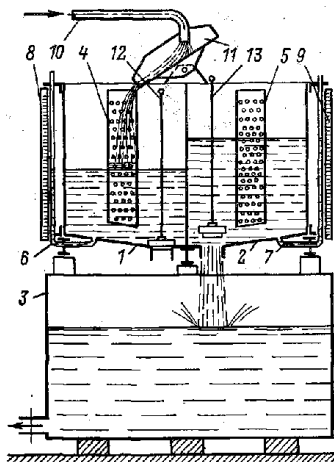


Рисунок 6.8 - Мірний бак

зливу рідини з мірних баків у збирач служать зливальні патрубки із запірними клапанами 12 і 13. Кожен мірний бак попередньо градирується, тобто визначається залежність між висотою рівня рідини у вказівному склі і внутрішньому об'ємі бака.

**Об'ємні лічильники** мають мірні камери зі стінками, що переміщуються і які витискують вимірювальний об'єм рідини, звільняючи камеру для наступної порції. До об'ємних лічильників зазначеного типу відносять: *однопоршневі, багатопоршневі, кільцеві, з овальними шестернями, ротаційні, сухі газові, мокрі газові і дискові.*

**Лічильники з овальними шестернями** застосовуються для вимірювання кількості рідини в широкому діапазоні в'язкості (до  $300 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ). Дія їх (рис.6.9) ґрунтується на відмірюванні (витисненні) певних обсягів рідини, які утворюються між стінками вимірювальної камери 1 і овальними шестернями 2 і 3, при обертанні останніх під впливом руху вимірювальної рідини. Овальні шестерні, що перебувають між собою в безперервному зачепленні, при обертанні обкатують одна одну. Залежно від положення шестерень кожна з них по черзі є ведучою і веденою. Розмір зазорів між шестернями і стінками вимірювальної камери не перевищує 0,04-0,06 мм, внаслідок чого похибка вимірювання через перетікання через них рідини невелика. Кількість рідини, що пройшла через лічильник, розраховується за кількістю обертів однієї з його шестерень, зв'язаної з рахунковим стрілково-роликковим показчиком. У підсумку за один оберт через лічильник проходить об'єм рідини, що дорівнює чотирьом об'ємам мірних камер, які перекачують рідину. Вісь однієї із шестерень обертає рахунковий механізм, розміщений поза

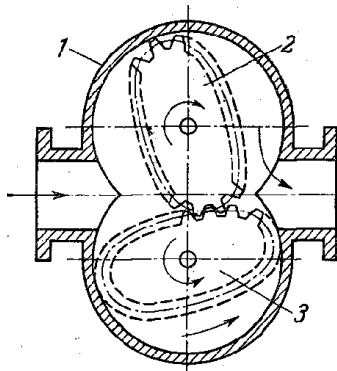


Рисунок 6.9 - Схема лічильника рідини з овальними шестернями

корпусом приладу. Лічильники рідини з овальними шестернями призначені для установлення в горизонтальних трубопроводах, причому осі обертання шестерень розміщуються горизонтально, а круговий циферблат - вертикально нульовою оцінкою шкали вгорі (на рис.6.9 не показаний).

Випускаються лічильники рідини з овальними шестернями різних типів, призначених для вимірювання кількості рідкого палива (бензину, керосину, дизельного палива та ін.). У цих лічильниках зв'язок між овальною шестірнею і рахунковим показчиком здійснюється за допомогою осі, що виходить із вимірювальної камери через сальник, або за допомогою магнітної муфти.

Межі зміни в'язкості вимірювального середовища  $0,7 \cdot 10^{-3}$  —  $60 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>/с. Гідрравлічний опір лічильників при найбільшій витраті 0,05 МПа. Клас точності приладів 0,5. Перевірка лічильників рідини з овальними шестернями проводиться за допомогою мірних баків на спеціальних дослідних установках.

**Ротаційні лічильники газу** в основному застосовуються для вимірювання кількості горючих газів, принцип дії яких той самий, що і лічильників рідини з овальними шестернями. Ротаційний лічильник (рис.6.10) містить вимірювальну камеру 1, у якій розміщені широкі обертові лопаті 2 і 3 у формі вісімки, які приводяться у рух різницею тисків газу, що проходить через лічильник. Прилад має рахунковий пристрій з роликівим показчиком, з'єднаний з однією з лопатів за допомогою магнітної муфти або за допомогою вихідної осі, пропущеної через сальник. Для контролю за роботою лічильника в нього вбудований водяний дифманометр, що вимірює перепад тиску газу в приладі (рахунковий пристрій і дифманометр на рис.6.10 не показані).

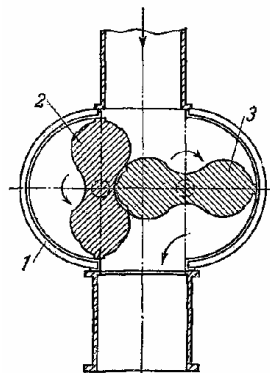


Рисунок 6.10 - Схема ротаційного лічильника

Установлення ротаційних лічильників виконується на

вертикальних ділянках трубопроводів зі спадним потоком газу. У вхідному патрубку лічильника є сітчастий фільтр для очищення газу від механічних домішок.

Прилади розраховані на робочий тиск газу 0,1 МПа і температуру 0-50°C. Гідравлічний опір їх при номінальній витраті 300 Па. Основна похибка лічильників при витраті 10-20% номінального  $\pm 2\%$  і вище -  $\pm(1-1,5)\%$ . Лічильники допускають роботу при найбільшій витраті газу протягом 6 годин на добу.

## 6.6 Витратоміри обтікання (ротаметри)

Витратоміри обтікання відносяться до великої групи витратомірів, що називаються також *витратомірами постійного перепаду тиску*, або *ротаметрами*. У цих витратомірах обтічне тіло (поплавець, поршень, поворотний клапан, пластинка, кулька та ін.) сприймає з боку набіжного потоку силовий вплив, який при зростанні витрати збільшується і переміщає обтічне тіло, у результаті чого сила, яка переміщає, зменшується і знову врівноважується протидіючою силою. Протидіючою силою є вага обтічного тіла при русі потоку вертикально знизу нагору або сила протидіючої пружини у випадку довільного напрямку потоку. Вихідним сигналом розглянутих перетворювачів витрати служить переміщення обтічного тіла. На рис.6.11 наведені принципові схеми перетворювальних елементів витратомірів обтікання, що дістали найбільшого поширення.

Згідно зі схемою рис.6.11 *а* в кінчній трубці 1 розміщений поплавець 2, при підніманні якого нагору під дією потоку збільшується площа прохідного кільця між поплавцем і стінкою кінчної трубки, що приводить до зменшення сили, створюваної потоком, яка діє на поплавець. Речовина, протікаючи через прорізи, надає поплавцю обертання, і він центрується в середині потоку. При рівновазі сил, які діють на поплавець, він установлюється на висоті, що відповідає вимірюваному значенню витрати. Аналогічно збільшується кільцевий перетин

між конічним клапаном 2 і циліндричним сідлом 1 (рис.6.11 б). На схемі рис.6.11 в при підніманні поршня 1 збільшується площа вихідного бічного отвору 3 у стінці циліндра 2.

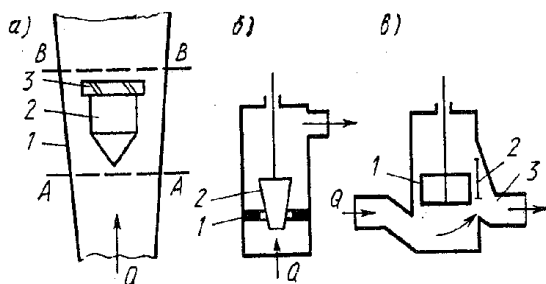


Рисунок 6.11 - Схеми витратомірів обтікання

Витратоміри обтікання, які застосовуються для вимірювання витрати рідин і газів, мають кілька різновидів. Найпоширеніші з них наведені на рис.6.12.

У ротаметрах зі скляною конічною трубкою 1 (рис.6.12 а), призначених для вимірювання газів або прозорих рідин, шкала 4 нанесена безпосередньо на зовнішній поверхні скла. Показником служить верхня горизонтальна площина обертового поплавця 2. На нижньому патрубку є сідло, на яке опускається поплавець при нульовій витраті речовини. На верхньому патрубку є обмежник ходу поплавця 3.

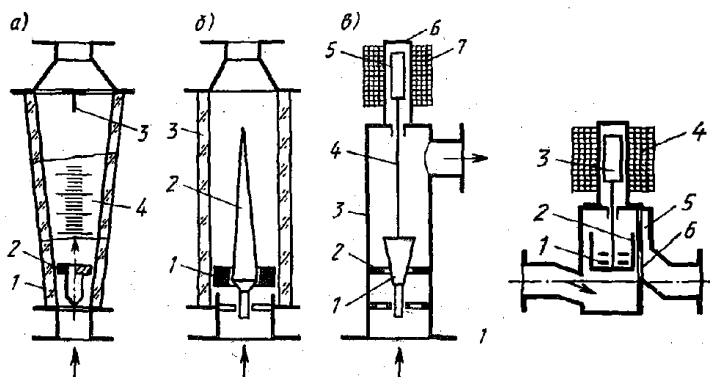


Рисунок 6.12 - Конструктивні схеми ротаметрів

Для вимірювання витрати непрозорих рідин (рис.6.12 б) застосовують циліндричну скляну трубку 3 і циліндричний поплавць 1 з отвором посередині, через який проходить нерухомий стрижень 2 конічного перетину. При переміщенні уздовж трубки 1 поплавець одночасно обертається, а кільцевий змінний отвір для потоку створюється між поплавцем і стрижнем 2. Ротаметри зі скляними трубками виготовляють на максимальний тиск 0,6 МПа.

Для вимірювання витрати газів і рідин на технологічних потоках застосовуються ротаметри, забезпечені передавальними перетворювальними елементами з електричним (рис.6.12 в) або пневматичним вихідним сигналом.

Ротаметр, показаний на рис.6.12 в, складається з металевого корпусу 3, усередині якого при зміні витрати переміщається обтічне тіло — клапан конічного профілю 1. Між робочою поверхнею клапана 1 і кільцевою діафрагмою 2 створюється змінний прохідний отвір. Із клапаном 1 за допомогою штока 4 зв'язане осердя 5 диференціально-трансформаторного перетворювального елемента 7, котушка якого намотана на трубку 6 з немагнітної сталі. Клас точності цих ротаметрів у комплекті із вторинним приладом - 2,5.

У поршневому витратомірі постійного перепаду тиску (рис.6.12 в) маса поршня 2 з вантажами 1 і штока із осердям 3 зрівноважується перепадом тиску до і після вихідного прямокутного отвору 6 у бічній стінці циліндра. Передавальний перетворювач тут виконаний у вигляді осердя 3 з м'якої сталі, що переміщається усередині немагнітної трубки, на якій встановлена індукційна котушка 4. Чим більша витрата речовини, тим вище піднімається поршень і відкривається прохідний перетин у бічній стінці. Тиск за отвором 6 через канал 5 передається у верхню частину поршня. Таким чином, перепад тиску на отворі і на поршні той самий. Цей перепад створює підйомну силу поршня, що зрівноважується вагою рухомої системи. Змінюючи вагу рухомої системи за допомогою змінних вантажів 1, змінюють межу вимірювання витратоміра.

## 6.7 Електромагнітні (індукційні) витратоміри

Розглянуті вище методи вимірювання витрати і кількості речовини характеризуються тим, що чутливий елемент приладу перебуває безпосередньо у вимірювальному середовищі, тобто зазнає механічного і хімічного її впливу і спричиняє втрату тиску потоку. Безперервна дія вимірювального середовища на чутливий елемент із часом негативно впливає на точність, надійність і термін служби приладу.

Для вимірювання витрати хімічно агресивних (кислоти, луги), абразивних (пульпи) та інших рідин, які пошкоджують матеріал дотичних до них частин витратоміра, описані вище методи і прилади взагалі непридатні.

Існує ряд приладів для вимірювання витрати рідини, чутливий елемент яких не має безпосереднього з нею контакту, що дозволяє застосовувати їх при агресивних середовищах. До таких приладів відносять електромагнітні (індукційні) витратоміри.

Електромагнітні витратоміри застосовуються для вимірювання витрати електропровідних рідин. Застосовуються для вимірювання в трубопроводах об'ємної витрати водопровідної води, різних розчинів (солей, кислот), пульп, розплавлених металів та інших електропровідних рідин, електрична провідність яких повинна бути не менше електропровідності водопровідної води. Дія їх ґрунтується на тому принципі, що при проходженні в трубопроводі електропровідної рідини поперек силових ліній магнітного поля в ній індукується е.р.с., величина якої визначається за формулою

$$E = B \cdot l \cdot v_{cp} = \frac{4 \cdot B \cdot Q}{\pi \cdot d}, \quad (6.8)$$

де  $B$  — магнітна індукція;

$l$  — відстань між кінцями електродів у трубі з внутрішнім діаметром  $d$  ( $l=d$ ), м;

$v_{cp}$  — середня швидкість руху рідини, м/с;

$Q$  — витрата рідини, що протікає, м<sup>3</sup>/с.

Таким чином, електромагнітний витратомір являє собою невеликий гідродинамічний генератор змінного струму, що виробляє е.р.с., пропорційну середній швидкості потоку, а отже, і витраті рідини.

Вимір витрати рідини електромагнітним методом здійснюється при використанні як постійного магніту, так і магніту зі змінним магнітним полем. Зазначені способи створення магнітного поля мають свої позитивні і негативні сторони.

Схема електромагнітного витратоміра з постійним магнітним полем зображена на рис.6.13 *а*. Корпус 1 - це відрізок труби, виконаний з немагнітного матеріалу і покритий зсередини електричною ізоляцією (гумою, емаллю, фторопластом та ін.), розміщений між полюсами магніту 2. Магнітні силові лінії спрямовані перпендикулярно до вектора швидкості руху рідини. Через стінку труби ізольовано від неї введені електроди 3, які перебувають у контакті з рідиною. Вся інформація надходить у вимірювальний пристрій 4.

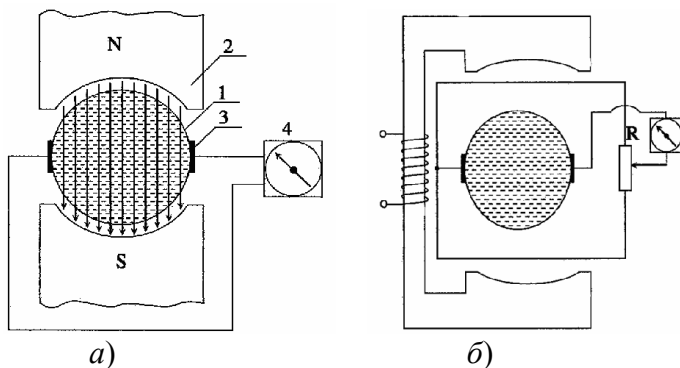


Рисунок 6.13 - Схема електромагнітного витратоміра:

*а*) – з постійним магнітним полем;

*б*) – зі змінним магнітним полем

Перевагою електромагнітних витратомірів з постійним магнітним полем є те, що значно зменшується проблема, пов'язана з перешкодами від зовнішніх змінних електромагнітних полів, особливо при застосуванні в промислових умовах, де працюють електромотори, магнітні

крани, трансформатори та інше електротехнічне устаткування. До переваг таких витратомірів варто віднести відсутність необхідності в джерелі живлення чутливих елементів, тобто самих електродів, розміщених на трубопроводі, що забезпечує безпеку його роботи і ряд інших факторів.

Основним недоліком магнітних витратомірів з постійним магнітним полем є поляризація електродів, тобто виникнення у позитивного електрода негативних іонів, а у негативного електрода - позитивних іонів. Тому електромагнітні витратоміри з постійним магнітним полем не застосовуються для рідин з іонною провідністю (кислоти, солі, водні розчини різних речовин та ін.). Такі витратоміри набули застосування для вимірювання витрати рідких середовищ із електронною провідністю, до яких відносять розплавлені рідкі метали (натрій, ртуть, залізовуглецеві розплави та ін.) і у яких відсутнє явище поляризації. Можливе застосування таких витратомірів - атомні реактори з розплавленим металевим теплоносієм, плавильні і ливарні агрегати на металургійних заводах та ін.

Для вимірювання витрати середовищ із іонною провідністю застосовуються витратоміри зі змінним магнітним полем, створюваним електромагнітом (рис.6.13 б). При досить високій частоті електромагнітного поля поляризація електродів практично відсутня.

Електромагнітні витратоміри різних модифікацій мають вбудований у вимірювальний блок мікропроцесорний пристрій, що обробляє інформацію від датчика витрати, встановленого на трубопроводі, реєструє значення миттєвої витрати і кількості за певний проміжок часу, має можливість передачі даних на ЕОМ інтерфейсом та інші операції.

На рис.6.14 показаний один з варіантів електромагнітного витратоміра, що виконаний у вигляді єдиного вимірювально-обчислювального модуля, розміщеного безпосередньо на об'єкті вимірювання витрати – трубопроводі, де 1 - ділянка трубопроводу; 2 - обчислювальний модуль; 3 - індикація показань; 4 - кнопки керування; 5 - датчик витрати. Такий прилад може бути використаний і як теплолічильник при

одержанні від мікропроцесора інформації про температуру середовища в трубопроводі.

Електромагнітні витратоміри, які мають клас точності 0,5-1,0, застосовуються на трубопроводах практично будь-яких діаметрів без обмеження верхньої межі за витратою. Їх показання не залежать від в'язкості і щільності середовища. Датчик витрати (чутливий елемент), практично безінерційний, перебуває поза рухомим середовищем і таким чином не створює втрати тиску. Витратоміри, які використовують такий принцип вимірювання, знаходять застосування для вимірювання витрати агресивних, абразивних і в'язких рідин і пульп, розплавлених металів, тобто у тих випадках, коли застосування витратомірів інших типів неприйнятне.

Переваги електромагнітних витратомірів:

- незалежність показань від в'язкості і густини вимірювального середовища;
- можливість застосування в трубах будь-якого діаметра;
- відсутність втрат тиску в потоці;
- необхідність меншої довжини прямих ділянок труб;
- висока швидкодія.

До основних недоліків електромагнітних витратомірів можна віднести:

- непридатні для вимірювання витрат газу і пари;
- непридатні для вимірювання витрати рідин-діелектриків (спирт, нафтопродукти і т.п)

## 6.8 Теплові витратоміри

Принцип дії теплових витратомірів ґрунтується на нагріванні потоку речовини і вимірюванні різниці температур до

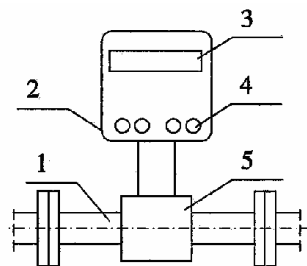


Рисунок 6.14 - Портативний електромагнітний витратомір

і після нагрівача (калориметричні витратоміри) або на вимірюванні температури нагрітого тіла, яке поміщене у потік (термоанемометричні витратоміри). Останні не мають самостійного застосування в технологічних вимірюваннях.

Схема калориметричного витратоміра показана на рис.6.15. У трубопроводі 1 встановлений нагрівач потоку 3, на рівних відстанях від центра нагрівача — термоперетворювачі 2 і 4 (при цьому нагрівання їх від випромінювання однакове), що вимірюють температуру потоку до нагрівання  $t_1$  і після нагрівання -  $t_2$ .

Для нерухомого середовища розподіл температури в ній симетрично щодо осі нагрівача і тому різниця температур  $\Delta t = t_1 - t_2 = 0$ . При певній малій швидкості потоку розподіл температури

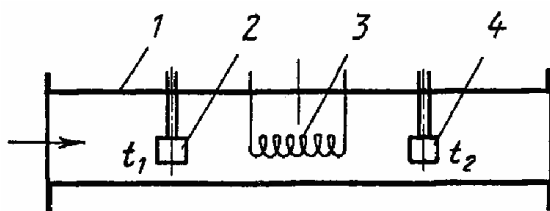


Рисунок 6.15 - Схема калориметричного витратоміра

несиметричний і трохи зміщується по потоку. У місці термоперетворювача 2 температура знижується внаслідок надходження холодної речовини, а в місці термоперетворювача 4 температура  $t_2$  або трохи підвищується, або ж не змінюється, внаслідок чого при малих витратах  $\Delta t$  збільшується із зростанням витрати. При подальшому збільшенні витрати при постійній потужності нагрівача  $t_2$  стане зменшуватися, у той час як  $t_1$  практично постійна, тобто буде зменшуватися  $\Delta t$ . Таким чином, при більших витратах різниця температур  $\Delta t$  обернено пропорційна витраті.

