

Міністерство освіти і науки України
Інженерний інститут
Запорізького національного університету

Є.А. Манідіна

КОНТРОЛЬ І АВТОМАТИЗАЦІЯ ОЧИСНИХ СПОРУД

Навчально-методичний посібник

для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра
спеціальності “Технології захисту навколишнього середовища”
освітньо-професійної програми “Технології захисту навколишнього
середовища”

Затверджено
вченою радою ЗНУ
протокол №10 від 14.06.19

Запоріжжя
2019

УДК 628.32
М 234

Манідіна Є.А. Контроль і автоматизація очисних споруд: навчально-методичний посібник для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності “Технології захисту навколишнього середовища” освітньо-професійної програми “Технології захисту навколишнього середовища”. Запоріжжя : ЗНУ, 2019. 170 с.

У навчально-методичному посібнику подано в систематизованому вигляді програмний матеріал дисципліни “Контроль і автоматизація очисних споруд”. Викладено основні принципи автоматизації очисних споруд, розглянуто контроль параметрів процесів очистки, зроблено акцент на побудову схем автоматизації технологічних процесів. Для формування необхідних навичок у навчально-методичному посібнику наведено лабораторні роботи, запропоновано практичні завдання різного рівня складності та завдання до самостійної роботи.

Для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності “Технології захисту навколишнього середовища” освітньо-професійної програми “Технології захисту навколишнього середовища”.

Рецензенти:

В.В. Осипенко, генеральний директор ТОВ НВП «Дніпроенергосталь»

О.Г. Добровольська, кандидат технічних наук, доцент кафедри міського будівництва та господарства

Відповідальний за випуск

Г.Б. Кожемякін, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри прикладної екології та охорони праці

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 ПОХИБКА ПИЛОГАЗОВИХ ВИМІРІВ.....	8
1.1 Класифікація похибок при пилогазових вимірах.....	8
1.2 Теорія випадкових похибок.....	10
1.3 Графічна характеристика похибок	12
1.4 Похибка середнього значення.....	18
1.5 Похибка середнього, обумовлена малою кількістю вимірювань.....	19
1.6 Інструментальна похибка	20
1.7 Класи точності приладів вимірювання	23
1.8 Облік похибки і порядок виконання округлення в записі остаточного результату вимірювання	24
РОЗДІЛ 2 ОСНОВИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ.....	27
2.1 Елементи та засоби автоматики.....	27
2.2 Основні принципи регулювання.....	28
2.3 Класифікація автоматичних регуляторів	32
2.4 Класифікація автоматизованих систем регулювання.....	34
РОЗДІЛ 3 КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСІВ ОЧИСТКИ.....	36
3.1 Загальна характеристика очисних споруд як об'єктів автоматизації.....	36
3.2 Вимірювання температури	40
3.2.1 Методи вимірювання температури і види температурних шкал	40
3.2.2 Класифікація приладів для вимірювання температури.....	42
3.2.3 Ртутні термометри.....	43
3.2.4 Дилатометричні термометри.....	45
3.2.5 Манометричні термометри.....	46
3.2.6 Термоелектричні термометри	47
3.2.7 Термометри опору	49
3.2.8 Пірометри	50
3.2.9 Тепловізори	52
3.3 Вимірювання тиску	55
3.3.1 Деформаційні прилади для вимірювання тиску.....	58
3.3.2 Встановлення і обслуговування деформаційних трубчасто-пружинних манометрів.....	63
3.3.3 Правила вимірювання трубчасто-пружинними манометрами	64