Залежність між масовою витратою  $G$  і різницею температур  $\Delta t$  при допущенні, що немає втрат теплоти в навколишнє середовище (що досягається ізоляцією труби), визначається рівнянням теплового балансу вигляду

$$G = \frac{N}{k \cdot c_p \cdot \Delta t}, \quad (6.9)$$

де  $N$  — потужність нагрівача;

$k$  — поправочний множник на нерівномірність розподілу температур по перетину трубопроводу;

$c_p$  — теплоємність речовини при температурі  $(t_1 + t_2)/2$ .

З виразу (6.9) бачимо, що вимірювання масової витрати може бути здійснено двома способами:

1. За значенням подаваної до нагрівача потужності  $N$ , що забезпечує постійну задану різницю температур  $\Delta t$ .

2. За значенням різниці  $\Delta t$  при постійній  $N$ .

Як перетворювачі температури в калориметричних витратомірах можуть бути використані різні термоприймачі (термоелектричні перетворювачі, термоперетворювачі опору та ін.). Термоперетворювачі опору характеризуються тою перевагою, що їх можна виконувати у вигляді рівномірної сітки, що перекриває весь перетин, і в такий спосіб вимірювати середню по перетину температуру.

Калориметричні витратоміри, що градируються індивідуально, мають класи точності 0,5-1. Калориметричні витратоміри в основному застосовують для вимірювання малих витрат чистих газів. Для вимірювання витрати рідин калориметричні витратоміри не знайшли практичного застосування через велику споживану потужність. Основна і важлива перевага калориметричних витратомірів полягає в тому, що вони забезпечують вимірювання масової витрати газу без вимірювання його параметрів стану (тиск, температура, густина).

Пошуки підвищення експлуатаційної надійності калориметричних витратомірів привели до створення теплових витратомірів, у яких нагрівач і термоперетворювачі розміщують на зовнішній стінці труби, і передача теплоти до потоку здійснюється через стінку труби.

## 6.9 Ультразвукові витратоміри

Розглянуті вище методи вимірювання витрати мають важливий недолік, пов'язаний з тим, що чутливі елементи (діафрагма, сопло, напірна трубка) перебувають безпосередньо у потоці і зазнають впливу середовища на конструктивні частини чутливого елемента. З іншого боку, самі чутливі елементи, перебуваючи в потоці, впливають на його аеродинамічні характеристики, що приводить до появи додаткової похибки вимірювання.

Останнім часом почали широко застосовуватися методи вимірювання витрати, у яких чутливі елементи перебувають поза рухомим середовищем, це дозволяє розширити кількість видів обмірюваних середовищ (розплавлені метали, кислоти, луги, агресивні і токсичні рідини, гази та ін.). В одному з таких методів вимірювання витрати використовується ультразвукова хвиля, що подає інформацію про швидкість і витрату рухомого середовища у закритих і відкритих каналах.

В ультразвукових витратомірах використовуються різні ефекти, пов'язані із проходженням ультразвуку через рухоме середовище: зміна швидкості ультразвуку в поздовжньому напрямку потоку; відхилення ультразвукової хвилі при поперечному проходженні в потоці; ефект Доплера та ін.

Найбільшого поширення дістав метод вимірювання витрати, що базується на вимірюванні різниці часу проходження ультразвуку за напрямком і проти напрямку потоку середовища.

У таких приладах випромінювачі (п'єзоелементи) посилають через рухоме середовище дві звукові хвилі в протилежних напрямках. Якщо середовище нерухоме, то обидві хвилі проходять ту саму відстань  $L$  до приймаючих п'єзоелементів за однаковий час. Рухоме середовище прискорює одну звукову хвилю і сповільнює іншу. Різниця часу  $\Delta t$  проходження відстані  $L$  цими хвилями пропорційна швидкості  $v$  середовища. Одним зі способів вимірювання  $\Delta t$  є вимірювання різниці фаз змінних напрямків, що виникають на приймаючих п'єзоелементах. На рис.6.16 показана схема двоканального

ультразвукового витратоміра, у якому використовується частотний спосіб вимірювання тимчасових інтервалів при проходженні ультразвуку у двох напрямках: у напрямку потоку і проти. На цьому рисунку позначені через 1, 3 - випромінюючі п'єзоелементи; 2- генератор ультразвукових коливань; 4, 8 - приймаючі п'єзоелементи; 5, 7- підсилювачі; 6 - фазометричний пристрій (реле).

Ультразвукові хвилі, утворені двома випромінювачами 1 і 3, проходять перетин каналу у двох напрямках і надходять на два приймачі, які перетворюють ультразвукові сигнали в електричні. Як випромінювачі використовуються п'єзокристали, які збуджуються високочастотними електричними сигналами від генератора 2.

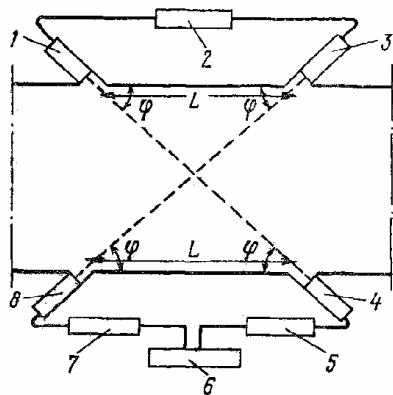


Рисунок 6.16 - Схема ультразвукового витратоміра

Приймачі 4 і 8 посилають електричні сигнали на відповідні реле 6, яке керує роботою генератора 2 у режимі "увімкнено-вимкнено". При надходженні сигналу на реле відбувається вимикання генератора, а при відсутності сигналу - вмикання. Таким чином, генератор 2 працює в періодичному режимі, а час роботи і "мовчання" дорівнює часу проходження ультразвукових сигналів через рухоме середовище. Вимір часу роботи генератора (часу проходження ультразвуку через трубопровід) виконується в часовому блоці.

Вираз для визначення витрати середовища ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) при використанні частотного ультразвукового витратоміра

$$Q = \frac{F \cdot L}{2} \cdot (f_1 - f_2), \quad (6.10)$$

де  $F$  - перетин трубопроводу (каналу),  $\text{м}^2$ ;

$L$  - відстань між приймачами ультразвукового сигналу,  $\text{м}$ ;

$f_1, f_2$  – відповідно частота проходження імпульсів при прямому проходженні ультразвуку і при зустрічному проходженні ультразвуку.

Як бачимо з формули (6.10), показання частотного витратоміра не залежить від швидкості проходження ультразвуку в середовищі, що є важливою перевагою такого методу вимірювання витрати рідких і газоподібних середовищ.

В інших типах витратомірів ультразвукова хвиля спрямовується перпендикулярно до осі труби, і за величиною відхилення ультразвукової хвилі від перпендикуляра визначається витрата або середня швидкість потоку. У міру збільшення середньої швидкості потоку  $v$  напрямок ультразвукового сигналу зі швидкістю  $c$  усе більше відхиляється за напрямком швидкості потоку (рис.6.17). Кут відхилення напрямку сигналу  $\alpha$  буде визначатися виразом

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{v}{c}\right). \quad (6.11)$$

Зі збільшенням середньої швидкості середовища  $v$  кількість енергії, що надходить на приймач П1, зменшується, а та, що надходить на приймач П2 - збільшується. Різниця сигналів від приймачів П1 і П2 збільшується зі зростанням середньої швидкості, а отже, і витрати, і надходить у витратомір V.

Витратоміри з такою схемою прості за будовою, але мають обмежену точність через мале відхилення променя. Крім того, швидкість ультразвуку, що входить у розрахункові формули витрати, може мінятися при зміні фізичних параметрів і складу обмірюваного середовища, що вносить додаткову похибку.

Розроблено інші типи ультразвукових витратомірів нового покоління, таких, як часоімпульсні і фазові. У часоімпульсних витрато-

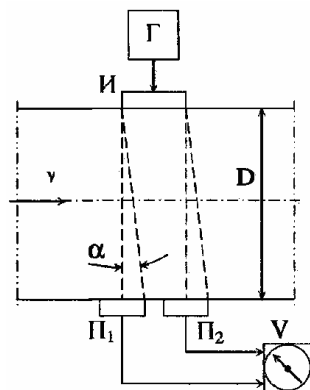


Рисунок 6.17 -  
Ультразвуковий витратомір  
з вертикальним відхиленням  
ультразвуку

мірах періодично здійснюється вимірювання різниці часу проходження дуже коротких імпульсів тривалістю 0,1-0,2 мікросекунд, по ходу і проти ходу руху середовища в трубопроводі. Обмірювана різниця часів дуже мала навіть при більших швидкостях руху середовища, що вимагає застосування електронних вимірювальних систем підвищеної точності. Крім того, показання таких витратомірів залежать від зміни швидкості ультразвуку в середовищі. Такі витратоміри застосовуються в основному для вимірювання витрати рідких середовищ, для яких у процесі вимірювання істотно не змінюються такі параметри, як густина, температура, тиск.

У фазових ультразвукових витратомірах використовується ефект Доплера, тобто вимірюється різниця фаз ультразвукових коливань, які поширюються по потоку і проти нього. Недоліком таких витратомірів також є залежність показань від зміни швидкості ультразвуку в середовищі.

Розроблені різні модифікації ультразвукових часоімпульсних і доплерівських (фазових) витратомірів, які застосовуються в нафтовій, металургійній, хімічній та інших областях промисловості для вимірювання витрати мазуту, нафти, нафтопродуктів та інших рідин, у тому числі середовищ, забруднених твердими і газоподібними включеннями. Перевагою таких витратомірів є широкий діапазон вимірювальних витрат від 0,45 до 110000 м<sup>3</sup>/год для трубопроводів діаметром від 40 до 1800 мм із похибкою вимірювання не більше 2%.

Сучасні ультразвукові витратоміри комплектуються вбудованими мікропроцесорами, які забезпечують обробку інформації, що надходить від датчиків, вимірювання і індикація витрати середовища (за годину, добу, місяць), виготовлення уніфікованого струмового сигналу при використанні системи автоматичного регулювання, введення необхідних коригувальних і керуючих команд та ін.

На практиці дістали поширення і переносні ультразвукові витратоміри, які мають такі самі метрологічні характеристики, як і стаціонарні. До комплекту приладу входять безпосередньо

витратомір, портативна ЕОМ, багатофункціональний блок живлення із вбудованим акумулятором, монтажні пристрої для швидкого і правильного розміщення датчиків на поверхні трубопроводу. Такі прилади використовуються для оперативного контролю витрат обраного типу середовища на різних ділянках трубопроводів, які мають різний діаметр і товщину стінки.

Ультразвукові витратоміри є найбільш перспективними приладами для вимірювання витрат різних рідких і газоподібних середовищ. Найбільшу точність вимірювання показують одноканальні ультразвукові витратоміри з урізаними датчиками, похибка яких не перевищує 0,3%.

### **6.10 Силкові витратоміри**

Ці витратоміри ґрунтуються на залежності від масової витрати ефекту силового впливу, який надає потоку прискорення того або іншого роду. Таке прискорення виникає в процесі надання потоку певного руху (наприклад, закручування).

Додаткове прискорення пропорційно масовій витраті. Тому силкові витратоміри вимірюють масову витрату, що є їхньою істотною перевагою. Крім того, завдяки малій залежності від профілю швидкостей, у них немає жорстких вимог до прямої ділянки труби перед перетворювачем витрати.

Силкові витратоміри застосовуються для вимірювання витрати як однофазних, так і двофазних середовищ, сипучих речовин і пульпових матеріалів (наприклад, шламу).

У всіх інших випадках застосовуються тільки коріолісові силкові витратоміри. Турбосилкові витратоміри досить зручні для вимірювання витрати однофазних середовищ, не придатні для двофазних, тому що при закручуванні потоку відбувається сепарація фаз під впливом відцентрової сили. Це порушує рівномірний розподіл фаз по перетину і змінює величину вимірювального моменту. У коріолісових витратомірів вимірювальна речовина рухається перпендикулярно осі обертання потоку.

## **6.11 Ваговий метод вимірювання витрати сипучих середовищ**

Ваговий метод вимірювання масової витрати сипучої речовини полягає в періодичному або безперервному вимірюванні сили ваги, створюваної вагою окремих порцій або ділянок потоку сипучої речовини.

Витратоміри, що реалізують цей принцип вимірювання, є автоматичними вагами. Останні поділяють на дві великі групи: *ковшові* і *конвеєрні*. Перші є витратомірами періодичної дії. Вони вимірюють вагу послідовних порцій маси сипучої речовини. Другі - безперервної дії. Вони вимірюють вагу маси сипучої речовини, що перебуває на тій ділянці рухомого конвеєра, яка проходить у цей момент над пристроєм для вимірювання ваги.

## **6.12 Вимірювання витрати багатофазних середовищ**

### **6.12.1 Загальна характеристика багатофазних потоків**

Багатофазні потоки дістали великого поширення. Навіть звичайні потоки рідини, газу або пари, що проходять у трубах і які беруться за однофазні, насправді в дуже багатьох випадках містять тією чи іншою мірою домішки іншої фази. Так, разом з газом звичайно рухається в невеликій кількості вода, що конденсується при зниженні температури з водяної пари. Водяні ж потоки нерідко містять повітря, що захоплюється цим потоком. Однак при вимірюванні витрати подібних середовищ особливих труднощів не виникає і їх при цьому можна розглядати як однофазні.

Інше положення спостерігається при вимірюванні витрати дійсно багатофазних середовищ. Тут нерідко виникають дуже великі труднощі, що залежать як від роду цих середовищ, так і від процентного вмісту окремих фаз, а також характеру їх розподілу в потоці.

Багатофазні середовища поділяються на дво- і трифазні. Перші залежно від роду фаз можуть бути трьох, типів: **суміш**

**рідини і твердої фази, суміш газу і твердої фази і суміш рідини з газом або парою.**

Особливо часто трапляються двофазні середовища першого типу. Вони мають місце при гідротранспорті всіляких твердих і волокнистих речовин. Іноді гідросуміші називають пульпами: металургійної, кам'яновугільної, целюлозно-паперової і т.д. Властивості гідросумішей визначаються концентрацією, гранулометричним складом і властивостями твердої фази.

Прикладом двофазного середовища, що являє собою суміш твердої і газоподібної фаз, є пиловугільне паливо. Вугілля, попередньо розмелене до порошкоподібного стану, захоплюється повітряним потоком, створюваним повітродувкою, і подається в топку парового казана. Подібні ж двофазні суміші мають місце при пневмотранспорті борошна, цементу і інших речовин.

Дуже важливе значення в техніці має третій тип двофазних середовищ, а саме: суміші рідини з газом або парою. Нафта зі свердловини завжди надходить із газом. При цьому виникає досить важливе завдання вимірювання витрати двофазних нафтогазових сумішей. Крім того, у багатьох технологічних процесах, наприклад при сушінні, а також в опалювальних системах широко застосовується волога насичена пара. Вимірювання її витрати також є актуальним завданням.

У ряді випадків виникає необхідність вимірювання витрати трифазної або трикомпонентної суміші. Так, у багатьох гідросумішах поряд із твердою і рідкою фазами є ще і газова фаза - повітря. Подібні речовини називають газованими пульпами. Продукт вихідний з нафтових свердловин, як правило, складається не тільки з нафти і газу, але і супровідної їм води, тобто є трикомпонентним.

### **6.12.2 Структури багатофазних потоків**

Структури потоків, що є сумішню рідини з газом або парою, досить різноманітні. Це різноманіття залежить від відсоткового вмісту тієї або іншої фази, а також від швидкості потоку і у певних випадках від розміщення трубопроводу в

просторі та від його діаметра.

Якщо концентрація однієї з фаз мала, то маємо дисперсну структуру, при якій краплі рідини (або пухирці газу) порівняно рівномірно розподілені в парі (рис.6.18 б) (або у рідині відповідно). Подібну структуру іноді називають *краплинною*.

Зі збільшенням вмісту рідини в парі (газі) починає утворюватися розшарування або роздільний потік, характер якого залежить від розміщення труби. При вертикальному положенні труби рідина поступово розміщується у вигляді кільцевого шару уздовж стінок, а в середній частині ще зберігається *краплинна структура* (рис.6.18 в). Ця перехідна форма потоку називається *дисперсійно-кільцева*. При подальшому збільшенні частки рідини в суміші настає повністю розшарований потік, що у вертикальній трубі має *кільцеву структуру* (рис.6.18 г). При цьому кільцевий шар рідини стає все товстішим, а центральна стрижнева частина заповнена однією парою (газом). У похилих і горизонтальних трубах при розшарованому потоці немає кільцевого шару рідини. Остання під дією сили ваги опускається вниз і рухається по нижній частині трубопроводу, у той час як пара або газ переміщуються по його верхній частині (рис.6.19 а).

Зі збільшенням швидкості потоку і одночасному зростанні частки рідини на поверхні розподілу фаз починають виникати

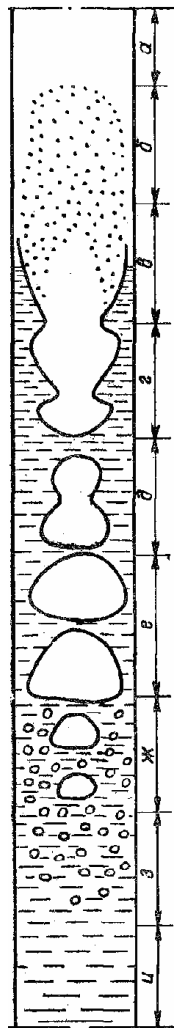


Рисунок 6.18 Структура газорідинного потоку у вертикальній трубі

хвильові гребені. Це має місце як у вертикальних (рис.6.18 з), так і в горизонтальних трубах (рис.6.19 б). Хвильові гребені зростають зі збільшенням швидкості і починають розсікати на окремі частини безперервний потік пари або газу, що рухається в центрі вертикальної труби або у верхній частині горизонтального каналу (рис.6.19 в). Так виникає *пробкова*, або *снарядна, структура потоку* (рис.6.18 д, е і рис.6.19 г). При такій структурі пара або газ переміщується у вигляді окремих пробок, які зростають і стискаються в процесі руху, перекриваючи собою повністю або частково поперечний переріз каналу.

У міру подальшого зростання частки рідини в потоці газові пробки зменшуються в розмірі, і поряд з ними вже рухаються дрібні газові пухирці. Подібна структура (рис.6.18 ж і рис.6.19 д) при ще більшому зменшенні частки газу переходить у *пузиркову структуру*. У вертикальній трубі ці пухирці рівномірно розподілені по її перетину (рис.6.18 з), а в горизонтальній або похилій вони рухаються у верхній частині труби (рис.6.19 е).

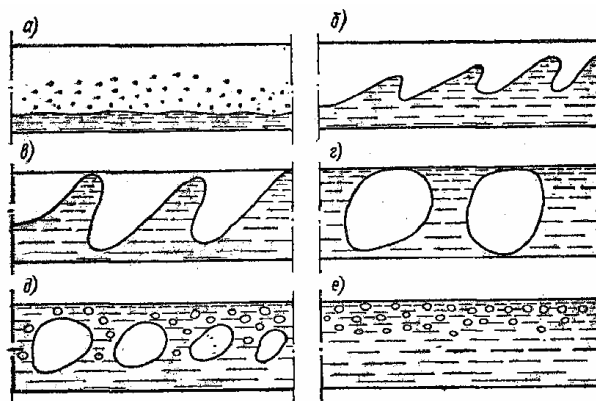


Рисунок 6.19 - Структура газорідинного потоку у горизонтальній трубі

Найпоширенішою в промислових трубопроводах є пробкова структура газорідинного потоку. При такій структурі може виникнути припущення, що швидкість обох фаз однакова. Насправді, внаслідок хвильового характеру руху, при якому

швидкість поширення хвилі дорівнює середній швидкості газу, останній переміщується в западинах хвиль, що утворюються в рідинних пробках. У результаті середня швидкість газової фази при пробковій структурі виявляється більше середньої швидкості рідини. Пробкова структура може супроводжуватися великомасштабними пульсаціями швидкості, тиску і концентрації фаз.

Розглянуті структури газорідинного потоку можуть бути певною мірою поширені й на інші двофазні потоки, що є сумішшю газу або рідини із твердою фазою. Але при цьому треба враховувати ступінь дисперсності й однорідності твердої фази, а також форму і розмір твердих часток.

Під впливом гравітаційних сил у горизонтальних трубах зростає концентрація твердої фази в нижній частині труби в порівнянні з верхньою тим більше, чим крупніше розмір твердих часток. Це порушує осьову симетрію профілю швидкостей, характерну для сталого однофазного потоку, тому що швидкість суміші в нижній частині труби зменшується в порівнянні з верхньою. У вертикальних трубах цього немає. У розглянутих потоках трапляється як *дисперсний*, так і *розшиарований режими потоку*. При останньому режимі в горизонтальних трубах, коли рідина протікає над шаром твердих часток, можливе утворення хвиль або дюн, що переміщуються в напрямку руху потоку. При цьому концентрація твердої фази періодично змінюється уздовж труби. Трапляються і агрегативні потоки, коли частки прагнуть до утворення конгломератів або пластівців, або ж коли більше легкий компонент - газ утворить пухирці, неутримуючих твердих часток.

### **6.12.3 Загальна характеристика методів вимірювання витрати багатofазних середовищ**

Багатофазні і багатокомпонентні середовища відрізняються дуже великою різноманітністю, що залежить насамперед від роду окремих фаз і компонентів, а потім від ступеня їх дисперсності і характеру розподілу в суміші, причому на останнє впливає величина середньої швидкості потоку і розміщення трубопроводу: горизонтальне,

вертикальне або похиле (під кутом). Далі досить істотним для потоку багатофазної речовини є різниця швидкостей між окремими фазами. Більш легка фаза, як правило, випереджає у своєму русі більш важку. Це викликає необхідність розрізняти істинні і витратні концентрації фаз, а також істинну і витратну щільність суміші. Все сказане створює додаткові труднощі при вимірюванні витрати багатофазних середовищ у порівнянні з однофазними. Проте у цей час є можливість вимірювати витрату як більшості багатофазних середовищ, так і витрату того або іншого компонента або фази (наприклад, твердої фази при гідро- або пневмотранспорті).

Застосовувані для цих вимірювань методи і прилади можуть бути поділені на три групи.

*До першої групи* відносять різні методи і засоби, розроблені для вимірювання витрати однофазних середовищ. У певних випадках ці засоби застосовуються без усякої зміни, наприклад, витратоміри змінного рівня, у яких здійснюється розподіл рідкої і газоподібної фаз. Але здебільшого буває необхідно враховувати специфіку вимірювальної двофазної речовини. Наприклад, у витратомірах із звужуючими пристроями при вимірюванні гідросумішей застосовуються тільки труби Вентурі, причому зі змінною горловиною, виконаної зі зносостійкого матеріалу, а при вимірюванні витрати вологої пари лише діафрагми, що практично не реагують на наявність важкого компонента - води. Те саме характерне і до силових витратомірів, з яких для двофазних речовин застосовуються лише коріолісові витратоміри. Ці витратоміри зручні для вимірювання витрати пульп і шламів і в них немає сепарації фаз при вимірюванні витрати газорідних сумішей.

*До другої групи* можна віднести методи, що ґрунтуються на спільному застосуванні певних витратомірів, наприклад електромагнітних або ультразвукових, розроблених для однофазних речовин і приладів, що служать для вимірювання щільності двофазного потоку, а в деяких випадках ще і приладів, що вимірюють концентрацію окремих компонентів. Ці методи

застосовуються при вимірюванні витрати трифазних речовин, а також при гідро- і пневмотранспорті.

*Третю групу* становлять методи і прилади, розроблені спеціально або переважно для вимірювання витрати багатофазних речовин. Таких методів поки ще небагато. До них варто віднести насамперед флуктуаційний метод, придатний для вимірювання досить широкого кола різних двофазних і двокомпонентних потоків. Певною мірою до цієї ж групи можуть бути віднесені вібраційні витратоміри, розроблені для вимірювання нафтогазових потоків.

Переходячи до оцінки досягнутої точності вимірювання багатофазних середовищ, варто сказати, що вона поки що досить обмежена. Здебільшого відносна наведена похибка вимірювання становить  $\pm(3-5)\%$ , а у певних випадках і більше, особливо, якщо мова йде про похибки вимірювання витрати окремо кожного з компонентів багатофазного потоку.

#### **6.12.4 Вимірювання двофазних потоків витратомірами змінного перепаду тиску**

Для вимірювання витрати однофазних потоків саме великого поширення дістали витратоміри змінного перепаду тиску із звужуючими пристроями. Тому, природно, що при вирішенні проблеми вимірювання витрати багатофазних речовин нерідко вдавалися і вдаються до витратомірів цього самого типу.

При проходженні двофазного середовища через звужуючий пристрій фаза, що має більш щільність, тобто більш важка, прискорюється в звужуючій частині пристрою повільніше, ніж більше легка, внаслідок дії сил інерції. Прискорення важкої фази в порівнянні з легкою буде тим сильніше, чим більш різниця густини фаз. Цей процес супроводжується збільшенням концентрації важкої фази. При подальшому розширенні потоку швидкості кожної з фаз, постійно зменшуючись, повертаються до первісного значення. Одночасно до вихідного значення повертається і концентрація важкої фази. Звідси можна зробити висновок про те, що чим коротше осьова довжина тієї частини звужуючого пристрою, на

якій відбувається прискорення потоку, тим менша частина потенційної енергії, або інакше перепаду тиску витрачається на прискорення важкої фази. У діафрагмі ця довжина мінімальна. Тому в таких середовищах, як пиловугільна суміш або волога насичена пара, що мають більшу різницю густини важкої і легкої фаз і малу об'ємну концентрацію важкої фази, перепад тиску в діафрагмі майже цілком або у всякому разі в основній частині буде витрачатися на прискорення легкої фази і практично не буде реагувати на наявність важкої фази. Отже, застосовувати діафрагму для вимірювання витрати твердої фракції (вугілля, цементу та інших), яка переноситься повітряним потоком, недоцільно. Для цих цілей найкраще придатна труба Вентурі, що має відносно більшу довжину тієї своєї частини, на якій відбувається звуження потоку. Сопло ж займає проміжне положення між діафрагмою і трубою Вентурі. Але для вимірювання витрати легкої фази вологої пари діафрагма саме є відповідним пристроєм. Вона буде реагувати на суху частину вологої пари, що і становить особливий інтерес.

#### **6.12.5 Вимірювання витрати суміші твердої і газоподібної фаз**

У розглянутих сумішах тверда фаза у вигляді порошку диспергована в повітрі. Прикладами подібних середовищ є пиловугільне паливо, цемент, борошно та ін. Так само у сумішах діафрагма може дати лише витрату повітря. Вона практично не буде реагувати на наявність у потоці твердої фази. Але остання буде впливати на перепад тиску в таких звужуючих пристроях, як труба Вентурі, сопло або сопло Вентурі. Дійсно, чим більша концентрація твердої фази в потоці, тим більша буде енергія, затрачувана на її прискорення в таких звужуючих пристроях, і, отже, тим більшим буде перепад тиску в них. У горловині цих звужуючих пристроїв швидкість важкої фази значно відстає від швидкості легкої фази.

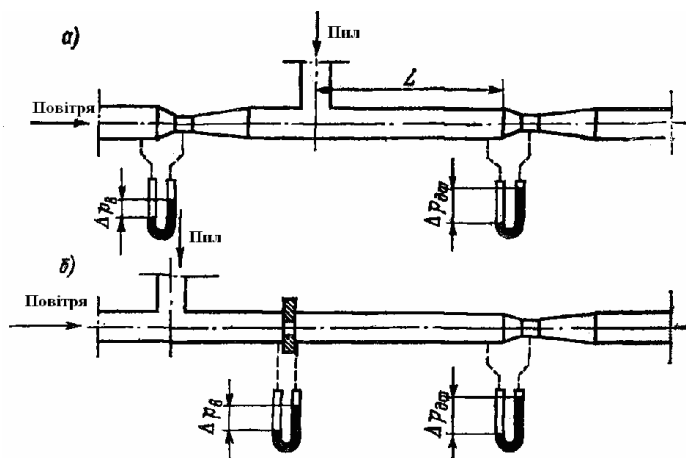


Рисунок 6.20 - Схеми вимірювання сумішей твердої та газоподібної фаз:

*а* – дві труби Вентурі; *б* – діафрагма і труба Вентурі

Вимірювання витрати розглянутих сумішей можна здійснити за допомогою двох звужуючих пристроїв (рис.6.20). Ці пристрої необхідно брати однотипними, наприклад, дві труби Вентурі, якщо тверда фаза надходить у потік між ними (рис.6.20 *а*).

Тоді перша труба Вентурі буде давати перепад тиску повітря, а друга - перепад тиску пилу. Якщо ж обидва звужуючих пристрої треба встановити там, де рухається аеросуміш, то першим з них повинна бути діафрагма, що дає перепад тиску повітря, а другим — труба або сопло Вентурі, що дає перепад тиску пилу (рис.6.20 *б*).

#### 6.12.6 Вимірювання витрати суміші твердої та рідкої фаз

Метод змінного перепаду тиску нерідко застосовується для вимірювання витрати пульп (зокрема, вугільних) і різних гідросумішей (наприклад, водогрунтових, гідроторфу та ін.).

При цьому для забезпечення надійності і справності роботи витратоміра треба:

1. Запобігати випаданню твердої фази в мертвих зонах біля звужуючого пристрою.
2. Ураховувати можливість підвищеного зношування витратоміра.
3. Запобігати засміченню сполучних трубок, що передають перепад тиску до дифманометра.

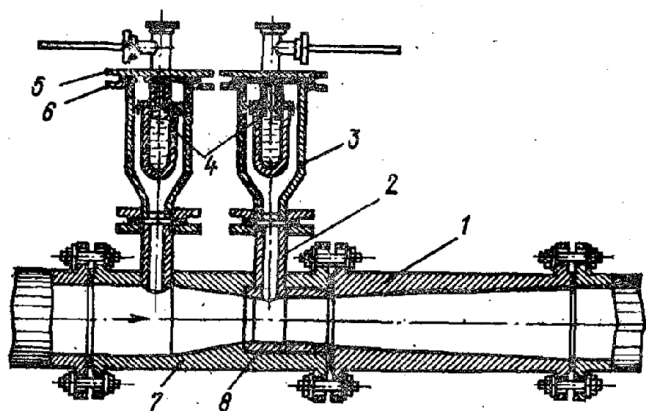


Рисунок 6.21 - Труба Вентурі для вимірювання витрати пульп

Перше завдання вирішується застосуванням у всіх випадках для вимірювання витрати пульп і гідросумішей як перетворювача витрати лише труби Вентурі, що не мають мертвих зон, у яких могли б випадати тверді опади. Для запобігання зношуванню доцільно в горловині труби Вентурі мати циліндричну вставку із твердого сплаву. Найпоширеніший метод для захисту сполучних трубок від засмічення полягає в застосуванні гнучких роздільних перегородок з гуми, поліетилену та інших матеріалів. На рис.6.21 показана труба Вентурі із гнучкими перегородками. Розміщена горизонтально труба Вентурі має змінну циліндричну вставку 8 зі зносостійкого матеріалу, що охоплює не тільки горло труби, але і прилеглі ділянки вхідного і вихідного конусів, які зазнають посиленого зношування. Зносостійка вставка у багато разів подовжує термін служби витратоміра. Для можливості її заміни

труба Вентурі виготовлена із двох рознімних частин 1 і 7. Відбір тиску робиться у верхній частині через патрубки 2, внутрішні діаметри яких не менше 20 мм. На цих патрубках змонтовані циліндричні посудини 3, закриті кришками 5, прикріпленими до фланців 6. На кришках закріплені тонкостінні гумові мішки 4 циліндричної форми, що відокремлюють пульпу від води, якою заповнені сполучні трубки. Якщо буде потреба, до посудин 3 для їх промивання може бути підведена водяна лінія.

#### **6.12.7 Вимірювання об'ємної витрати або швидкості двофазної суміші з корекцією на концентрацію компонентів**

Одночасне вимірювання середньої швидкості або об'ємної витрати потоку разом з вимірюванням його щільності дозволяє одержати масову витрату для однофазних, а також для двокомпонентних середовищ, якщо обидва компоненти суміші перебувають в одній фазі.

Для двофазних середовищ положення ускладнюється звичайно у розходженні швидкостей окремих фаз. Це розходження тим більше, чим сильніше відрізняється густина фаз одна від одної, а за наявності твердої фази воно залежить ще і від ступеня її дисперсності. Але навіть у пульпах, де густина твердої і рідкої фаз відрізняються порівняно незначно, різниця швидкостей досягає значної величини.

Недостатньо точне знання співвідношення швидкостей окремих фаз буде джерелом похибки при вимірюванні загальної масової витрати суміші.

Якщо ж метою вимірювання є лише масова витрата твердого компонента, що транспортується водою або повітрям, то замість вимірювання середньої швидкості потоку необхідно вимірювати середню швидкість твердої фази.

Для вимірювання щільності у двофазних витратомірах застосовуються всілякі методи і прилади: *гравіметричні*; *гідростатичні*, *іонізаційні*, *ультразвукові*, *діелькометричні* (*ємнісні*), *кондуктометричні*, *вібраційні*, *трибоелектричні* та ін. Більш обмежений вибір приладів для вимірювання об'ємної витрати або швидкості. Так, наприклад, широко застосовувані в однофазних середовищах турбінні витратоміри непридатні з

міркувань міцності, якщо одним з компонентів є тверда фаза. Практичне застосування знайшли, головним чином, електромагнітні, ультразвукові, змінного перепаду і кореляційні витратоміри. Важливою перевагою останніх є те, що вони за наявності твердої фази контролюють саме її швидкість руху.

Розгляданий метод звичайно застосовується при гідро- або пневмотранспортах, коли необхідно, як правило, знання лише масової витрати твердої фази.

### **6.12.8 Загальна характеристика вимірювання витрати трифазних і трикомпонентних речовин**

На практиці нерідко виникає необхідність вимірювання витрати як трифазних, так і трикомпонентних речовин. Насамперед така необхідність виникає при гідротранспорті кускових і зернистих сипучих матеріалів. Так, пульпа після флотаційних машин і згущувачів на збагачувальних фабриках, як правило, містить газ. Пульпа, що містить газ, називається газованою пульпою. Знехтування зазначеною газовою фазою може привести до великої похибки при вимірюванні витрати пульпи. Крім того, на похибку вимірювання витрати буде впливати ковзання між окремими фазами, обумовлене нерівністю їх швидкостей. Як правило, швидкість твердої фази менша швидкості рідини, а швидкість останньої звичайно буває меншою швидкості газу. Зі збільшенням розміру твердих часток різниця між швидкостями зростає.

Природно, що вимірювання витрат трифазної і трикомпонентної сумішей є досить складним завданням і вимагає застосування принаймні трьох вимірювальних приладів або перетворювачів, а також обчислювального пристрою або схеми корекції.

Є пропозиції вимірювати витрати окремих компонентів трифазних або трикомпонентних речовин за допомогою трьох витратомірів, що характеризуються різними властивостями, а також за допомогою обчислювального пристрою, який визначає на основі показань цих приладів витрати окремих компонентів. Такий метод вимірювання в зазначених роботах названий методом специфічних потоків.

Так, наприклад, контроль трикомпонентного потоку, що складається з нафти, газу і води, можна здійснити за допомогою трьох витратомірів або трьох перетворювачів витрати: силового (коріолісового типу), реагуючою на загальну масову витрату потоку; камерного (шестеренного, лопатевого або іншого типів), реагуючою на загальну об'ємну витрату, і калориметричного, реагуючого на загальну теплову витрату.

## 7 ВИМІРЮВАННЯ РІВНЯ РІДИН

### 7.1 Загальні відомості

**Рівнем** називають висоту заповнення технологічного апарата робочим середовищем — рідиною або сипучим тілом. Рівень робочого середовища є технологічним параметром, інформація про нього необхідна для контролю режиму роботи технологічного апарата, а в ряді випадків для керування виробничим процесом і для проведення заходів щодо енергоаудиту.

Шляхом вимірювання рівня можна одержувати інформацію про масу рідини в резервуарах. Подібна інформація широко використовується для керування виробничим процесом. Рівень вимірюють в одиницях довжини. Засоби вимірювання рівня називають **рівнемірами**.

Розрізняють рівнеміри, які призначені для *вимірювання рівня робочого середовища; вимірювання маси рідини в технологічному апараті; сигналізації граничних значень рівня робочого середовища — сигналізатори рівня.*

За діапазоном вимірювання розрізняють **рівнеміри широкого** (з межами вимірювання 0,5-20 м) і **вузького діапазонів** (межі вимірювання  $(0... \pm 100)$  мм або  $(0... \pm 450)$  мм).

На даний час вимірювання рівня в багатьох галузях промисловості здійснюють різними за принципом дії рівнемірами, з яких дістали поширення *візуальні, поплавкові, буйкові, гідростатичні, електричні, ультразвукові і радіоізотопні.*

### 7.2 Візуальні засоби вимірювання рівня

До візуальних засобів вимірювання рівня відносять *мірні лінійки, рейки, рулетки з лотами* (циліндричними стрижнями) і *скляні рівнеміри.*

У виробничій практиці широкого застосування набули скляні рівнеміри. Вимірювання рівня за допомогою скляних

рівнемірів (рис.7.1 а) ґрунтується на законі сполучених посудин. Вказівне скло 1 за допомогою арматур з'єднують із нижньою і верхньою частинами ємності. Спостерігаючи за положенням меніска рідини в трубці 1, роблять висновок про положення рівня рідини в ємності. Для виключення додаткової похибки, обумовленої розходженням температури рідини в резервуарі і у скляній трубці, перед вимірюванням здійснюють промивання скляних рівнемірів.

Для цього передбачений вентиль 2. Арматура скляних рівнемірів оснащується запобіжними клапанами, що забезпечує автоматичне перекривання каналів, які зв'язують вказівне скло з технологічним апаратом при випадковій поломці скла. Через низьку механічну міцність скляні рівнеміри звичайно виконують довжиною не більше 0,5 м. Тому для вимірювання рівня в резервуарах (рис.7.1 б) встановлюється декілька скляних рівнемірів з тим розрахунком, щоб вони перекривали один одного. Абсолютна похибка вимірювання рівня скляними рівнемірами  $\pm(1-2)$  мм. При вимірюванні можливі додаткові похибки, пов'язані із впливом температури навколишнього середовища. Скляні рівнеміри застосовуються до тисків 2,94 МПа і до температури 300°C.

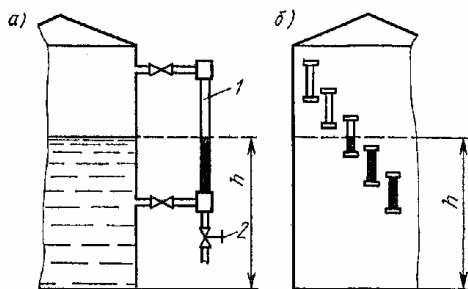


Рисунок 7.1 - Схеми візуальних рівнемірів

### 7.3 Поплавкові засоби вимірювання рівня

Серед існуючих різновидів рівнемірів поплавкові є найбільш простими. Дістали поширення поплавкові рівнеміри вузького і широкого діапазонів. Поплавкові рівнеміри вузького діапазону (рис.7.2) звичайно являють собою пристрій, який містить кульковий поплавок діаметром 80-200 мм, виконаний з

нержавіючої сталі. Поплавок плаває на поверхні рідини і через штангу і спеціальне ущільнення з'єднується або зі стрілкою вимірювального приладу, або з перетворювачем 1 кутових переміщень в уніфікований електричний або пневматичний сигнал. Рівнеміри вузького діапазону випускаються двох типів: *фланцеві* (рис.7.2 а) і *камерні* (рис.7.2 б), що відрізняються способом їх установлення на технологічних апаратах. Мінімальний діапазон вимірювання цих рівнемірів 0-10 мм, максимальний — 0-200 мм. Клас точності 1,5. Поплавкові рівнеміри широкого діапазону (рис.7.2 в) яляють собою поплавок 1, пов'язаний із противагою 4 гнучким тросом 2. У нижній частині противаги закріплена стрілка, що показує за шкалою 3 значення рівня рідини в ємності.

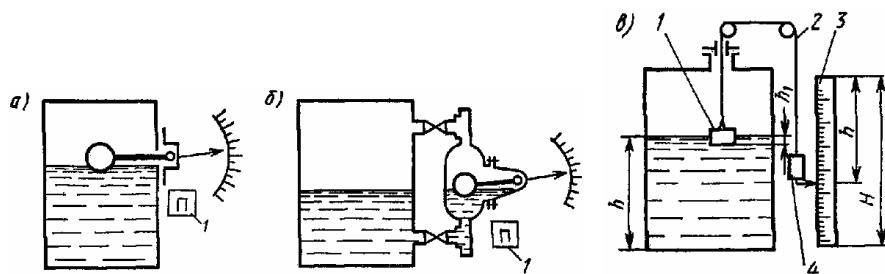


Рисунок 7.2 - Схеми поплавкових рівнемірів

При розрахунках поплавкових рівнемірів підбирають такі конструктивні параметри поплавка, які забезпечують стан рівноваги системи «поплавок-противага» тільки за певної глибини занурення поплавка. Якщо знехтувати силою ваги троса і тертям у роликах, стан рівноваги системи «поплавок-противага» описується рівнянням

$$G_B = G_{\Pi} - S \cdot h_1 \cdot \rho_{ж} \cdot g, \quad (7.1)$$

де  $G_B$ ,  $G_{\Pi}$  — сили ваги противаги і поплавка, Н;

$S$  — площа поплавка,  $\text{м}^2$ ;

$h_1$  — глибина занурення поплавка, м;

$\rho_{ж}$  — густина рідини,  $\text{кг/м}^3$ .