3.3.4 Деформаційні вимірювальні перетворювачі тиску прямого перетворення	65
3.4 Вимірювання витрати і кількості речовини	68
3.4.1 Витратоміри із звужуючим пристроєм	70
3.4.2 Швидкісні витратоміри і лічильники	75
3.4.3 Анемометри.....	78
3.4.4 Об'ємні лічильники	79
3.4.5 Витратоміри обтікання (ротаметри).....	81
3.4.6 Електромагнітні (індукційні) витратоміри	83
3.4.7 Теплові витратоміри.....	86
3.4.8 Ультразвукові витратоміри	87
3.4.9 Силкові витратоміри	90
3.4.10 Ваговий метод вимірювання витрати сипучих середовищ.....	90
3.5 Вимірювання рівня рідин	91
3.5.1 Візуальні, поплавкові та буйкові засоби вимірювання рівня	91
3.5.2 Гідростатичні засоби вимірювання рівня	94
3.5.3 Електричні засоби вимірювання рівня.....	96
3.5.4 Акустичні та радіоізотопні засоби вимірювання рівня.....	99
3.6 Аналіз складу газів	100
3.6.1 Хімічні газоаналізатори	102
3.6.2 Теплові газоаналізатори.....	104
3.6.3 Магнітні та дифузні газоаналізатори	106
3.6.4 Сорбційні, випарні і конденсаційні газоаналізатори.....	107
3.6.5 Діелькометричні та оптичні аналізатори	111
3.6.6 Іонізаційні, полум'яно-іонізаційні, фотометричні і хемілюмінесцентні газоаналізатори та пилoměри	112
РОЗДІЛ 4 ПОБУДОВА СХЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРЦЕСІВ	117
4.1 Зображення засобів автоматизації на функціональних схемах	117
4.2 Правила побудови умовних зображень.....	121
РОЗДІЛ 5 АВТОМАТИЗАЦІЯ РОБОТИ ОЧИСНИХ СПОРУД.....	127
5.1 Автоматизація процесу очистки відхідних газів в мокрих газоочисних установках	127
5.2 Автоматизація процесу очистки відхідних газів в електрофільтрі.....	131
5.3 Автоматизація процесу очистки відхідних газів в рукавних фільтрах	135
5.4 Автоматизація процесу очистки стічних вод	138
РОЗДІЛ 6 ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ.....	144

6.1 Лабораторна робота № 1. Визначення вмісту гідроген хлориду у промислових газах.....	144
6.2 Лабораторна робота №2. Визначення вмісту сульфур діоксиду в газах методом йодометрії.....	147
6.3 Лабораторна робота №3. Визначення вмісту нітроген оксидів у промислових газах	150
6.4 Лабораторна робота № 4. Визначення дисперсного складу пилу ситовим способом.....	154
РОЗДІЛ 7 ПРАКТИЧНІ РОБОТИ.....	158
7.1 Обчислення похибки вимірювань	158
7.2 Розрахунок діафрагми і витрати газів та води	160
7.3 Вибір закону регулювання і налаштування регулятора.....	162
7.4 Визначення динамічних параметрів об'єкта регулювання за кривою розгону.....	162
7.5 Розрахунок гравітаційного осадження часток пилу	164
РОЗДІЛ 8 САМОСТІЙНА РОБОТА	166
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	168
ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	169

ВСТУП

Складна екологічна ситуація вимагає наявності і постійного вдосконалення роботи газо- та водоочисних споруд. Для проведення в життя державної політики в області безпеки і нешкідливості виробництва на кожному промисловому підприємстві потрібні новітні технології очистки та утилізації промислових відходів.

Завдання контролю і автоматизації очисних споруд – досягнення максимальної ефективності в роботі спеціального обладнання з метою зменшення викидів і скидів в оточуюче середовище.

Метою вивчення дисципліни «Контроль і автоматизація очисних споруд» є надання студентам необхідного обсягу знань та підготовка студентів до самостійної інженерної діяльності; формування уміння аналізувати відповідність та рівень впровадження засобів автоматизації для забезпечення успішної роботи очисних установок.

Автоматизація ефективно застосовується на сучасному етапі розвитку виробництва з метою досягнення зростання показників ресурсозбереження, поліпшення екології навколишнього середовища, якості та надійності продукції. Автоматизація виробництва проводиться за допомогою автоматичних пристроїв, які можна класифікувати за різними ознаками, при цьому під «пристроєм» розуміють закінчену конструкцію.

Автоматизацією називається застосування методів та технічних засобів автоматизації для перетворення неавтоматичних процесів в автоматичні.

Задача автоматизації полягає не тільки у тому, щоб полегшити працю людини, але і забезпечити роботу виробництва з такою швидкістю, точністю, надійністю, економічністю, які людина забезпечити не може.

Для автоматизації технологічних процесів використовують різні автоматичні системи. Залежно від функцій, які вони виконують, розрізняють системи контролю, регулювання, управління.

Система автоматичного контролю (САК). Процес контролю зводиться до перевірки відповідності об'єкта встановленим технічним вимогам. При цьому суть контролю полягає у проведенні двох основних операцій:

- ◆ отримання інформації про фактичний стан деякого об'єкта, показники його властивостей (первинна інформація);
- ◆ зіставлення первинної інформації із наперед встановленими вимогами, тобто виявлення відповідності або невідповідності фактичних значень параметрів потрібним.