Підвищення рівня рідини змінює глибину занурення поплавка і на нього діє додаткова сила виштовхування. У результаті рівняння (7.1) порушується, і протизвага опускається вниз до того часу, доти глибина занурення поплавка не стане дорівнювати  $h_1$ . При зниженні рівня діюча на поплавок сила виштовхування зменшується, і поплавок починає опускатися вниз до того часу, доти глибина занурення поплавка не стане дорівнювати  $h_1$ . Для передачі інформації про значення рівня рідини в резервуарі застосовують сельсинні системи передачі.

## 7.4 Буйкові засоби вимірювання рівня

В основу роботи буйкових рівнемірів покладене фізичне явище, яке описується законом Архімеда. Чутливим елементом у цих рівнемірах є циліндричний буй, виготовлений з матеріалу із густиною, більшою за густину рідини. Буй перебуває у вертикальному положенні і частково занурений у рідину. При зміні рівня рідини в апараті маса буя в рідині змінюється пропорційно зміні рівня. Перетворення ваги буя в сигнал вимірювальної інформації здійснюється за допомогою уніфікованих перетворювачів «сила—тиск» і «сила—струм». Відповідно до виду використовуваного перетворювача сили розрізняють *пневматичні* та *електричні буйкові рівнеміри*.

Схема буйкового пневматичного рівнеміра наведена на рис.7.3. Рівнемір працює в такий спосіб. Коли рівень рідини в апараті дорівнює початковому  $h_0$  (в окремому випадку  $h_0$  може дорівнювати 0), вимірювальний важіль 2 перебуває в рівновазі, тому що момент  $M_1$ , створюваний вагою буя  $G$ , зрівноважується моментом  $M_2$ , створюваним протизвагою  $N$ .

Коли рівень рідини стає більшим  $h_0$ , частина буя занурюється в рідину, при цьому вага буя зменшується, а отже, зменшується і момент  $M_1$ , створюваний буєм на важелі 2. Внаслідок того, що  $M_2$  стає більшим  $M_1$ , важіль 2 повертається навколо точки 0 за годинниковою стрілкою і прикриває заслінкою 7 сопло 8. Тому тиск у лінії сопла збільшується. Цей тиск надходить у пневматичний підсилювач 10, вихідний сигнал

якого є вихідним сигналом рівнеміра. Цей самий сигнал одночасно посиляється в сиффон негативного зворотного зв'язку 5. Під дією тиску  $P_{вих}$  виникає сила  $R$ , момент  $M_3$  якої збігається за напрямком з моментом  $M_1$ , тобто дія сили  $R$  спрямована на відновлення рівноваги важеля 2. Рух вимірювальної системи перетворювача відбувається до того часу, доти сума моментів всіх сил, що діють на важіль 2, не стане дорівнювати 0.

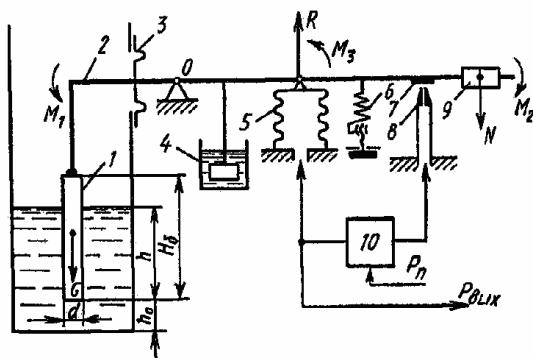


Рисунок 7.3 - Схема буйкового пневматичного рівнеміра

Крім розглянутої модифікації пневматичних рівнемірів, випускаються рівнеміри, оснащені уніфікованим перетворювачем «сила—тиск». Верхні межі вимірювання рівнеміра з уніфікованим електричним сигналом обмежені значеннями 0,02-16 м.

Буйкові засоби вимірювання рівня застосовуються при температурі робочого середовища від  $-40$  до  $+400^{\circ}\text{C}$  і тиску робочого середовища до 16 МПа. Класи точності буйкових рівнемірів 1,0 і 1,5.

## 7.5 Гідростатичні засоби вимірювання рівня

Вимірювання рівня гідростатичними рівнемірами зводиться до вимірювання гідростатичного тиску  $P$ , Па, створюваного стовпом  $h$  рідини постійної густини  $\rho$ , відповідно до рівності

$$P = \rho \cdot g \cdot h. \quad (7.2)$$

Вимірювання гідростатичного тиску здійснюється:

- манометром, який підключають на висоті, що відповідає нижньому граничному значенню рівня;
- диференціальним манометром, який підключають до резервуара на висоті, що відповідає нижньому граничному значенню рівня, і до газового простору над рідиною;
- вимірюванням тиску газу (повітря), який прокачується по трубці, опущеної в рідину, що заповнює резервуар, на фіксовану глибину.

На рис.7.4 а наведена схема вимірювання рівня манометром. Застосовуваний для цих цілей манометр 1 може бути будь-якого типу з відповідними межами вимірювання, обумовленими залежністю (7.2). Вимірювання гідростатичного тиску манометром може бути здійснено і за схемою, наведеною на рис.7.4 б. Відповідно до даної схеми про значення вимірюваного рівня роблять висновок про тиск повітря, що заповнює манометричну систему.

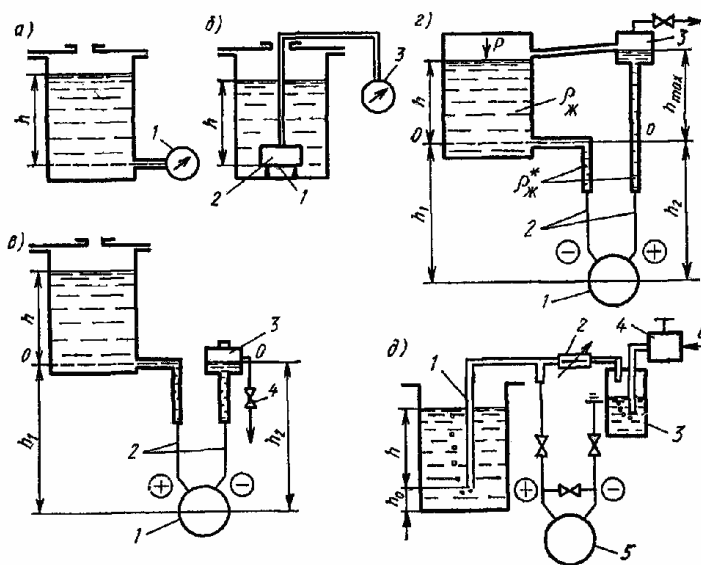


Рисунок 7.4 - Схеми гідростатичних рівнемірів

У нижній частині манометричної системи розміщена ємність 2, отвір якої перекрито тонкою еластичною мембраною 1, а у верхньому отворі приєднаний манометр 3. Застосування еластичної мембрани виключає розчинення повітря в рідині, однак вводить похибку у визначення рівня через пружність мембрани. Перевагою даної схеми вимірювання гідростатичного тиску є незалежність показань манометра від його розміщення щодо рівня рідини в резервуарі.

При вимірюванні рівня за розглянутими схемами мають місце похибки вимірювання, обумовлені класом точності манометрів і змінами щільності рідини.

Вимірювання гідростатичного тиску манометрами доцільно в резервуарах, що працюють при атмосферному тиску. У протилежному разі показання манометра складаються з гідростатичного і надлишкового тисків.

Для вимірювання рівня рідини в технологічних апаратах, які перебувають під тиском, широкого застосування набули диференціальні манометри. За допомогою диференціальних манометрів можливе також вимірювання рівня рідини у відкритих резервуарах, рівня поділу фаз і рівня розділення рідин.

Вимірювання рівня у відкритих резервуарах, які перебувають під атмосферним тиском, здійснюється за схемою, поданою на рис.7.4 в. Дифманометр 1 через імпульсні трубки 2 з'єднаний з резервуаром і зрівняльною посудиною 3. Зрівняльна посудина застосовується для компенсації статичного тиску, створюваного стовпом рідини  $h_1$  в імпульсній трубці. У процесі вимірювання рівень рідини в зрівняльній посудині повинен бути постійним. Вентиль 4 служить для підтримки постійного рівня в посудині 3. При рівності густини рідин, що заповнюють імпульсні трубки і резервуар, і за умови  $h_1 = h_2$  перепад тиску, Па, вимірюваний дифманометром,

$$\Delta P = \rho_{ж} \cdot g \cdot h. \quad (7.3)$$

При вимірюванні рівня в апаратах, які перебувають під тиском, застосовують схему, наведену на рис.7.4 з. Зрівняльну посудину 3 у цьому випадку встановлюють на висоту, що відповідає максимальному значенню рівня, і з'єднують із апаратом. Статичний тиск  $P$  в апараті надходить в обидві імпульсні трубки, тому вимірюваний перепад тиску  $\Delta P$ , Па, можна визначити за формулою

$$\Delta P = -\rho_{ж} \cdot g \cdot h. \quad (7.4)$$

Як бачимо з рівняння (7.4), шкала вимірювального приладу рівнеміра буде оборотною. У розглянутих схемах можуть бути використані дифманометри з уніфікованим струмовим або пневматичним сигналом.

Якщо рідина, що заповнює резервуар, агресивна, то підключення дифманометра до резервуара здійснюється через розділювальні посудини.

Рівнеміри, у яких вимірювання гідростатичного тиску здійснюється шляхом вимірювання тиску газу, який прокачується по трубці, зануреної на фіксовану глибину в рідину, що заповнює резервуар, називають *п'єзометричними*. Схема п'єзометричного рівнеміра наведена на рис.7.4 д. П'єзометрична трубка 1 розміщується в апараті, у якому вимірюється рівень. Газ надходить у трубку через дросель 2, що обмежує величину витрати. Для вимірювання витрати газу служить стаканчик 3 (витрата за допомогою стаканчика визначається за кількістю пухирців, які пробулькують через рідину, що заповнює його, за одиницю часу), а тиск підтримується постійним за допомогою стабілізатора тиску 4. Тиск газу після дроселя вимірюється дифманометром 5 і служить мірою рівня.

При подачі газу тиск у п'єзометричній трубці поступово підвищується до того часу, доти зазначений тиск не стане дорівнювати тиску стовпа рідини висотою  $h$ . Коли тиск у трубці стане дорівнювати гідростатичному тиску, з нижнього відкритого кінця трубки починає виходити газ. Витрату

підбирають такою, щоб газ залишав трубку у вигляді окремих пухирців (приблизно один пухирець у секунду).

При більшій витраті тиск, вимірюваний дифманометром, може бути трохи більшим, ніж гідростатичний, через додаткове падіння тиску, що виникає за рахунок тертя газу об стінки трубки при його проходженні. При дуже малій витраті газу збільшується інерційність вимірювання. Обидва фактори можуть збільшити похибку вимірювання рівня.

П'єзометричні рівнеміри дозволяють вимірювати рівень у широких межах (від декількох десятків сантиметрів до 10-15 м). При використанні для вимірювання тиску в п'єзометричній трубці дифманометра з уніфікованим вихідним сигналом мають відносну наведену похибку  $\pm(1,0-1,5)\%$ .

Точність вимірювання рівня п'єзометричними рівнемірами може бути істотно збільшена, якщо за засіб вимірювання гідростатичного тиску використати автоматичний цифровий манометр дискретно-безперервної дії.

Завдяки простоті реалізації на базі п'єзометричних рівнемірів, оснащених цифровими манометрами дискретно-безперервної дії, розроблені і вагоміри.

## 7.6 Електричні засоби вимірювання рівня

За видом чутливого елемента електричні засоби вимірювання рівня поділяють на *ємнісні* і *кондуктометричні*.

**Ємнісні рівнеміри.** У рівнемірах цього типу використовується залежність електричної ємності чутливого елемента первинного вимірювального перетворювача від рівня рідини. Конструктивно ємнісні чутливі елементи виконують у вигляді коаксіально розміщених циліндричних електродів або паралельно розміщених плоских електродів. Конструкція ємнісного чутливого елемента з коаксіально розміщеними електродами визначається фізико-хімічними властивостями рідини. Для неелектропровідних (діелектричних) рідин — рідин, що мають питому електропровідність менше  $10^{-6}$  См/м, застосовують рівнеміри, оснащені чутливим елементом, схеми

якого наведені на рис.7.5. Одиницею електропровідності в *SI* служить сименс (См) — величина, обернена ому (Ом).

Чутливий елемент (рис.7.5 *a*) складається із двох коаксіально розміщених електродів 1 і 2, частково занурених у рідину. Електроди утворюють циліндричний конденсатор, міжелектродний простір якого до висоти  $h$  заповнено рідиною, а простір  $H-h$  — парогазовою сумішшю. Для фіксування взаємного розміщення електродів передбачений ізолятор 3.

У загальному вигляді електрична ємність,  $\Phi$ , циліндричного конденсатора визначається рівнянням

$$C_{\Pi} = C_0 + \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot H}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)} \cdot \left[ 1 + (\varepsilon_{жс} - 1) \cdot \frac{h}{H} \right], \quad (7.5)$$

де  $\varepsilon$  - відносна діелектрична проникність міжелектродної речовини;

$\varepsilon_0$  — діелектрична проникність вакууму;

$\varepsilon_{жс}$  — діелектрична проникність рідини;

$C_0$  — ємність прохідного ізолятора (величина постійна);

$H$  — висота електродів;

$D, d$  - діаметри відповідно зовнішнього і внутрішнього електродів.

Для циліндричного конденсатора, міжелектродний простір якого заповнюється речовинами, які мають різні діелектричні проникності, відповідно до рис.7.5 *a* повна ємність  $C_{\Pi}$  визначається виразом

$$C_{\Pi} = C_0 + C_1 + C_2, \quad (7.6)$$

де  $C_0$  - ємність прохідного ізолятора;

$C_1$  — ємність міжелектродного простору, заповненого рідиною;

$C_2$  — ємність міжелектродного простору, заповненого парогазовою сумішшю.

Для виключення впливу температури рідини на результат вимірювання застосовують компенсаційний конденсатор (рис.7.5 в). Компенсаційний конденсатор 1 розміщується нижче ємнісного чутливого елемента 2 і повністю занурений у рідину. У певних випадках при сталості складу рідини його замінюють конденсатором постійної ємності.

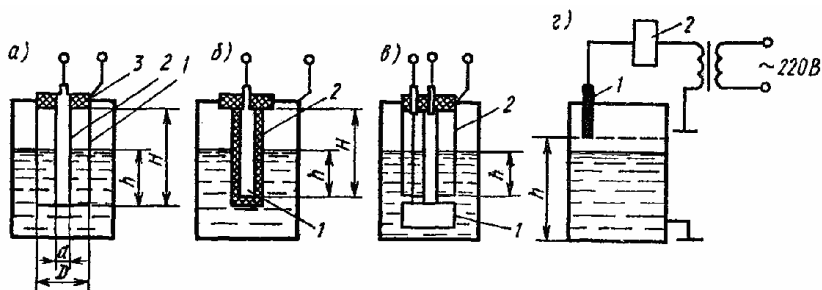


Рисунок 7.5 - Схеми електричних рівнемірів

Для вимірювання рівня електропровідних рідин — рідин з питомою провідністю більше  $10^{-4}$  См/м - застосовують рівнеміри, оснащені ємнісним чутливим елементом, зображеним на рис.7.5 б. Чутливий елемент являє собою металевий електрод 1, покритий фторопластовою ізоляцією 2. Електрод частково занурений у рідину. Як другий електрод використовується або стінка резервуара, якщо вона металева, або спеціальний металевий електрод, якщо стінка резервуара виконана з діелектрика.

Перетворення електричної ємності чутливих елементів у сигнал вимірювальної інформації здійснюється мостовим, резонансним або імпульсним методом.

У ємнісних рівнемірах перетворення ємності здійснюється імпульсним методом, у реалізації якого використовуються перехідні процеси, що проходять у чутливому елементі, який вмикається періодично до джерела постійної напруги.

Ємнісні рівнеміри випускаються класів точності 0,5; 1,0; 2,5. Їх мінімальний діапазон вимірювання становить 0-0,4 м, максимальний 0-20 м; тиск робочого середовища 2,5-10 МПа; температура від мінус 60 до плюс 100°C або від 100 до 250°C.

На базі розглянутих ємнісних чутливих елементів розроблені вибухобезпечні сигналізатори рівня поділу рідин «нафтопродукт-вода» та інших рідин з різними значеннями відносної діелектричної проникності. При довжині зануреної частини чутливого елемента 0,25 м похибка спрацьовування сигналізатора  $\pm 10$  мм.

Розроблено ємнісні рівнеміри сипучих середовищ. Верхні межі вимірювання рівнемірів обмежені значеннями 4-20 м. Клас точності 2,5.

**Кондуктометричні сигналізатори рівня.** Рівнеміри цього виду призначені для сигналізації рівня електропровідних рідких середовищ і сипучих середовищ із питомою провідністю більше  $10^{-3}$  См/м. На рис.7.5 з наведена схема сигналізатора верхнього граничного рівня рідини. Відповідно до схеми при досягненні рівнем значення  $h$  замикається електричний ланцюг між електродом 1 і корпусом технологічного апарата, при цьому спрацьовує реле 2, контакти якого увімкнені в схему сигналізації.

Принцип дії кондуктометричних сигналізаторів рівня сипучих середовищ аналогічний розглянутому.

Електроди, застосовувані в кондуктометричних сигналізаторах рівня, виготовляють зі сталі спеціальних марок або вугілля. Причому вугільні електроди використовуються тільки при вимірюванні рівня рідких середовищ.

## **7.7 Акустичні засоби вимірювання рівня**

На даний час запропоновані різні принципи побудови акустичних рівнемірів, з яких великого поширення дістав принцип локації.

Відповідно до цього принципу вимірювання рівня здійснюють за часом проходження ультразвуковими коливаннями відстані від випромінювача до межі поділу двох середовищ і зворотно до приймача випромінювання. Локація межі поділу двох середовищ здійснюється або з боку газу, або з боку робочого середовища (рідини або сипучого

матеріалу). Рівнеміри, у яких локація межі поділу двох середовищ здійснюється через газ, називають *акустичними*, а рівнеміри з локацією межі поділу двох середовищ через прошарок робочого середовища — *ультразвуковими*.

Перевагою акустичних рівнемірів є незалежність їх показань від фізико-хімічних властивостей і складу робочого середовища. Це дозволяє використовувати їх для вимірювання рівня неоднорідних, таких, що кристалізуються і випадають в осадок рідин. До недоліків необхідно віднести вплив на показання рівнемірів температури, тиску і складу газу.

Як правило, акустичні рівнеміри являють собою поєднання первинного, проміжного, а у певних випадках і передавального вимірювального перетворювача. Тому акустичні рівнеміри слід розглядати як частину вимірювальної системи з акустичними вимірювальними перетворювачами.

На рис.7.6 наведена схема акустичного рівнеміра рідких середовищ. Рівнемір складається з первинного *I* і проміжного *II* перетворювачів. Первинний перетворювач являє собою п'єзоелемент, що виконує одночасно функції джерела і приймача ультразвукових коливань. При вимірюванні генератор з певною частотою виробляє електричні імпульси, які перетворюються п'єзоелементом *I* в ультразвукові імпульси. Останні поширюються уздовж акустичного тракту, відбиваються від межі поділу рідина-газ і приймаються тим самим п'єзоелементом, що перетворює їх в електричні імпульси.

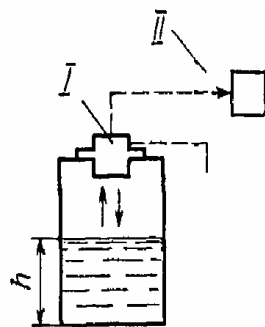


Рисунок 7.6 - Схема акустичного рівнеміра

Відстань між первинним і проміжним перетворювачами— не більше 25 м. Діапазони вимірювання рівня 0-3 м. Клас точності 2,5. Температура контролюваного середовища 10-50°C, тиск у технологічному апараті до 4 МПа.

Акустичні рівнеміри сипучих середовищ за принципом дії і будовою аналогічні акустичним рівнемірам рідких середовищ.

## 7.8 Радіоізотопні рівнеміри

Для безперервного вимірювання рівня рідин (агресивних, горючих та ін.) без зіткнення з ними можуть бути застосовані *радіоізотопні* рівнеміри, дія яких базується на пропущенні через резервуари з рідиною  $\gamma$ -променів радіоізотопів певних речовин. Якщо об'єкт вимірювання помістити між випромінювачем (радіоізотопом) і приймачем випромінювання (лічильником ядерних часток), розміщеними в одній горизонтальній площині, то в момент проходження через цю площину контрольованого рівня рідини буде відбуватися різка зміна інтенсивності  $\gamma$ -променів, які надходять на приймач, внаслідок зміни поглинальної здатності середовища. Ця властивість поглинання випромінювання використовується для синхронного переміщення (спостереження) випромінювача і приймача слідом за рівнем у резервуарі.

Радіоізотопні рівнеміри випускаються з діапазоном показань від 0-10 м. Швидкість спостереження за рівнем, що змінюється, становить 100 мм/хв. Основна абсолютна похибка приладу  $\pm 10$  мм. Рівнемір живиться від мережі змінного струму напругою 220 В, частотою 50 Гц. Споживана приладом потужність 50 В·А. Відстань, що допускається, між первинним і проміжним перетворювачем 50 м і між проміжним перетворювачем і вторинним приладом 1000 м.

Експлуатація радіоізотопних рівнемірів проводиться у строгій відповідності до інструкції підприємства-виробника і санітарних вимог. Через небезпеку для обслуговуючого персоналу радіаційного опромінення зазначені рівнеміри мають обмежене застосування.

## 8. АНАЛІЗ СКЛАДУ ГАЗІВ

### 8.1 Загальні положення

Вимірювання складу газового середовища проводиться в різних галузях промисловості, у наукових дослідженнях, при проведенні енергоаудиту, екологічних моніторингів навколишньої атмосфери та в інших випадках. Можна виділити такі основні напрями газового аналізу:

- визначення теплоти згорання газоподібного палива за відомим складом горючих компонентів газової суміші;

- контроль якості згорання палива за складом продуктів згорання. При повному згоранні палива в продуктах згорання на виході з теплових агрегатів повинні бути тільки негорючі компоненти, такі, як  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $N_2$  і  $O_2$ . Для правильного ведення процесу горіння палива необхідно підтримувати певне співвідношення між кількостями палива і повітря, які подаються у топковий простір агрегата. При недостатній кількості повітря в продуктах згорання з'являються такі горючі компоненти, як  $CO$ ,  $H_2$  та інші. Надлишкова кількість повітря забезпечує повне згорання палива, але вимагає додаткових витрат на нагрівання надлишкового об'єму повітря, що є баластом, який виносить із агрегата невикористане фізичне тепло. Необхідне співвідношення повітря-паливо може бути встановлене на основі газового аналізу;

- контроль складу технологічних газів, до яких відносять такі гази, як кисень, азот, аргон, водень, ендогаз, екзогаз та інші. Вони застосовуються для прискорення процесу виплавлення сталі і чавуну (кисень), при рафінуванні рідкого металу в робочому просторі агрегата або у ковші (аргон, азот), для захисту сталевих виробів від окислювання при нагріванні (ендогаз, аргон) і для інших технологічних процесів. Технологічні гази повинні мати певний склад (або чистоту), що визначає якість технологічних операцій;

- контроль складу повітряної атмосфери для визначення концентрації шкідливих для навколишнього середовища

газоподібних речовин, таких, як оксиди ( $NO$ ,  $NO_2$ ,  $SO_2$ ,  $SO_3$ ,  $CO_2$  і ін.), феноли, бензол, аміак, горючі вибухонебезпечні гази ( $CO$ ,  $CH_4$  та ін.).

Прилади, призначені для кількісного визначення складу газу, називаються **газоаналізаторами**. Залежно від призначення вони поділяються на *переносні* і *автоматичні* (стаціонарні).

Переносні газоаналізатори застосовуються в лабораторних умовах при виконанні дослідницьких робіт, при проведенні енергетичного аудиту технологічних систем, при випробуваннях і налагодженні різних промислових теплотехнічних установок (плавильних, нагрівальних і термічних печей, парових і водогрійних котлів, сушильних установок та ін.).

Автоматичні (стаціонарні) газоаналізатори призначені для безперервного автоматичного вимірювання вмісту одного або декількох компонентів у газовій суміші. На підставі безперервного контролю газового середовища в робочому просторі промислового агрегата може здійснюватися автоматизоване керування технологічним процесом.

Газоаналізатори залежно від способу визначення концентрації окремих компонентів газової суміші поділяють на такі:

- *хімічні* (хімічні властивості газових молекул);
- *теплові* (фізичні властивості газу);
- *магнітні* (магнітні властивості газу);
- *хроматографічні* (адсорбційні властивості газових молекул);
- *оптичні* (здатність поглинати електромагнітні хвилі);
- *спектрометричні* (спектральні властивості газу);
- *ємнісні* (діелектрична проникність середовища);
- *випарні* (ефект випаровування, кипіння і конденсації рідини);
- *іонізаційні* (іонізаційні властивості аналізованої речовини).

Газоаналізатори звичайно градируються у відсотках за об'ємом. Такий спосіб градування шкали газоаналізаторів зручний, тому що процентна складова окремих компонентів у загальному об'ємі залишається незмінною при змінюванні тиску і температури газової суміші.

## 8.2 Хімічні газоаналізатори

У хімічних газоаналізаторах визначення концентрації окремих компонентів газової суміші виконується методом поглинання цих компонентів хімічними реактивами. За зменшенням початкового мірного об'єму газу визначають склад даного компонента в газовій суміші.

Для багатьох компонентів газу розроблені селективні хімічні реактиви, які поглинають (реагують) тільки аналізований компонент. Непоглинений залишок аналізованого газу надходить у газовимірювальний пристрій, де визначається зменшення об'єму, що відповідає поглиненому компоненту. Цей метод застосовується як у переносних газоаналізаторах ручної дії, так званих приладах Орса, так і в автоматичних.

Найбільшого поширення дістали переносні газоаналізатори для визначення якості спалювання палива під час пусконаладжувальних робіт теплових агрегатів, які використовують тверде, рідке або газоподібне паливо. При цьому аналізуються три компоненти:  $CO_2$ ,  $O_2$  і  $CO$ . Такі газоаналізатори застосовуються також для контролю і градування автоматичних газоаналізаторів на ці самі компоненти.

Схема пристрою газоаналізатора для аналізу одного компонента з газової суміші наведена на рис.8.1. Аналізований газ із об'єкта 1 надходить у газоаналізатор по газовому тракту 2 при відкритому вентилі 4 і закритому вентилі 5. Мірна кількість газу (50 або 100 мл) надходить у вимірювальну бюретку 6 за рахунок розрядження, створюваного опусканням зрівняльної посудини 6. Дистильована вода з посудини 6 перетікає в посудину 7, а аналізований газ цілком заповнює вимірювальну бюретку 6, після чого кран 4 закривається, а кран 5 відкривається. Піднімаючи зрівняльну посудину 7, витісняють аналізований об'єм газу в посудину поглинання 3, заповнену селективним хімічним реактивом, що поглинає тільки один компонент із аналізованої газової суміші. Для збільшення поверхні контакту між аналізованим газом і реактивом

поглинальна посудина заповнена скляними трубками. Якщо прокачати аналізований газ кілька разів через реактив, можна домогтися повного поглинання даного компонента. Залишковий об'єм газу повертають у вимірювальну бюретку, що має градування в об'ємних відсотках від 0 до 100%. Рівень рідини у вимірювальній бюретці покаже на склад аналізованого компонента в газовій суміші. За необхідності визначити концентрацію інших компонентів, які знаходяться в газовій суміші, використовують кілька поглинальних посудин, заповнених відповідними реактивами, які вибірково поглинають аналізовані компоненти.

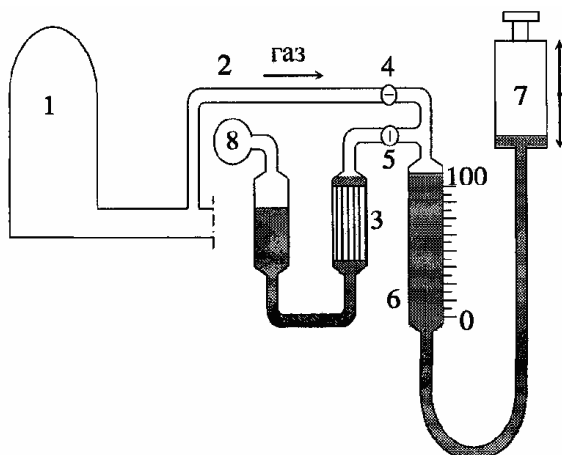


Рисунок 8.1 - Схема хімічного газоаналізатора

Недоліками методу є: неможливість вимірювання малих концентрацій, тому що ціна поділки вимірювальної бюретки становить 0,1 мл; періодичність дії становить 20-30 аналізів на годину; необхідність часткої заміни реактивів; неможливість використання в системах автоматичного регулювання.

### 8.3 Теплові газоаналізатори

У теплових газоаналізаторах для визначення концентрації певного компонента в газовій суміші використовуються його теплові властивості, такі, як теплопровідність

(термокондуктометричні), тепловий ефект реакції каталітичного окислювання (термохімічні) та ін.

**Термокондуктометричні газоаналізатори** дістали найбільшого поширення, робота їх заснована на різкій розбіжності коефіцієнта теплопровідності одного з компонентів у порівнянні з іншими компонентами аналізованої газової суміші. Так, наприклад, теплопровідність таких газів, як  $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $CH_4$ ,  $He$ ,  $Ar$  значно відрізняється від теплопровідності повітря, і якщо в повітряному середовищі є один із цих компонентів, то зміна величини теплопровідності газової суміші буде визначатися зміною складу даного аналізованого компонента.

Аналіз багатокомпонентної газової суміші за її теплопровідністю можна робити за умови, що всі компоненти газової суміші, крім тих, що визначаються, мають приблизно однакову теплопровідність. Якщо в газовій суміші є компоненти, які можуть впливати на теплопровідність суміші і концентрацію яких визначати не потрібно, то ці компоненти з газової суміші повинні бути вилучені перед початком аналізу. Так, наприклад, при вимірюванні концентрації  $CO_2$  у димових газах необхідно видалити такі компоненти, як  $H_2$  і  $SO_2$ , які знаходяться в невеликій кількості, але впливають на загальну теплопровідність.

У теплових газоаналізаторах для визначення концентрації окремих компонентів використовуються мостові схеми, у яких плечима мосту є платинові спіралі, нагріті до температури  $100^{\circ}C$  і поміщені в газові камери. Газоаналізатор складається із чотирьох газових камер, дві з яких  $R_1$  і  $R_3$  є робочими, через які безупинно прокачується аналізований газ (рис.8.2). Дві інші герметичні газові камери  $R_4$  і  $R_2$  є порівняльними, у яких перебуває газ постійного складу. Так, наприклад, у газоаналізаторах, призначених для визначення  $CO_2$  у газовій суміші, порівняльним газом є повітря.

При прокачуванні через протилежні газові камери  $R_1$  і  $R_3$  аналізованого газу, який містить, наприклад,  $CO_2$  і концентрацію якого треба визначити, змінюється

теплопровідність газового простору, розміщеного між платиновим проводом і стінкою камери. Зі збільшенням концентрації  $CO_2$  у газовій суміші зменшується теплопровідність газу, погіршується теплообмін, що приводить до збільшення температури платинового проводу в камерах  $R_1$  і  $R_3$ . Виниклий розбаланс мосту за величиною напруги між точками «а» і «б» пропорційний величині певної складової в аналізованому газі.

Границі основної похибки, яка допускається, термокондуктометричних газоаналізаторів для визначення  $CO_2$  у газовій суміші не перевищують 2-2,5% діапазону вимірювання. Зміна показань газоаналізаторів при змінюванні температури навколишнього повітря від 20 до 50°C не перевищує +2-2,5%

Термокондуктометричний принцип вимірювання (вимірювання за теплопровідністю) застосовується для визначення (крім  $CO_2$ ) таких компонентів, як  $H_2$ ,  $SO_2$ ,  $Ar$ ,  $O_2$ ,  $NH_3$  у топкових газах і в газах при виробництві аміаку, хлору, аргону, сірчаної кислоти, а також для визначення концентрації водню в системі водневого охолодження турбогенераторів на теплових електростанціях. Недоліками таких типів газоаналізаторів є великий час установлення показань (інерційність), що досягає 120 секунд, і підвищена похибка (до 5%).

**Термохімічний аналізатор** працює за принципом використання теплового ефекту хімічної реакції, що має перебіг між обумовленим компонентом аналізованої суміші і допоміжним реагентом. Сигналом вимірювальної інформації в термохімічних аналізаторах є температура, значення якої

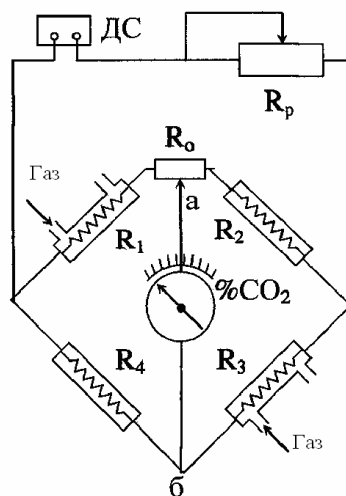


Рисунок 8.2 - Схема термокондуктометричного газоаналізатора

залежить від теплового ефекту хімічної реакції. Термохімічний принцип аналізу використовується для створення аналізаторів газів і рідин. Для створення термохімічних газоаналізаторів використовуються хімічні реакції окислювання на каталітично активній поверхні, у полум'ї та у газових потоках. Для термохімічних газоаналізаторів рідин застосовуються реакції розбавлення (розведення), нейтралізації і змішування, а також реакції з використанням специфічних реагентів.

На рис.8.3 подана схема *термохімічного газоаналізатора*, у роботі якого використовується тепловий ефект реакції окислювання горючих газів на каталітично активній поверхні. У термохімічному аналізаторі (рис.8.3) аналізований газ повітряним ежектором (струминним насосом) 3 прокачується через кран 10 і камеру 1. У камері розміщені вибухозапобіжні сітки 2 і 7, вимірювальний 4 і порівняльний 5 чутливі елементи. Останній закритий ковпачком 6 і служить для усунення впливу зміни навколишньої температури на сигнал газоаналізатора. Як чутливі елементи в цих газоаналізаторах використовуються платинові проводки з активованою поверхнею. Чутливі елементи в термохімічних газоаналізаторах нагріваються струмом електричного

мосту 8 до температури 200-500<sup>0</sup>С. При згоранні на поверхні вимірювального чутливого елемента горючого компонента, який потрібно визначити, температура елемента збільшується, що викликає збільшення електричного опору

платинового проводка, а це, у свою чергу, спричиняє розбаланс електричного мосту, вимірюваний вторинним приладом 9.

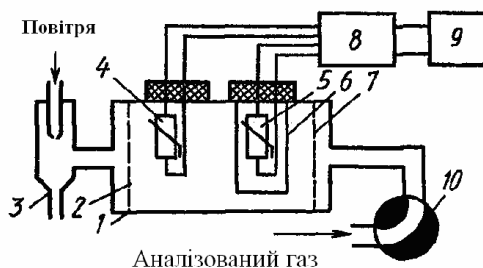


Рисунок 8.3 - Схема термохімічного газоаналізатора

Газоаналізатор, показаний на рис.8.3, у цей час є одним з найпоширеніших у промисловості засобів аналітичної техніки з тієї причини, що він використовується як сигналізатор вибухонебезпечних концентрацій газів і пари у повітрі. Значення, які сигналізуються, 5-50% від нижньої межі вибуху для горючих газів, пари і 5-20% — для сумішей повітря-водень, час реакції 30 с.

## 8.4 Магнітні газоаналізатори

В основу роботи магнітних газоаналізаторів покладені різні явища, пов'язані із взаємодією обумовленого компонента аналізованої (у загальному випадку багатокомпонентної) газової суміші з магнітним полем.

Гази, які втягуються в магнітне поле, називають *парамагнітними*, а ті гази, які виштовхуються з магнітного поля, — *діамагнітними*. Кількісно магнітні властивості газів визначаються величиною, так званою магнітною сприйнятливістю. Магнітна сприйнятливість парамагнітних газів є позитивною величиною, діамагнітних газів - негативною. Вона має властивість адитивності. Переважна більшість газів і пари є діамагнітними.

Магнітні газоаналізатори використовуються для визначення тільки концентрації кисню в газовій суміші, тому що кисень на відміну від інших газів має сильні магнітні властивості, який є *парамагнітною речовиною*. Якщо відносно магнітну сприйнятливість кисню взяти за одиницю, то ця величина для всіх інших газів на два порядки менша, ніж у кисні. Тобто всі гази, крім кисню, є практично немагнітними речовинами. Таким чином, магнітні властивості газової суміші залежать від концентрації кисню в газі, а такі гази, як  $NO$  і  $NO_2$ , які проявляють магнітні властивості, практично не впливають на магнетизм газової суміші через їх малі концентрації.

Існує кілька методів вимірювання магнітної сприйнятливості газової суміші, що містить кисень. Найбільшого поширення дістав метод, що називається

термомагнітною конвекцією. У магнітному газоаналізаторі аналізований газ під дією магнітного поля втягується в спеціальну вимірювальну камеру, у якій знаходиться чутливий елемент, що нагрівається електричним струмом. Газ, зіштовхуючись із чутливим елементом, нагрівається, і кисень втрачає свої магнітні властивості. Внаслідок цього нагрітий газ виштовхується з камери, розміщеної в магнітному полі, холодним газом, і таким чином виникає безперервний потік газу через вимірювальну камеру.

На рисунку 8.4 наведена схема магнітного газоаналізатора, у якому використовується схема вимірювання на основі нерівноважного мосту. Мостова схема живиться постійним струмом від батареї  $B$ , підключеної до живильної діагоналі 1-2. Всі плечі мосту  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$  являють собою платинові нагрівачі, виконані із проводу діаметром 0,02 мм, які намотані на скляний стрижень.

Через дві вимірювальні камери  $R_2$  і  $R_3$  безупинно прокачується аналізований газ, який містить кисень. Одна з камер  $R_2$  поміщена в поле постійного магніту. Чим більше склад кисню в газовій суміші, тим більший об'єм газу втягується в магнітне поле, проходячи через нагрівач  $R_2$ . Таким чином, температура нагрівача  $R_2$  буде визначатися вмістом кисню в аналізованому газі. Більший об'єм газу, що проходить через магнітну камеру  $R_2$  у порівнянні з камерою  $R_3$ , знижує температуру нагрівача  $R_2$  і зменшує його електричний опір. Виниклий розбаланс мосту при цьому, тобто  $R_1 \cdot R_3 > R_4 \cdot R_2$ , приводить до появи різниці потенціалів між точками 3 і 4, який

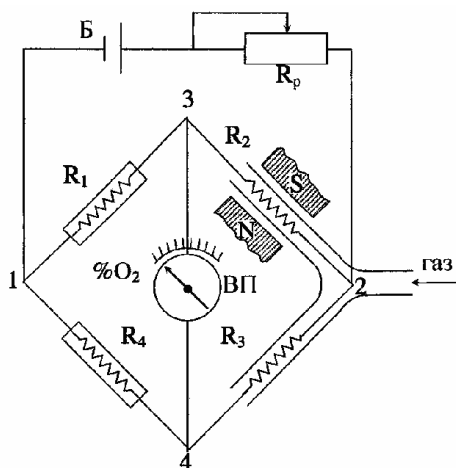


Рисунок 8.4 - Схема магнітного газоаналізатора

вимірюється вольтметром ВП, градуированому за відсотковим складом кисню в газовій суміші.

Одномостова вимірювальна схема магнітного газоаналізатора застосовується як у переносному, так і в стаціонарному варіанті для вимірювання вмісту кисню в продуктах згорання нагрівальних і плавильних печей, а також котельних установок. Гранична похибка приладу залежить від діапазону вимірювання і перебуває в інтервалі від +2 до  $\pm 10\%$ .

## 8.5 Дифузійні газоаналізатори

Принцип дії дифузійних газоаналізаторів базується на процесі переносу речовини (компонента суміші) під дією градієнта його концентрації. Цей перенос може відбуватися при зіткненні речовин одна з одною (дифузія) або крізь тверду речовину (трансфузія, або проникнення). Процес переносу речовини пов'язаний з хаотичним тепловим рухом молекул, що відбувається у напрямку зменшення концентрації речовини і якій веде до його рівномірного розподілу за займаним об'ємом. Проникнення через тверде тіло визначається наявністю розривів у їх кристалічних решітках, нерегулярних щілин і пор у макроструктурі твердої речовини або розчиненням газів і пари у твердій речовині. Найбільш швидко процес переносу речовини під дією градієнта концентрації відбувається в газах, що багато в чому визначає використання цього явища для автоматичного контролю концентрації газів.

Інтенсивність взаємного проникнення двох дотичних газів визначається коефіцієнтом їх взаємної дифузії, що залежить від молекулярних мас цих газів і полярності їх молекул. Коефіцієнт взаємної дифузії збільшується з підвищенням температури і зменшується з підвищенням тиску.

При взаємній дифузії двох газових об'ємів незалежна дифузія компонентів багатокомпонентної суміші спостерігається тільки при її попередньому 3 - 4-кратному розведенні.