Система автоматичного управління (САУ) застосовується для автоматичного виконання операцій, які задаються зовнішніми джерелами впливу (задавальними пристроями) на вході цієї схеми. В цій системі управління будь-яким процесом або групою процесів здійснюється без безпосередньої участі людини. В такій схемі людина може подавати лише первісний пусковий імпульс, але часто це виконує автоматичний пристрій.

Система автоматичного регулювання (САР). САР призначена для автоматичного підтримання з заданою точністю сталості значень одної або декількох фізичних величин об'єкта регулювання, які характеризують виробничий процес. Крім того, САР може змінювати значення позначених величин за заданим законом. Систему автоматичного регулювання можна отримати, якщо об'єднати автоматичні системи контролю та управління. Вона представляє собою автоматичну систему із замкнутим ланцюгом впливів, в якій управляючі дії виконуються внаслідок порівняння дійсного значення управляючої величини із заданим значенням. Якщо значення цих величин нерівні, то на виході виникає сигнал від їх різниці, який впливає на систему з метою зменшення різниці до нуля. Величини, що викликають відхилення параметра від заданого значення та порушення рівноваги, називають **збурюючими** впливами. Дистанційне керування об'єднує в собі методи і технічні засоби управління установками і різними об'єктами на відстані. Телемеханіка — область науки і техніки, що охоплює теорію і технічні засоби автоматичної передачі на відстань команд управління і отримання інформації про стан об'єкта управління (ОУ). Телемеханічні системи дозволяють об'єднати в один технологічний процес роботу великого числа машин і установок, розташованих одна від одної на значній відстані. Залежно від призначення, їх прийнято розділяти на системи телесигналізації, телевимірювання і телекерування [1-4].

Основним напрямом розвитку автоматизації сьогодні для технологічних процесів є автоматизовані системи управління технологічними процесами (АСУ ТП), що становлять людино-машинні системи, які поєднують усі типові локальні системи в загальну інтегровану систему з метою оптимального керування складними технологічними процесами. У такій автоматизованій системі людина-оператор бере участь у координації роботи окремих систем управління та у виробленні найважливіших керівних рішень (зниження собівартості продукції, зменшення втрат сировини та енергії, підвищення продуктивності праці та якості продукції, поліпшення умов праці обслуговуючого персоналу, дотримання вимог екології тощо). Центральну роль в АСУ ТП відіграють мікропроцесорні пристрої, фактичне підтримування режиму технологічного процесу в більшості АСУ ТП здійснюють типові локальні системи окремих параметрів, де все частіше поряд із технічними засобами традиційної автоматики використовуються як логічний елемент також мікропроцесорні пристрої, зокрема мікроконтролери.

Подальшим кроком у розвитку автоматизації технологічних процесів є безпосереднє цифрове управління і керування, при якому локальні системи управління окремих параметрів взагалі виключаються із системи, а управлінські сигнали на всі виконавчі елементи надходять безпосередньо від центрального мікропроцесорного пристрою. У цих системах потреба у втручанні оператора може виникнути лише в аварійних ситуаціях.

РОЗДІЛ 1

ПОХИБКА ПИЛОГАЗОВИХ ВИМІРІВ

1.1 Класифікація похибок при пилогазових вимірах

Вимірюванням називають послідовність експериментальних операцій для знаходження фізичної величини, що характеризує об'єкт чи явище.

Виміряти – значить порівняти вимірювану величину з іншою, однорідною з нею величиною, прийнятою за еталон.

Усі вимірювання можна умовно поділити на прямі і непрямі (побічні).

Прямими називаються вимірювання, в процесі яких числове значення фізичної величини одержують безпосередньо шляхом порівняння з еталоном цієї величини, або відліковим пристроєм вимірювального приладу.

Непрямими називаються вимірювання, в процесі яких числове значення фізичної величини знаходять шляхом обчислень за формулами, попередньо підставивши в них результати прямих вимірювань. Таким чином, непрямі вимірювання завжди містять в собі (або складаються з них) прямі вимірювання.

Фізична величина — це властивість, якісно спільна для багатьох об'єктів або процесів, а кількісно — індивідуальна для кожного об'єкту або процесу. Фізична величина має два аспекти — кількісний та якісний [2].

Якісна ознака фізичної величини визначає її рід. Фізичні величини з однаковою якісною ознакою є однорідними (наприклад, довжина, висота, відстань, діаметр).