На рис.8.5 показана схема дифузійного мембранного аналізатора концентрації водню. У цьому аналізаторі камери 2 і 1 розділені тонкою (10-20 мкм) мембраною зі сплаву паладію зі сріблом. Аналітичний пристрій аналізатора термостатується при температурі 45°C. Через камеру 2 з постійною об'ємною витратою прокачується аналізований газ, який містить водень, а через камеру 1 — допоміжний газ (наприклад, повітря або азот), що попередньо проходить через камеру 4. У камері 1 розміщені вимірювальний  $R_v$ , а в камері 4 — порівняльний  $R_{пор}$  терморезистори. Ці терморезистори підключені до нерівноважного мосту 5 і утворюють термокондуктометричний детектор. При роботі аналізатора через мембрану з камери 2 у камеру 1 дифундує тільки водень, що додається до допоміжного газу і змінює теплопровідність газового потоку, який обминає вимірювальний терморезистор  $R_v$ . Це обумовлює зміну сигналу нерівноважного мосту 5, сигнал вимірюється і реєструється самописним потенціометром 6.

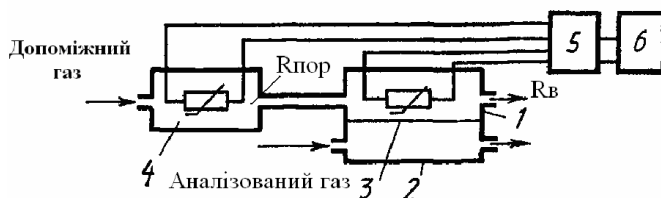


Рисунок 8.5 - Схема дифузійного газоаналізатора

Дифузійні газоаналізатори характеризуються на порядок більшою селективністю при вимірюванні концентрації необхідного компонента, ніж термохімічні, за рахунок істотно меншого впливу на їх показання змін концентрацій невизначуваних компонентів багатоконцентних газових сумішей.

## 8.6 Сорбційні газоаналізатори

В основу роботи сорбційних газоаналізаторів покладені різні ефекти, що супроводжують процес сорбції (сорбція —

поглинання твердим тілом або рідиною речовини з навколишнього середовища). Це явище давно використовується в аналітичному контролі (наприклад волосяні вимірювачі вологи повітря, у яких сигнал вимірювальної інформації формується за рахунок зміни довжини волосся зі зміною вологості повітря). У сорбційних газоаналізаторах використовуються *механічні, теплові, оптичні та електричні ефекти*, що супроводжують процес адсорбції газів і пари.

**Дилатометричний газоаналізатор** (рис.8.6 а) призначений для вимірювання концентрації водню. У камері 2, через яку прокачується аналізований газ, розміщена тонкостінна трубка 1, виготовлена з паладію. Водень, який знаходиться в аналізованому газі, розчиняється в паладії. При цьому довжина трубки 1 за рахунок ефекту набрякання зі зростанням концентрації водню збільшується, тому що верхній кінець трубки 1 закріплений на корпусі 2, то її нижній кінець вільно переміщається. За допомогою ємнісного, індуктивного або пневматичного перетворювача переміщень 4 виміряються переміщення пластини 3, закріпленої на нижньому кінці трубки 1. Ці переміщення пов'язані з концентрацією водню в багатокомпонентних газових сумішах.

Відомі сорбційні дилатометричні газоаналізатори призначені для вимірювання концентрації пропану, бутану, діоксиду вуглецю або інших технічних газів, у яких замість паладієвої трубки використовується стрижень, виготовлений з адсорбенту (активоване вугілля, алюмогель, силікагель).

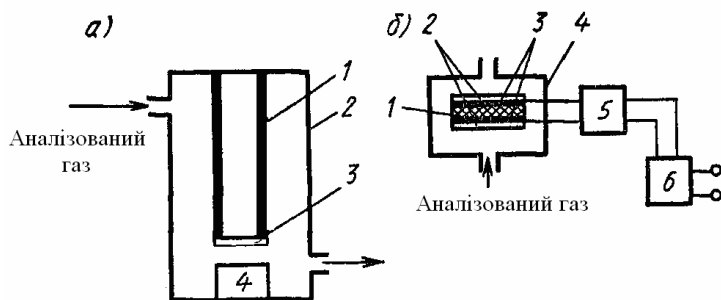


Рисунок 8.6 - Схеми сорбційних газоаналізаторів

На рис.8.6 б показана схема газоаналізатора, базованого на визначенні маси обраного компонента аналізованої суміші, який поглинається. Останнє здійснюється шляхом вимірювання частоти або амплітуди коливань п'єзоелектричної (звичайно кварцової) пластини 1 (розмірами  $12 \times 12 \times 0,2$  мм), на поверхні якої розміщені електроди 3 і нанесений шар сорбенту 2. Пластина увімкнена в коливальний контур високочастотного (5-15 МГц) генератора 5 і розміщена в камері 4, через яку прокачується аналізований газ. При зміні концентрації обраного компонента, що селективно поглинається шаром сорбенту 2, змінюється маса останнього, яка змінює частоту коливання пластини, а отже, і частоту коливань генератора 5. Вихідний сигнал цього генератора надходить у змішувач 6. Частота биття, що виникає на виході змішувача, визначається з рівняння

$$\Delta f = \frac{f^2}{N \cdot \rho \cdot S} \cdot m, \quad (8.1)$$

де  $f$  — власна частота коливань пластини із шаром сорбенту;

$N$  - частотний коефіцієнт, що залежить від типу зрізу кристала кварцу і форми пластини;

$\rho$  і  $S$  — густина і площа поверхневого шару пластини;

$m$  — маса сорбованої речовини.

Розглянутий газоаналізатор може використовуватися для вимірювання концентрації  $H_2$ ,  $NO_2$ ,  $SO_2$ ,  $NH_3$ ,  $H_2S$  і пари  $HCl$ ,  $Hg$ ,  $H_2O$  ароматичних вуглеводнів та інших речовин при відповідному підборі шару сорбенту. За шар сорбенту звичайно використовуються різні рідкі фази, які використовуються в газорідинній хроматографії. При використанні газоаналізатора для вимірювання концентрації пари води, тобто як гігрометра, шар сорбенту виконують із діоксиду кремнію, пентоксиду фосфору та інших гігроскопічних полімерів і природних смол.

Інтенсивно розвивається напрямок автоматичного газового аналізу. Це такі методи і засоби, що базуються на використанні

електричних явищ, які супроводжують процес сорбції. В основу роботи *сорбційних електрокондуктометричних* (кондуктометричних) газоаналізаторів покладено вимірювання провідності адсорбентів, виготовлених у вигляді гранул, пластин або плівок. Провідність істотно змінюється при сорбції газів або пари, як правило, матеріали, з яких виготовляють зазначені елементи, є напівпровідниками. При проходженні через камеру газоаналізатора аналізованого газу обраний компонент поглинається плівкою сорбенту і змінює її електричний опір.

На зазначеному принципі працюють *хроматографічні газоаналізатори*. Газова хроматографія є досить перспективним фізико-хімічним методом поділу газових сумішей на складові їх компонентів.

Хроматографічні газоаналізатори, побудовані на цьому принципі, служать для визначення складу у димових газах горючих компонентів ( $H_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$  та ін.), що характеризують хімічну неповноту палива, також і *негорючих компонентів* ( $CO_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$  та ін.). Дія цих приладів базується на адсорбційному способі поділу проби газової суміші при пропущенні її разом з потоком допоміжного газу (газу-носія) через шар пористої речовини (адсорбенту) і подальшому почерговому вимірюванню вмісту кожного компонента, що виділився, електричним методом.

## 8.7 Випарні і конденсаційні аналізатори

За принципом дії випарні і конденсаційні газоаналізатори відносять до теплових засобів вимірювання, тому що в їх роботі використовуються теплові ефекти випаровування, кипіння і конденсації рідини.

Одним з найдавніших і поширених газоаналізаторів є *психрометричний*, або *психрометр*. Дія його базується на вимірюванні змін температури рідини при її випарюванні в аналізований газ, який містить компонент пари цієї рідини. Психрометри можуть використовуватися для вимірювання

концентрації пари будь-яких рідин у газах, однак найбільш широко вони застосовуються для вимірювання концентрації пари води, тобто як гігрометри.

Концентрацію пари рідини в газах прийнято характеризувати *абсолютною* або *відотною* вологістю.

**Абсолютна вологість** визначається як маса пари рідини в одиниці об'єму сухого або вологого газу за нормальних умов.

**Відносна вологість**, або ступінь насичення газу парами рідини, визначається як відношення маси пари в одиниці об'єму до максимально можливої маси пари в одиниці об'єму при тій самій температурі, вираженої в %:

$$\varphi = \frac{A}{A_n} \cdot 100, \quad (8.2)$$

де  $A$  — значення абсолютної вологості газу при даній температурі;

$A_n$  — максимально можливе значення абсолютної вологості при даній температурі, що відповідає насиченню.

На практиці відносну вологість із достатньою точністю визначають із виразу

$$\varphi = \frac{P}{P_n} \cdot 100, \quad (8.3)$$

де  $P$  — парціальний тиск пари рідини в газовій суміші при даній температурі і нормальному тиску;

$P_n$  — тиск насиченої пари рідини за тих самих умов.

**Психрометричний (випарний) аналізатор**, схема якого показана на рис.8.7, призначений для вимірювання відносної вологості повітря.

Повітря за допомогою вентилятора 1 зі швидкістю 3-4 м/с прокачується через фільтри 4 і 5 камер 2 і 6, у яких розміщені платинові терморезистори 3 і 8. Терморезистор 3 служить для вимірювання температури повітря, його називають сухим термометром.

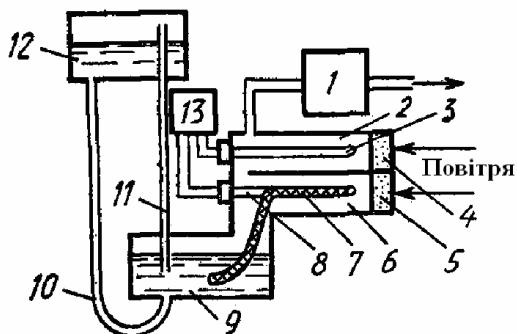


Рисунок 8.7 - Схема випарного аналізатора

Термометр 8, який обгорнуто у бавовняну тканину 7, кінець її занурений у ванночку 9, заповнену дистильованою водою. Цей терморезистор називають мокрим термометром. При випарюванні води з поверхні терморезистора 8 в потоці повітря температура його зменшується, причому тим більше, чим менше його вологість. Опір терморезисторів 3 і 8 вимірюється спеціальним вторинним приладом 13. Для підтримування у ванночці певного рівня води служить бачок 12 із трубками 10 і 11. У міру випарювання води із терморезистора 8 її рівень у ванночці 9 знижується, відкривається нижній кінець трубки 11, через нього в бачок надходить повітря, і з бачка у ванночку 9 стікає вода. Коли вода перебиває нижній отвір трубки 11 у газовому просторі бачка поступово (у міру витікання з нього води) утворюється розрядження. Вода з бачка впливає до того часу, доти це розрядження стане достатнім для зрівноважування гідростатичного тиску, обумовленого різницею рівнів води в бачку і ванночці. Діапазон вимірювання психрометра 20-100% відносної вологості, класи точності 4-6; час реакції 3-5 хв.

**Конденсаційний газоаналізатор** (рис.8.8). У цей час такі газоаналізатори використовуються в основному як гігрометри. В основу їх роботи покладено вимірювання температури, при якій аналізований газ досягає при незмінному тиску стану насичення.

З нього випадає конденсат (роса) рідини, концентрація пари якої в газі вимірюється. Цю температуру прийнято називати температурою точки роси (або інею), а аналізатори, що базуються на

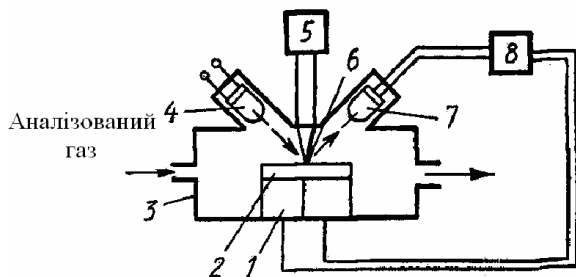


Рисунок 8.8 - Схема конденсаційного аналізатора

вимірюванні цієї температури, — *гігрометрами точки роси*. Аналізований газ із постійною об'ємною витратою прокачується через камеру 3, у якій розміщений напівпровідниковий термоелемент (термопара) 1, який є холодильником. До холодного спаю цієї термопари припаяне металеве дзеркальце 2. До гарячого спаю термопари подається напруга постійного струму від автоматичного регулятора 8. При проходженні через напівпровідникову термопару постійного струму її холодний спай, а з ним і дзеркальце 2 охолоджуються. Охолодження відбувається до того часу, доти на поверхні дзеркальця не утвориться конденсат (іній). При цьому світловий потік, що надходить від лампи 4 до фотоприймача 7, зменшується за рахунок розсіювання на поверхні дзеркальця, покритого росою. Це викликає зменшення входного сигналу регулятора і вимикання або зменшення напруги живлення термопари 1. За рахунок теплоти, внесеної в камеру 3 потоком аналізованого газу, дзеркальце і холодний спай поступово нагріваються. При цьому конденсат з поверхні дзеркальця випаровується, і світловий потік, що надходить до фотоприймача, відновлюється до початкового значення. Регулятор 8 вмикає або збільшує напругу живлення термопари, і холодний спай її починає знову охолоджувати. Таким чином, температура дзеркальця автоматично підтримується такою, що дорівнює температурі точки роси. Ця температура перетвориться в уніфікований

сигнал за допомогою термоелектричного чутливого елемента 6 і перетворювача 5. Гігрометри точки роси звичайно мають діапазон вимірювання від  $-80$  до  $+40^{\circ}\text{C}$  при тиску аналізованого газу  $0,05\text{--}10$  МПа. Абсолютна похибка вимірювання  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ .

Відомі конструкції конденсаційних газоаналізаторів, що забезпечують вимірювання температури точки роси по воді, вуглеводням і т.п.

## 8.8 Діелькометричні аналізатори

Принцип дії діелькометричних аналізаторів полягає у вимірюванні діелектричної проникності середовища, що заповнює електричний конденсатор.

Ці аналізатори застосовуються для аналізу складу бінарних або псевдо-бінарних сумішей газів і рідин. На рис.8.9 показана схема діелькометричного гігрометра, у якому вимірювання діелектричної проникності використовується разом з

явищем сорбції пари води з аналізованого газу. У цьому гігрометрі аналізований газ прокачується з постійною об'ємною витратою через камеру 1, у якій розміщений алюмінієвий стрижень 2, на поверхні якого зроблена нарізь і нанесено оксид алюмінію. У нарізь покладено нікелевий дріт 3. Стрижень 2 і дріт 3 утворюють конденсатор, ємність якого збільшується при сорбції пари води оксидом алюмінію. Остання викликає збільшення ємності конденсатора, що вимірюється нерівноважним електричним мостом змінного струму і вторинним приладом (вольтметром) 4. Є схеми діелькометричних гігрометрів з рівноважним електричним мостом.

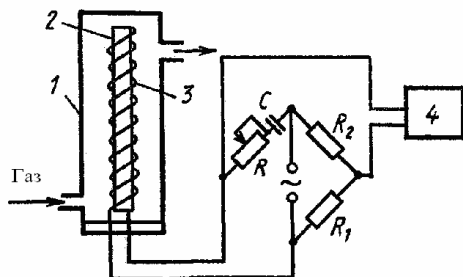


Рисунок 8.9 - Схема діелькометричного аналізатора

## 8.9 Оптичні аналізатори

Для вимірювання концентрацій складових газів використовується ефект випромінювання практично всього спектра електромагнітних коливань, починаючи з радіохвиль і закінчуючи  $\gamma$ -випромінюваннями. Найбільш широкого застосування набули випромінювання інфрачервоних, видимих і ультрафіолетових ділянок спектра. Аналізатори, що працюють із випромінюваннями цих ділянок спектра, називають *фотометричними*. В аналізаторах використовуються явища поглинання, відбиття і розсіювання електромагнітного випромінювання аналізованою речовиною. Аналізатори, що ґрунтуються на явищі поглинання електромагнітного випромінювання, називають *абсорбційно-оптичними* і *абсорбційно-метричними*. Аналізатори рідин і газів, що базуються на явищі поглинання електромагнітного випромінювання видимої частини спектра, називаються *фотоколориметрами*.

Через те, що світло різних довжин хвиль має різні коефіцієнти переломлення при розробленні фотоколориметричних аналізаторів, для забезпечення необхідної чутливості застосовують фільтри, що дозволяють використовувати ту частину спектра, яка значною мірою змінюється при проходженні через аналізоване середовище.

Схемні і конструктивні виконання аналізаторів, у роботі яких використовується випромінювання видимої частини спектра, досить різноманітні. Колориметричні аналізатори класифікують залежно від кількості джерел і приймачів випромінювання, кількості використовуваних променів і наявності попереднього перетворення аналізованої речовини. На рис.8.10 наведена схема колориметричного газоаналізатора.

**Колориметричний аналізатор** має одне джерело (лампа 1) і два приймачі (фотоелементи 6 і 9) випромінювання і є двопроменевим. Випромінювання, що виходить із джерела 1, пройшовши через фільтр 2, поділяється на два промені, які через дзеркала 4 надходять у вимірювальну 5 і порівняльну 10 кювети.

Через вимірювальну кювету прокачується аналізована речовина, а порівняльна звичайно заповнюється зразковою речовиною (речовина з відомої або тієї, що дорівнює нулю концентрацією обумовленого компонента). Фотоелементи 6 і 9 увімкнені на вхід підсилювача 7 зустрічно, тому різниця їх сигналів, перетворена в цьому підсилювачі в уніфікований сигнал, однозначно залежить від концентрації обумовленого компонента в аналізованій речовині. Вихідний сигнал підсилювача 7 вимірюється і реєструється вторинним приладом 8.

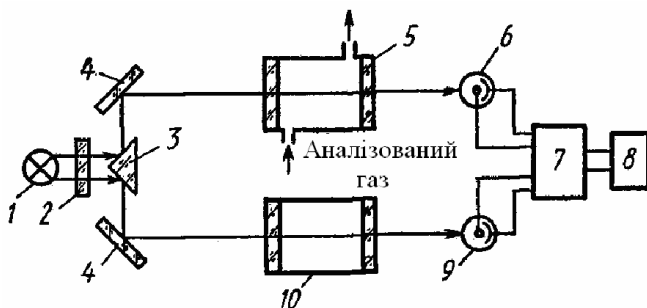


Рисунок 8.10 - Схема колориметричного аналізатора

Оптичні аналізатори, у роботі яких використовується випромінювання видимої частини спектра, залежно від схеми і конструкції мають класи точності 2-20.

## 8.10 Іонізаційні газоаналізатори

Принцип дії цих аналізаторів полягає в іонізації аналізованої речовини і вимірюванні іонного струму. На практиці аналітичного контролю в цей час застосовуються в основному іонізаційні газоаналізатори, що розрізняються за способом іонізації аналізованого газу (іонізація радіоактивним випромінюванням, фотоіонізація, поверхнева іонізація, іонізація в тліючому розряді і т.д.).

На рис.8.11 наведена схема іонізаційного газоаналізатора. Аналізований газ надходить у камеру 1 (так звану іонізаційну) з постійною об'ємною витратою. Під дією джерела випромінювання 2 ( $\alpha$ - або  $\beta$ -променів) молекули аналізованої бінарної або псевдобінарної газової суміші іонізуються. Між джерелом 2 і анодом 3, який закріплено на фторопластовому ізоляторі 4, під дією електричного потенціалу стабілізованого джерела 7 проходить іонний струм. Значення цього струму вимірюється електрометричним перетворювачем 5, вихідний уніфікований сигнал якого посилюється на потенціометр 6.

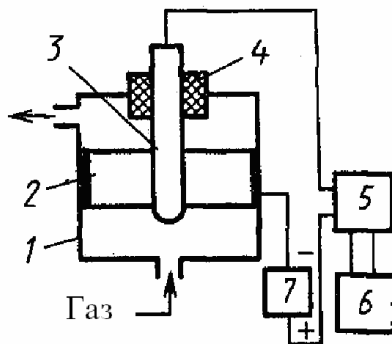


Рисунок 8.11 - Схема іонізаційного газоаналізатора

Ефективний перетин іонізації газів є тією властивістю, яка визначає можливість вимірювання концентрації обумовленого компонента відповідно до обмірюваної напруги. Напруга між джерелом і колектором 3 становить 100-300 В.

## 8.11 Полум'яні іонізаційні і фотометричні газоаналізатори

Хімічна реакція окислювання горючих речовин, що проходить в полум'ї, супроводжується рядом ефектів, які використовуються для одержання вимірювальної інформації. Ефекти іонізації і виникнення електромагнітного випромінювання застосовуються для вимірювання концентрацій певних речовин у багатокомпонентних сумішах.

**Полум'яний іонізаційний газоаналізатор** (рис.8.12 а), у ньому аналізований газ і водень, що служить для підтримки полум'я, подаються із блока підготовки газів 1 з постійними

об'ємними витратами в мініатюрний пальник 3. Останній встановлено в корпусі 4 на ізоляторі 6.

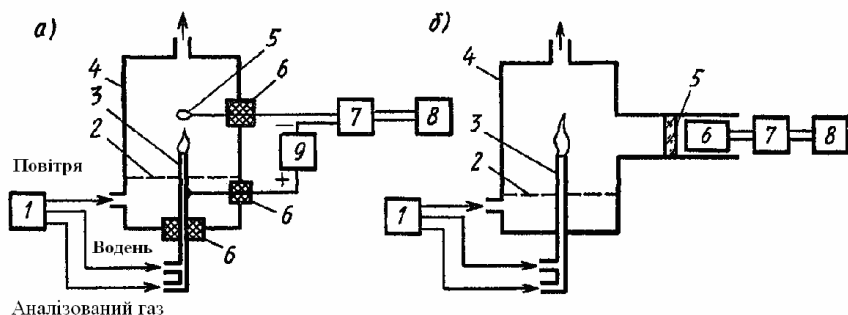


Рисунок 8.12 - Схеми полум'яних газоаналізаторів

Повітря, необхідне для горіння водню з постійною об'ємною витратою, надходить у камеру 4 через розподільник 2. Над пальником на фторопластовому ізоляторі 6 установлений колекторний електрод 5 із платини або ніхрому. Між пальником 3 і колекторним електродом 5 прикладається електричне поле від джерела 9 напругою 150-200 В/см. При згоранні чистого водню майже не утвориться іонів. Органічні речовини (гази і пари), що знаходяться в аналізованому газі, потрапляючи у водневе полум'я, згорають і обумовлюють різке збільшення іонного струму. Останній перетворюється в уніфікований сигнал перетворювача 7 з більшим вхідним опором, а сигнал останнього сприймається автоматичним потенціометром 8.

**Полум'яний фотометричний газоаналізатор** (рис.8.12 б) працює на ефекті зміни інтенсивності і спектрального складу випромінювання полум'я. Схема подачі газів у цьому аналізаторі аналогічна розглянутій (рис.8.12 а). При згорянні в полум'ї пари фосфоро-, сірково- або галогенопохідних речовин, які знаходяться в аналізованому газі, істотно змінюється інтенсивність випромінювання. Фотопотік надходить у фотомножник 6 через монохроматичний фільтр 5. Сигнал фотомножника перетворюється в уніфікований сигнал за допомогою перетворювача 7 і сприймається автоматичним потенціометром 8. Полум'яні фотометричні газоаналізатори

можуть застосовуватися для аналізу рідких речовин. Із цією метою газоаналізатор виконується зі спеціальним пальником, який аналізовану ріdkу речовину перед згорянням розпорошує потоком газу.

## 8.12 Хемілюмінесцентні газоаналізатори

Принцип дії даних газоаналізаторів базується на явищі люмінесценції, що супроводжує певні хімічні реакції. Таку люмінесценцію називають хемілюмінесценцією.

У *хемілюмінесцентному газоаналізаторі* (рис.8.13) аналізований газ і повітря з постійними об'ємними витратами із блока підготовки газів 1 надходять у реакційну камеру 2. Повітря попередньо проходить через озонатор 7, де під дією бар'єрного високовольтного розряду в повітрі утворюється озон. При взаємодії в камері 2 озону з певним компонентом аналізованої суміші утворюються продукти реакції в збудженому стані.

При переході їх у стійкий стан відбувається випромінювання квантів люмінесценції.

Електромагнітне випромінювання через вікно 3

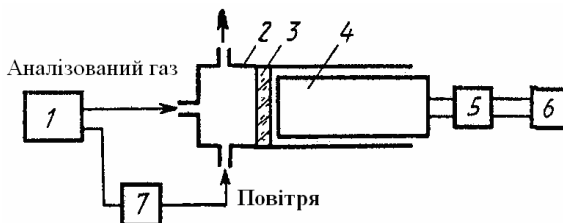


Рисунок 8.13 - Схема хемілюмінесцентного газоаналізатора

попадає у фотомножник 4, сигнал якого перетворюється в уніфікований сигнал за допомогою перетворювачів 5.

Вихідний сигнал останнього сприймається автоматичним потенціометром 6. При постійній концентрації озону в повітрі, що надходить у камеру 2, інтенсивність електромагнітного випромінювання пропорційна концентрації певного компонента в аналізованому газі. При такій подачі газів хемілюмінесцентний газоаналізатор може використовуватися для селективного вимірювання мікроконцентрацій неграничних вуглеводнів і

оксидів азоту. Він може застосовуватися для селективного вимірювання мікроконцентрацій озону в повітрі. У цьому випадку повітря надходить у реакційну камеру 2, минаючи озонатор, а замість аналізованого газу в камеру з постійною об'ємною витратою подається етилен.

### **8.13 Установлення стаціонарних газоаналізаторів**

При установленні газоаналізатора велике значення має правильний вибір місця для відбору проби димових газів, що повинна найбільш повно характеризувати середній їх склад.

Відбір проби виконується газовідбірним пристроєм (рис.8.14), що складається зі сталеві газовідбірної трубки 1 діаметром 15-20 мм, привареної під кутом 20-25° (для стоку конденсату) до фланця 2, щільно приєднаному із прокладкою до патрубку газоходу. На верхньому кінці трубки за допомогою фланців 3 і 4 закріплений пористий керамічний фільтр 5 разом зі сталевим захисним козирком 6. Протилежний кінець трубки приєднується накидною гайкою до лінії, що підводить газ до газоаналізатора.

Керамічний фільтр служить для первинного очищення газу, який відбирається для аналізу, від механічних домішок (золи і сажі), склад яких може досягати 20 г/м<sup>3</sup>. Від швидкого забруднення фільтр охороняє захисний козирок, установлений назустріч потоку газу.

Кінцівку газоовідбірної трубки з керамічним фільтром розміщують по можливості в середині потоку в місцях, де немає завихрень і застійних зон. Неприпустимо поміщати трубку поблизу місць можливого підсмоктування повітря (люків, заслінок, нещільностей обмуровування).

Газовідбірна трубка встановлюється вдалині від місцевих збурювань потоку, які утворюють різні опори (поворотом газоходу, заслінкою, шибером і т.п.). Найбільш сприятливим є її установлення на прямих вертикальних ділянках газоходу зі спадним потоком, а також у вузьких місцях тракту, де відбувається краще перемішування газу. При установленні

газовідбірної трубки на горизонтальних ділянках кінець її розміщують ближче до верхньої частини газоходу, де швидкість руху нагрітого газу вища.

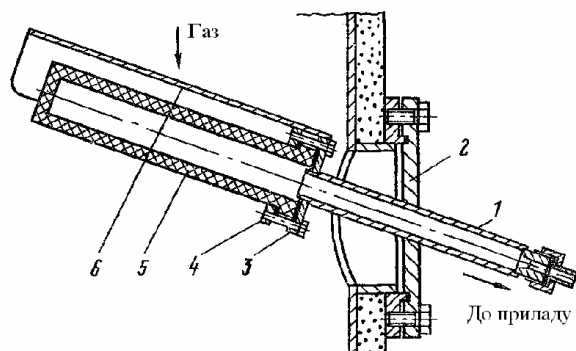


Рисунок 8.14 - Схема установа газовідбирного пристрою

Температура газу в місці відбору проби повинна бути в межах  $200-600^{\circ}\text{C}$ . При температурі нижче  $200^{\circ}\text{C}$  можливе забруднення поверхні керамічного фільтра незгорілими продуктами, що конденсуються на ній (смолами). При температурі вище  $600^{\circ}\text{C}$  виникає небезпека руйнування газовідбірної трубки і відновлення  $\text{CO}_2$  у  $\text{CO}$  і  $\text{O}_2$ .

Для зменшення запізнювання показань первинний перетворювач газоаналізатора необхідно встановлювати якнайбільше ближче до місця відбору проби. Температура газу при надходженні в прилад не повинна перевищувати  $35^{\circ}\text{C}$ .

Газоаналізатор установається в місцях, що не зазнають вібрації, і розміщений у віддалі від нагрітих поверхонь. Температура навколишнього повітря, що допускається,  $5-50^{\circ}\text{C}$  і відносна вологість до 95%. Періодично газовідбірна трубка з керамічним фільтром продувається стисненим повітрям тиском  $0,05\text{ МПа}$ .

## 9 ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РІДИН І ГАЗІВ

### 9.1 Загальні відомості

До фізико-хімічних властивостей, автоматичний контроль яких здійснюється в хіміко-технологічних процесах, відносять *густину, в'язкість, коефіцієнт заломлення, тиск насиченої пари, теплоту згорання*.

Вимірювання густини рідин і газів здійснюється з метою керування хіміко-технологічними процесами і виконання операцій обліку кількості сировини, палива, реагентів і готової продукції.

Для хіміко-технологічних процесів, пов'язаних з виробництвом нафтових масел, консистентних змащень, полімерів, розчинників, в'язкість є показником, що однозначно визначає якість продукції. Тому її автоматичне вимірювання дозволяє створювати дуже ефективні системи автоматичного керування названими вище процесами.

Для певних видів продукції хіміко-технологічних процесів потрібне вимірювання коефіцієнта заломлення як однієї з величин, що визначає якість.

Для світлих нафтопродуктів (особливо для авіаційних і автомобільних бензинів) однією з важливих властивостей є тиск насиченої пари (пружність пари), що характеризує схильність цих нафтопродуктів до випаровування і утворення парових пробок у паливних системах двигунів. Для рідких однокомпонентних речовин значення тиску насиченої пари може використовуватися як характеристика їх чистоти.

Теплова цінність рідких і газоподібних палив, які використовуються у вогневих нагрівальних і реакційних апаратах хіміко-технологічних процесів, визначається теплотою їхнього згорання. Автоматичне вимірювання цієї фізико-хімічної властивості в цей час набуває надзвичайно важливого значення у зв'язку із проведеними заходами щодо економії паливно-енергетичних ресурсів.

## 9.2 Засоби вимірювання густини рідин і газів

*Густиною*  $\rho$  речовини називають фізичну величину обумовлену відношенням маси  $m$  речовини до займаного ним об'єму  $V$ :

$$\rho = \frac{m}{V} \text{ [одиниця маси]/[одиниця об'єму]}. \quad (9.1)$$

*Питома вага*  $\gamma$  речовини називають фізичну величину, обумовлену відношенням ваги  $G$  речовини до її об'єму  $V$ :

$$\gamma = \frac{G}{V} \text{ [одиниця сили]/[одиниця об'єму]}. \quad (9.2)$$

Питома вага і густина зв'язані співвідношенням

$$\gamma = \rho \cdot g = m \cdot g / V, \quad (9.3)$$

де  $g$  — місцеве прискорення вільного падіння.

У той час як густина тіла не залежить від його місцезнаходження на поверхні Землі, питома вага змінюється залежно від розташування тіла на земній кулі. Тому довідкові дані розміщують за густиною.

У деяких випадках використовується поняття відносної густини, обумовлене як відношення густини даної речовини до густини іншої (умовної) речовини за певних фізичних умов.

*Відносну густину рідкої речовини* прийнято виражати відношенням її густини, узятої при нормальній температурі (20°C), до густини дистильованої води при температурі 4°C і позначається  $\rho_4^{20}$ .

*Відносну густину газу* прийнято виражати відношенням його густини до густини сухого повітря, узятого за нормальних умов (нормальна температура — 293,15 К, нормальний тиск — 101,325 кПа = 760 мм рт. ст.).

Густина рідин і газів зменшується з підвищенням температури. Густина газів збільшується з підвищенням тиску, густина рідини практично від тиску не залежить. У багатьох важливих для практики випадках густина можна розглядатися як адитивна фізична властивість.

Засоби вимірювання густини часто називають **денсиметрами** (денситометрами) (від лат. *densus* — густий і від грец. *metréō* — вимірюю).

Для вимірювання густини в цей час застосовуються *вагові денсиметри, поплавкові, гідроаеростатичні, гідрогазодинамічні, радіоізотопні, акустичні, вібраційні* та ін.

Далі розглянемо найбільш широко застосовувані автоматичні денсиметри рідин і газів.

### **9.2.1 Вагові (пікнометричні) денсиметри**

Принцип дії цих механічних денсиметрів полягає в безперервному зважуванні постійного об'єму аналізованої речовини у певній ємності або трубопроводі, тобто відповідно до виразів (9.1) - (9.3) густина визначається через питому вагу.

Схема найпоширенішого вагового денсиметра рідин показана на рис.9.1. Чутливим елементом денсиметра є U-подібна трубка 7, виготовлена з нержавіючої сталі, з'єднана через тягу 3 з важелем 4. Кінці трубки 7 через сильфони 2 з'єднані з нерухомими патрубками 1, через які подається аналізована рідина. Наявність сильфонів 2 дозволяє трубці 7 обертатися навколо осі 0 — 0. При збільшенні густини рідини збільшується маса трубки з рідиною, що через важіль 4 передається до механоелектричного або механопневматичного перетворювача 5, побудованого за принципом компенсації сил, вихідний сигнал  $S_{вих}$  якого пропорційний зміні густини аналізованої рідини. Противага 6, яка укріплена на важелі 4, служить для зрівноважування моменту сил, створюваного трубкою 7 з рідиною при обраній нижній межі вимірювання густини. Пристрій 8 служить для автоматичного введення виправлення до сигналу денсиметра залежно від температури аналізованої рідини, яку цей пристрій безупинно вимірює.

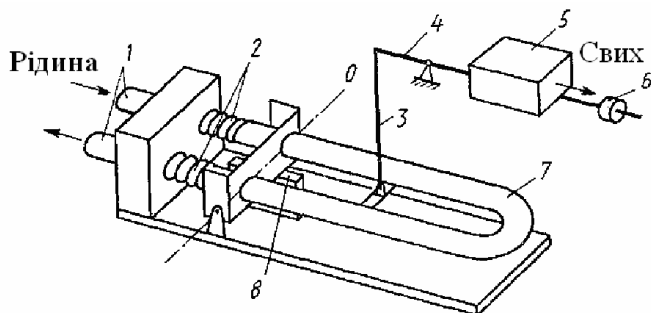


Рисунок 9.1 - Схема вагового денсиметра

Денсиметри даної конструкції дозволяють вимірювати густину в інтервалі  $0,5-2,5 \text{ г/см}^3$ . При цьому може бути встановлений діапазон вимірювання  $0,05-0,3 \text{ г/см}^3$  у будь-якій частині зазначеного інтервалу. Максимальна температура аналізованої рідини  $100^\circ\text{C}$ , класи точності 1-1,5.

### 9.2.2 Поплавкові (ареометричні) денсиметри

Принцип дії цих механічних денсиметрів побудований на безперервному вимірюванні виштовхувальної (підйомної) сили, яка діє на поплавець, частково або повністю зануреного в аналізовану речовину.

На рис.9.2 показана схема поплавкового денсиметра рідин із частково зануреним поплавцем 2, розміщеним у ємності 1. Через цю ємність безупинно прокачується аналізована рідина. За рахунок переливання в ємності підтримується постійний рівень. Аналізована рідина витікає із денсиметра через збірник 3. При зміні густини рідини змінюється ступінь занурення поплавця 2 у ємність. Досягнення положення рівноваги сил  $N$  і  $G_{\Pi}$  забезпечується глибиною занурення поплавця, при цьому змінюється довжина  $l$  стрижня 4, зануреного в рідину. Переміщення поплавця 2 перетворюється в електричний сигнал за допомогою диференціального трансформатора 5.

Вага поплавця 2 зі стрижнем 4 (у повітрі)  $G_{\Pi}$  і виштовхувальна сила  $N$ , діюча на поплавець, описуються виразами

$$\begin{aligned} G_{\Pi} &= m \cdot g, \\ N &= (V + l \cdot S) \cdot \rho \cdot g, \end{aligned} \quad (9.4)$$

де  $m$  - маса поплавця і стрижня;  
 $V$  - об'єм поплавця;  
 $l$  - довжина ділянки стрижня, зануреного в рідину;  
 $S$  - площа поперечного перерізу стрижня.

При рівності сил  $G_{\Pi}$  і  $N$  з виразу (9.4) з урахуванням дії на стрижень на поверхні поділу фаз сил поверхневого натягу можна визначити величину ходу стрижня  $l$ . Як бачимо, довжина  $l$ , а отже, і сигнал диференціального трансформатора 5 однозначно пов'язані із густиною рідини. Масу  $m$  підбирають залежно від діапазону вимірювання.

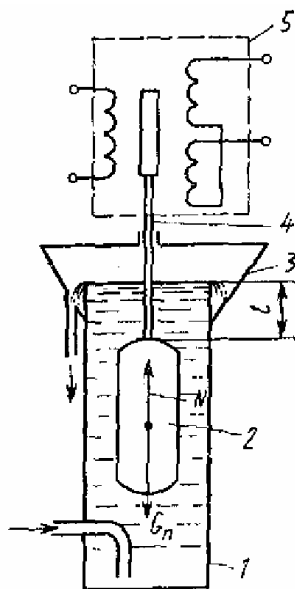


Рисунок 9.2 - Поплавковий денсиметр

Існує багато різних конструкцій денсиметрів із частково зануреним поплавцем. Вони мають високу чутливість, що дозволяє здійснювати вимірювання густини у вузькому діапазоні (усього  $0,005\text{—}0,01 \text{ г/см}^3$ ) з похибкою  $\pm(1,5\text{--}3)\%$  від діапазону вимірювання.

### 9.2.3 Гідро- і аеростатичні денсиметри

Принцип дії цих механічних денсиметрів побудовано на залежності тиску  $P$  стовпа аналізованої рідини або газу від густини  $\rho$  цих середовищ:

$$P = \rho \cdot g \cdot H, \quad (9.5)$$

де  $H$ — висота стовпа рідини або газу.

Якщо значення  $H$  взяти постійним, то тиск  $P$  однозначно визначається густиною середовища.

Схема гідростатичного денсиметра, принцип дії якого побудовано на вимірюванні гідростатичного тиску методом продувки стисненого газу, показана на рис.9.3. Такі денсиметри використовуються в хіміко-технологічних процесах для вимірювання густини безпосередньо в технологічних апаратах. В апараті 7 установлені трубки 1 і 2 з різною глибиною занурення.

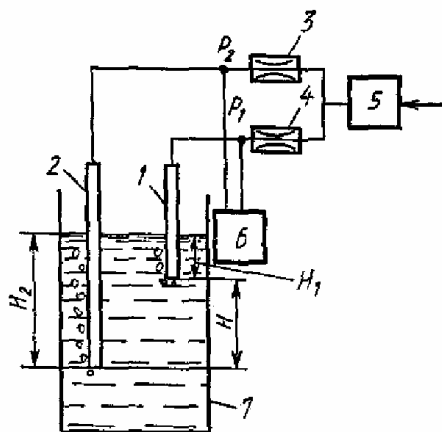


Рисунок 9.3 - Схема гідростатичного денсиметра

Газ (звичайне повітря) від регулятора витрати 5 надходить до пневматичних дроселів 3 і 4, а потім до трубок 2 і 1. Через відкриті торці трубок газ барботує через рідину. Тиск газу в трубках 1 і 2 визначається гідростатичним тиском стовпа рідин висотою  $H_1$  і  $H_2$ . Різниця тисків у трубках вимірюється дифманометром 6 із пневматичним або електричним вихідним сигналом. Цей перепад визначається виразом

$$\Delta P = P_2 - P_1 = (H_2 - H_1) \cdot \rho \cdot g = H \cdot \rho \cdot g. \quad (9.6)$$

Наявність двох трубок дозволяє виключити вплив на результат вимірювання можливих змін рівня рідини в апараті.

[illegible]

Трубки 1, 2 і 3 розміщені вертикально. При зміні густини аналізованого газу змінюється аеростатичний тиск стовпа газу в трубці 2, а отже, і тиск у точці  $A$ . Тому змінюється витрата повітря, яке обвітрює резисторний вимірювальний термоанемометр  $R_v$ , у результаті чого змінюється його опір. Опір порівняльного термоанемометра  $R_{пор}$  залишається постійним, тому що потік повітря, яке його обвітрює, практично не змінюється. Зміна опору термоанемометра  $R_v$  спричиняє розбаланс  $U$  нерівноважного мосту 4. Цей розбаланс описується виразом

де  $K$  — коефіцієнт перетворення денсиметра;  
 $\rho_{\text{в}}$  — густина повітря.

187

### 9.2.4 Гідро- газо(аеро)динамічні денсиметри

Принцип дії цих механічних денсиметрів побудовано на наданні потоку аналізованої речовини додаткової кінетичної енергії і на вимірюванні параметрів, що характеризують ефекти, які виникають при цьому впливі. В основному зазначені денсиметри застосовуються для вимірювання малої за значенням густини газів.