Кількісний вміст фізичної величини в певному об'єкті є розміром фізичної величини [2].

Числовим значенням фізичної величини називають число, що дорівнює відношенню вимірюного розміру фізичної величини до розміру одиниці цієї фізичної величини.

Значенням фізичної величини називають відображення фізичної величини у вигляді її числового значення з зазначенням одиниці вимірювання. Значення фізичної величини можна отримати як результат обчислення або вимірювання.

При проведенні пилогазових вимірів спостерігається виникнення похибок, які можуть чинити суттєвий вплив на результати дослідів. Тому при проведенні досліджень виникає завдання встановити причину та величину похибок, та, як наслідок, погрішність вимірів.

Похибки при проведенні вимірів класифікують [1]:

1) Абсолютні – відносні.

Істинним значенням x фізичної величини X називають таке її значення, яке ідеально відображає певну властивість об'єкта та не залежить від способу вимірювання. Це абсолютно точне значення фізичної величини.

Дійсним (умовно істинним) значенням \bar{x} фізичної величини X називають знайдене експериментальним шляхом значення, настільки близьке до істинного, що заданих умов різницею між ними можна знехтувати.

Похибкою фізичної величини X називають різницю між її істинним x та дійсним \bar{x} значеннями.

Абсолютна похибка фізичної величини Δx - це різниця за модулем між її істинним та дійсним значеннями:

$$\Delta x = |x - \bar{x}|. \quad (1.1)$$

Абсолютна похибка Δx фізичної величини показує, наскільки істинне значення x фізичної величини відрізняється від дійсного \bar{x} . Розмірність абсолютної похибки відповідає розмірності фізичної величини.

Користуючись значенням модуля числа вираз (1.1) можна переписати так [2]:

$$x = \bar{x} \pm \Delta x. \quad (1.2)$$

Визначення абсолютної похибки Δx за формулою (1.1) точне, але на практиці не може бути застосоване, бо в ньому є величина, яку виміряти неможливо — істинне значення x фізичної величини [2]. Тому під час розрахунку абсолютної похибки Δx_i i -того повторного вимірювання замість істинного значення x необхідно брати найближче до нього значення, яке можна знайти — вибіркове середнє \bar{x} (дійсне), і від нього віднімають значення i -того повторного вимірювання.

Відносна похибка δx фізичної величини чисельно дорівнює відношенню абсолютної похибки Δx вимірювання до її істинного значення x :

$$\delta x = \frac{\Delta x}{x} \quad (1.3)$$

Зазвичай відносну похибку δx виражають у відсотках. Тоді (1.3) записують так:

$$\delta x = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100\% \quad (1.4)$$

Обернену до відносної похибки величину ψ називають **точністю**:

$$\psi = 1/\delta x \quad (1.5)$$

2) Систематичні – випадкові.

Систематичні – це ті, що повторюються з досліду в дослід і мають одне й теж значення. З них можна виділити: **виправлення** (уточнюючі теорію, постійні впливи й т.п.), **невідомого походження** (недостатньо розроблена

теорія, складний експеримент) і **клас точності приладів**. Найчастіше клас точності приладів вважається основним джерелом систематичних помилок. В електровимірювальних приладах звичайно є класи від 0.05 до 4. Для класу 0.5 при загальній шкалі 100 розподілів показання приладу даються не точніше, чим 0.5% від усієї шкали, тобто 0.5 розподілу. Максимальні погрішності, що даються іншими вимірювальними приладами, іноді наносяться на самі прилади (наприклад, багато лінійок мають напис 0.1 мм). Це ціна розподілу. Треба мати на увазі, що в реальності експериментатор зможе зробити вимір лінійкою з точністю, не краще 0.25 мм [1].

Випадкові помилки беруть своє походження з безлічі одночасно діючих джерел перешкод. Вони проявляються лише при багаторазових вимірах. Це помилки, які піддаються обробці за допомогою математичної статистики, більш точно, теорії ймовірностей. Їхня непередбачуваність, таким чином, зводиться до мінімуму.

Важливий тип випадкових – систематичних помилок - промахи, тобто грубі помилки, що виникли в ході експерименту.

Їх треба вміти відокремити від нормальних вимірів, основний спосіб їх усунення - це увага й старанність.

1.2 Теорія випадкових похибок

Для визначення значень вимірюваної величини служать прямі і непрямі вимірювання.