На рис.9.5 показана спрощена схема газо-динамічного денсиметра. У денсиметрі потоку аналізованого газу, що проходить через камеру 2, надається кінетична енергія турбинкою 3, яка приводиться в обертовий рух синхронним двигуном 1. Потік газу надходить до турбинки 4 і створює на ній за рахунок своєї кінетичної енергії обертовий момент, який виражений формулою

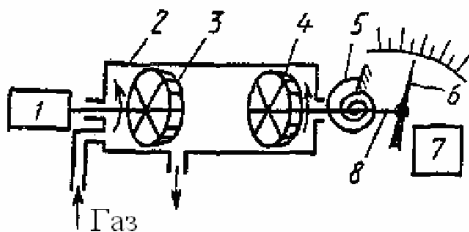


Рисунок 9.5 - Аеродинамічний денсиметр

$$M = k \cdot \omega^2 \cdot \rho, \quad (9.8)$$

де  $k$  – постійний коефіцієнт;

$\omega$  - частота обертання турбинки 3.

Під дією цього моменту турбінка 4 повертається, а виникаючий на ній момент урівноважується моментом, створюваним на осі 8 плоскою пружиною 5. Кут повороту осі 8 і стрілки 6 за шкалою пропорційний густині газу. За допомогою перетворювача 7 кут повороту перетворюється в уніфікований сигнал. Клас точності розглянутого денсиметра 0,5-1,5 (залежно від діапазону вимірювання).

### 9.2.5 Вібраційні денсиметри

Принцип дії цих механічних денсиметрів побудовано на залежності параметрів пружних коливань (вібрації), які

передаються камері з аналізованою речовиною або тілу, розміщеному в ньому, від густини цієї речовини. Звичайно як параметр пружних коливань використовується частота власних коливань резонатора, який перебуває в режимі автоколивань. Резонатори вібраційних денсиметрів виконують у вигляді трубки, пластини, стрижня, струни, камертона і т.д. Частота власних коливань резонатора, який знаходиться в аналізованій речовині, описується в загальному випадку виразом

$$f = f_0 \cdot \sqrt{1/(1 + k \cdot \rho)}, \quad (9.9)$$

де  $f_0$  — частота коливань резонатора при початковому значенні густини аналізованої речовини;

$k$  — константа, що залежить від конструкції резонатора.

Конструктивно розрізняють *проточні* і *заглибні* вібраційні денсиметри. У перших аналізована речовина проходить через внутрішню порожнину резонатора, у других — резонатор розміщується в потоці аналізованої речовини, діапазон вимірювання даних денсиметрів 690—1050 кг/м<sup>3</sup>, температура рідини 10—100°C; абсолютна похибка вимірювання  $\pm 1,5$  кг/м<sup>3</sup>.

### 9.3 Засоби вимірювання в'язкості рідин

**В'язкість** (внутрішнє тертя) — властивість рідких тіл (рідин і газів) чинити опір переміщенню однієї їх частини щодо іншої. Основний закон в'язкого потоку описується формулою Ньютона

$$F = \mu \cdot S \cdot \frac{dW}{dn}, \quad (9.10)$$

де  $F$  — тангенціальна (дотична) сила, що викликає зрушення шарів рідини (газу) одного відносно іншого;

$S$  — площа прошарку, за якою відбувається зрушення;

$dW/dn$  — градієнт швидкості  $W$  потоку (швидкості зміни за прошарками) за нормаллю  $n$ .

Коефіцієнт пропорційності  $\mu$  називають **динамічною в'язкістю**. Він характеризує опір рідини (газу) зсуву її шарів. Величину, зворотну динамічній в'язкості  $\varphi = 1/\mu$ , називають *текучістю*. Поряд з поняттям динамічної в'язкості використовують поняття **кінематичної в'язкості**:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}. \quad (9.11)$$

Одиниця динамічної в'язкості в SI — Па·с, у системі СГС-П (пуаз); одиниця кінематичної в'язкості в SI — м<sup>2</sup>/с, у системі СГС — Ст (стокс). Співвідношення між названими одиницями 1П=10<sup>-1</sup> Па·с; 1ст = 10<sup>-4</sup> м<sup>2</sup>/с.

В'язкість рідин зі збільшенням температури зменшується, а газів — збільшується. Динамічна в'язкість до тисків 20 МПа практично не залежить від тиску. В'язкість у загальному випадку не є адитивною фізичною властивістю.

Засоби вимірювання в'язкості називають **віскозиметрами**. На хіміко-технологічних процесах віскозиметри використовуються тільки для вимірювання в'язкості рідин. У цей час розроблені автоматичні *капілярні, ротаційні, вібраційні віскозиметри, віскозиметри з падаючим тілом* та ін. Далі розглянуті віскозиметри, найбільше часто застосовувані в хіміко-технологічних процесах.

### 9.3.1 Капілярні віскозиметри (віскозиметри витікання)

Принцип дії цих механічних віскозиметрів побудований на закономірності витікання рідини через капіляр, що описується законом Пуазейля:

$$Q = \frac{\pi \cdot d^4}{128 \cdot \mu \cdot l} (P_1 - P_2), \quad (9.12)$$

де  $Q$  - об'ємна витрата рідини;

$d$  і  $l$  — внутрішній діаметр і довжина капіляра;

$P_1, P_2$  — тиск до і після капіляра за потоком.

З формули (9.12) бачимо, що для вимірювання динамічної в'язкості при постійній об'ємній витраті рідини досить вимірювати перепад тиску на капілярі.

На рис.9.6 показана схема капілярного віскозиметра, у якому для створення постійної об'ємної витрати аналізованої рідини використовується шестеренний насос 1, який приводиться у рух синхронним двигуном 2.

З насоса аналізована рідина надходить у змійовик 3, де нагрівається до температури масла, що заповнює термостат 6, а потім — у капіляр 4, розміри якого вибирають

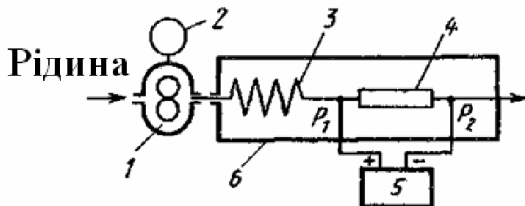


Рисунок 9.6 - Схема капілярного віскозиметра

залежно від діапазону вимірюваних значень в'язкості. Перепад тисків на капілярі вимірюється дифманометром 5 із пневматичним або електричним уніфікованим вихідним сигналом, що пропорційний динамічній в'язкості аналізованої рідини. Температура в термостаті підтримується постійною і дорівнює 50 або 100<sup>0</sup>С. Діапазони вимірювання від 0-2 10<sup>-3</sup>Па·с до 0-1000 10<sup>-3</sup> Па·с. Класи точності віскозиметра 1,5—2,5 (залежно від діапазону вимірювання).

### 9.3.2 Віскозиметри з падаючим тілом (кулькові віскозиметри)

Принцип дії цих механічних віскозиметрів побудований на вимірюванні швидкості (або часу) руху тіла (кульки) під дією сил ваги і тертя в аналізованій рідині. Цей рух описується законом Стокса:

$$W = 0,22 \cdot \frac{g \cdot (\rho_k - \rho) \cdot r^2}{\mu}, \quad (9.13)$$

де  $W$  – швидкість рівномірного падіння кульки;

$\rho$  – густина вимірюваної рідини;

$\rho_k$  – густина матеріалу кульки ( $\rho_k > \rho$ );

$r$  – радіус кульки.

Звичайне вимірювання швидкості  $W$  зводиться до вимірювання відрізка часу  $\tau$ , за який кулька, яка падає з постійною швидкістю, проходить певний постійний відрізок шляху  $l$  між двома взятими позначками. У цьому випадку

$$\tau = \frac{l}{W}. \quad (9.14)$$

На рис.9.7 показана схема кулькового віскозиметра циклічної дії. Аналізована рідина з апарата 7 або трубопроводу прокачується насосом 6 по трубці 1 з немагнітного матеріалу знизу нагору і при своєму русі піднімає кульку від нижньої 11 до верхньої 5 обмежувальної сітки. При вимиканні двигуна 8 насоса (періодичне вмикання і вимикання здійснюються блоком керування 9) кулька падає в аналізовану рідину. За допомогою диференціальних трансформаторів 3 і 2 формуються електричні

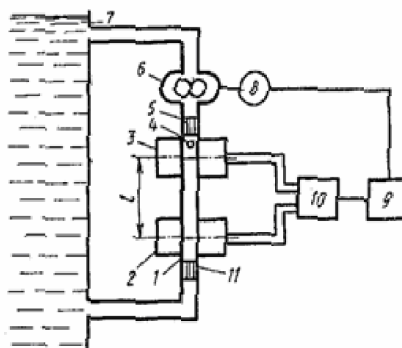


Рисунок 9.7 - Віскозиметр з падаючим тілом

імпульси в моменти часу, коли кулька проходить дві взяті позначки, що відстоять одна від одної по висоті трубки на відстані  $l$ . За допомогою вимірювача тимчасових інтервалів 10 вимірюється відрізок часу між зазначеними імпульсами, значення яких і визначає динамічну в'язкість. Клас точності віскозиметра 2. Існують конструкції віскозиметрів з падаючим тілом безперервної дії.

### 9.3.3 Ротаційні віскозиметри

Принцип дії цих механічних віскозиметрів побудований на вимірюванні обертального моменту, який виникає на осі ротора (циліндра, диска і т.п.), зануреного у вимірювальне середовище, при взаємному їх переміщенні. Зазначений обертальний момент у загальному випадку описується виразом

$$M = k \cdot \omega \cdot \mu, \quad (9.15)$$

де  $k$  — постійний коефіцієнт, що залежить від конструкції ротора віскозиметра;

$\omega$  - кутова швидкість обертання ротора (при постійній кутовій швидкості обертальний момент однозначно визначає в'язкість рідини).

З різноманітності конструкцій обертальних елементів ротаційних віскозиметрів в автоматичних аналізаторах найбільше використовуються конструкції, показані на рис.9.8. Дані віскозиметри поєднують загальний принцип дії, відповідно до якого в'язкість визначається за моментом сил тертя, який виникає при обертанні тіла, зануреного в аналізовану рідину. Таким тілом може бути циліндр (рис.9.8 а), кулька (рис.9.8 б) або диски, посаджені на загальний вал і розміщені між нерухомими шайбами (рис.9.8 в). Диску або циліндру обертовий рух передається синхронним двигуном. Обертальний момент, що виникає на диску (циліндрі), а отже, на шківі, розміщеному на одному валу з диском (циліндром), пропорційний динамічній в'язкості.

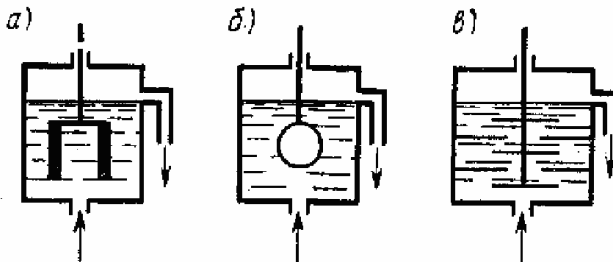


Рисунок 9.8 - Схеми ротаційних віскозиметрів

Характерною рисою ротаційних віскозиметрів є широкий діапазон вимірюваних значень в'язкості (0,01-1000 Па·с). Класи точності ротаційних віскозиметрів 1-2,5.

## 9.4 Засоби вимірювання тиску насиченої пари рідин

Тиск насиченої пари (пружність пари) є одним з важливих показників якості світлих нафтопродуктів, особливо автомобільних і авіаційних бензинів. Тиск насиченої пари характеризує їх випаровуваність і схильність до утворення парових пробок, а також може використовуватися як характеристика чистоти рідких однокомпонентних речовин. Тиск насиченої пари істотно залежить від температури.

Схема механічного аналізатора пружності пари бензинів показана на рис.9.9. Аналізована рідина надходить у блок

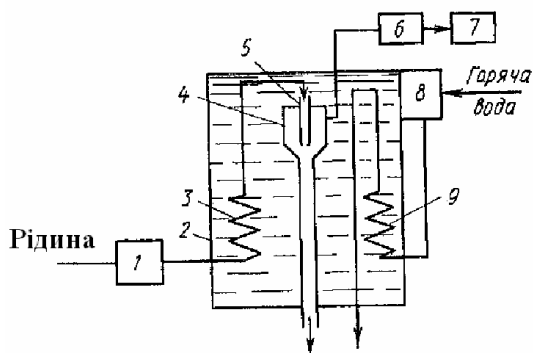


Рисунок 9.9 - Схема вимірювача тиску насиченої пари

цій температурі за діючими стандартами визначається тиск насиченої пари бензинів). Зі змійовика 3 аналізована рідина, нагріта до 38°C, надходить у сопло 5 струминного насоса. При витіканні рідини із сопла за рахунок в'язкості струмів зтягує за собою пари рідини, які є в камері 4 струминного насоса, тому в названій камері створюється розрядження тим більше, чим менша пружність пари аналізованої рідини. Вимірювання розрядження в камері 4 здійснюється вакуумметром 6 з пневматичним сигналом, що подається вторинному приладу 7.

Діапазон вимірювання аналізатора 250—650 мм рт. ст.; витрата аналізованої речовини 800 см<sup>3</sup>/хв; абсолютна похибка вимірювання 15 мм рт. ст.

## 9.5 Засоби вимірювання теплоти згорання рідких і газоподібних палив

Теплота згорання є характеристикою теплової цінності палива. Під *питомою теплотою згорання* розуміють кількість теплової енергії, що виділяється при повному згоранні одиниці маси або одиниці об'єму палива. Відповідно розрізняють *питому масову* і *об'ємну теплоту згорання*. Інформація про теплоту згорання використовується для керування процесом горіння у вогневих нагрівальних апаратах і для виконання облікових операцій, пов'язаних зі споживанням палива. Як паливо на хіміко-технологічних процесах використовують мазут, попутний нафтовий і природний газ. Питомі масова теплота згорання мазуту змінюється незначно і жорстко скоректована із густиною мазуту. Тому автоматичне вимірювання цієї величини можна звести до вимірювання густини.

Газоподібні палива можуть мати у своєму складі, крім вуглеводів негорючі компоненти, повітря, азот, діоксид вуглецю та ін., тому для визначення теплової цінності палива необхідно здійснювати вимірювання їх питомої теплоти згорання. Для газоподібних палив звичайно вимірюють питому об'ємну теплоту згорання.

Розрізняють *вищу* і *нижчу питому теплоту згорання*.

Під вищою питомою об'ємною теплотою згорання палива  $Q_v$  розуміють кількість теплової енергії, що виділилася при згоранні одиниці об'єму палива і конденсації водяної пари, яка утримується в продуктах згорання.

Під нижчою питомою об'ємною теплотою згорання палива  $Q_n$  розуміють кількість теплової енергії, що виділилося при згоранні одиниці об'єму палива без обліку енергії, що виділяється при конденсації водяної пари із продуктів згорання.

У вогневих нагрівальних апаратах для запобігання конденсації пари води в димоходах температура продуктів згорання звичайно становить 110-130<sup>0</sup>С. Тому тепла цінність палива визначається нижчою питомою теплотою згорання.

Зв'язок між вищою і нижчою теплотою згорання має вигляд

$$Q_v = Q_n + q, \quad (9.16)$$

де  $q$  — теплота конденсації водяної пари, яка утворюється при згоранні одиниці об'єму палива.

Засоби вимірювання питомої теплоти згорання називають **калориметрами**. За принципом дії їх відносять до термохімічних аналізаторів.

На рис.9.10 наведена схема автоматичного

калориметра, що дозволяє одержувати інформацію про вищу питому об'ємну теплоту згорання газоподібних палив. Робота калориметра побудована на вимірюванні кількості

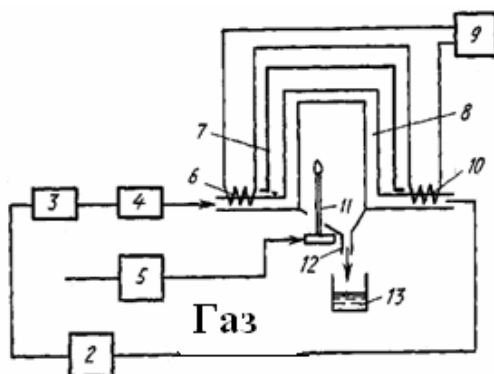


Рисунок 9.10 - Схема калориметра

теплової енергії, що виділяється в процесі хімічної реакції горіння аналізованого газу. Останній з постійною об'ємною витратою надходить через стабілізатор витрати 5 у пальник 11. Продукти згорання обминають стінки теплообмінника 8, розміщеного в корпусі калориметра 7, і передають всю теплову енергію, що виділяється, дистильованій воді, яка безупинно прокачується через теплообмінник. Воді також передається теплова енергія, що виділяється на стінках теплообмінника при конденсації парів води, які утворюються при згоранні вуглеводнів. Конденсат, що утворюється, збирається за допомогою конденсатотвідника 12 і стікає в ємність 13. Для подачі води в теплообмінник служать замкнуті системи, які складаються з резервуара 1, насоса 2, холодильника 3 і стабілізатора витрати 4. На вході і виході теплообмінника 5

розміщені батареї термоелектричних чутливих елементів 6 і 10. Ці батареї ввімкненні диференціально і за їх допомогою вимірюється різниця температур вхідного в теплообмінник і вихідного з нього потоків води. Сигнал  $U$ , що надходить на автоматичний потенціометр 9, пропорційний зазначеній різниці температур  $\Delta t$ , що, у свою чергу, пропорційна вищій питомій об'ємній теплоті згорання аналізованого газу:

$$U = k \cdot \frac{Q_g \cdot Q_{\Gamma}}{Q_v \cdot c_v}, \quad (9.17)$$

де  $k$ — коефіцієнт термоелектричних чутливих елементів;  
 $Q_{\Gamma}$  і  $Q_g$  — постійні об'ємні витрати аналізованого газу і води;  
 $c_v$  - об'ємна теплоємність води.

За відрізок часу 1-2 год, протягом якого в ємність 13 збирається достатня для вимірювання кількість конденсату, можна визначити середнє значення нижчої об'ємної теплоти згорання, використовуючи формулу (9.16). Для цього необхідно обчислити середнє за цей інтервал часу значення вищої об'ємної теплоти згорання за показниками потенціометра 9 і виміряти кількість конденсату.

Витрата аналізованого газу 0,15—0,5 м<sup>3</sup>/год; діапазон вимірювання 0-50·10<sup>3</sup> кДж/м<sup>3</sup>; класи точності 1—2.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Фарзани Н.Г. Технологические измерения и приборы: учеб. /Н.Г.Фарзани, Л.В.Илясов, А.Ю.Алим-заде. - М., 1989.- 456 с.
2. Мурин Г.А. Теплотехнические измерения: учеб./ Г.А.Мурин. - М., 1979. -424 с.
3. Люшенко В.І. Вимірювання в енергетиці / В.І.Люшенко, А.І.Туяхов, С.М.Саф'янц. - Донецьк:Норд-Прес, 2008.- 352 с.
4. Кремлевский П.П. Измерение расхода многофазных потоков / П.П.Кремлевский. - Л., 1982.-214 с.
5. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества /П.П.Кремлевский. - Л., 1989. - 704 с.
6. Автоматизация и средства контроля производственных процессов: серия справочников / А.Ф.Анисимов, И.Б.Вайнберг, В.С.Иванов и др.; под ред.В.В.Карибского. – М.: Изд-во «Недра», 1979. – 624 с.
7. Тойберт П. Оценка точности результатов измерений /П.Тойберт. - М.: Энергоатомиздат, 1988.
8. Зайдель А.Я. Ошибки измерений физических величин /А.Я.Зайдель. - Л.: Наука, 1974.
9. Румшипский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента: справочное пособие / Л.З.Румшипский. - М.: Наука, 1971.
10. Тейлор Дж. Введение в теорию ошибок / Дж.Тейлор. - М.: Мир, 1985.
11. Методические указания к лабораторной работе М-1 по курсу «Общая физика». Обработка результатов измерения при проведении физического эксперимента / А.И.Савельева, И.Н.Фетисов; под ред. С.П.Ерковича. – М.: Изд-во МГТУ, 1990. – 32 с., ил.
12. Весы и дозаторы весовые: справочник / С.П.Маликов, С.С.Михайловский, Л.Н.Старостина, П.К.Клементьев – М.: Машиностроение, 1981. – 320 с.
13. Повх И.Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении / И.Л.Повх. - 3-е изд. доп. и испр. – Л.: Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1974. – 480 с.

Навчальне видання

*Конспект лекцій*  
з навчальної дисципліни  
«Контроль та вимірювання параметрів рідин і газів»  
для студентів спеціальності  
7.000008 “Енергетичний менеджмент”  
усіх форм навчання

Відповідальний за випуск А.О.Євтушенко  
Редактор М.Я.Сагун  
Комп'ютерне верстання С.С.Антоненка

Підп. до друку 22.10.2009, поз.  
Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 11,62. Обл.-вид. арк. 10,03. Тираж 40 пр. Зам.№  
Собівартість вид. грн к.

Видавець і виготовлювач  
Сумський державний університет,  
вул. Р.-Корсакова, 2, м.Суми, 40007  
Свідцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.