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 :

$$\bar{x}_{\text{вим}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (1.7)$$

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**:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i . \quad (1.8)$$

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

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

$$\sigma^2 = \frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{n-1} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} . \quad (1.9)$$

Основною характеристикою випадкової похибки є **середня квадратична похибка**. Необхідно чітко розрізнити середню квадратичну похибку σ для одиничного (окремого) вимірювання і середню квадратичну похибку σ_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

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

Як наслідок, зі способу обчислення ця величина характеризує розкид результатів окремих вимірювань навколо середнього значення, одержуваного після обробки всіх даних багаторазового вимірювання. Значення σ є основною характеристикою для визначення точності даного способу вимірювань. Хоча величина σ 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 доцільніше використати термін **експериментальна оцінка**, що так само відносять і до середнього значення, і до дисперсії [1-4].

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

$$x = \bar{x} \pm \alpha_{n,p} \cdot \sigma, \quad (1.11)$$

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 Δ_{iM}** :

$$\Delta_{iM} = 0,675 \times \sigma \quad (1.12)$$

1.3 Графічна характеристика похибок

При побудові діаграми, яка показує, як часто отримуються ті або інші результати вимірювання, можливо наочно вивчити закономірні за якими розподіляються випадкові похибки. Така діаграма отримала назву **гістограма розподілу результатів вимірювання**.

Гістограма – східчаста діаграма, що показує, як часто при вимірюваннях виникають результати, що потрапили у той або інший інтервал Δx 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.1.1).

Тут n – повна кількість проведених вимірювань, Δn – кількість результатів, що потрапили в інтервал $[x, x+\Delta x]$.

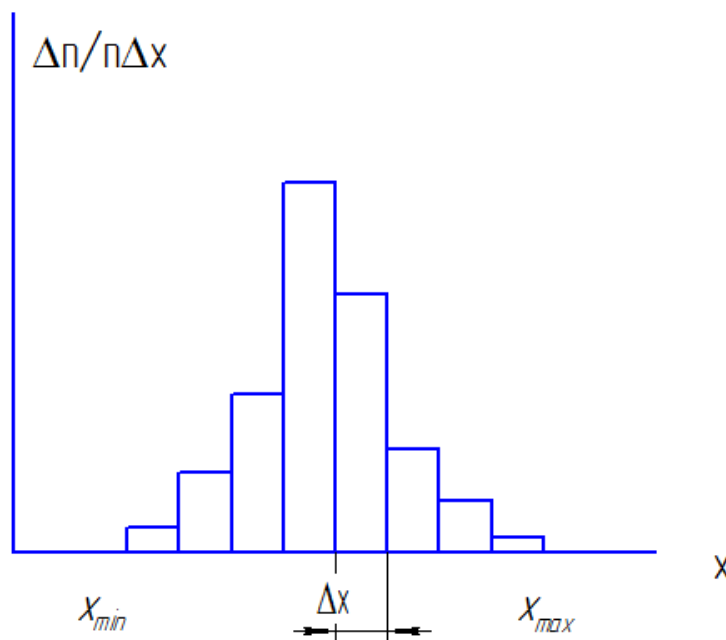


Рисунок 1.1 – Гістограма

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 Δx , набуває сенсу щільності ймовірності.

При дуже великій кількості вимірювань ($n \rightarrow \infty$) весь діапазон зміни величини x можна розбити на нескінченно малі інтервали Δx , як це робиться в математиці, і знайти кількість результатів Δn у кожному з них.

У цьому випадку гістограма перетвориться в плавну криву - графік функції:

$$\rho(x) = \frac{dn}{n \cdot dx} = \lim_{\substack{n \rightarrow \infty \\ \Delta x \rightarrow 0}} \frac{\Delta n}{n \cdot \Delta x}. \quad (1.13)$$

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.1.2 наведені гістограми, побудовані для різної кількості n вимірювань. На гістограмі (рис.1.2а) для $n=5$ тільки-но визначається картина розкиду результатів; на гістограмі (рис.1.2б) для $n=50$ уже проявляється певна закономірність, що стає ще більш виразною на рис.1.2в для $n=300$ [2].

Гістограми, побудовані за великою кількості вимірювань, дозволяють вивчити закономірності, властиві випадковим похибкам. Гістограма на рис.1.2 в практично симетрична, має вигляд дзвону, положення її максимуму близьке до X . Це 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.1.3, отриманої при тих самих вимірюваннях іншим, більш удосконаленим методом. Гістограма (рис.1.3) також має вигляд дзвону але ширина її в 5 разів менша, ніж на рис.1.2в.

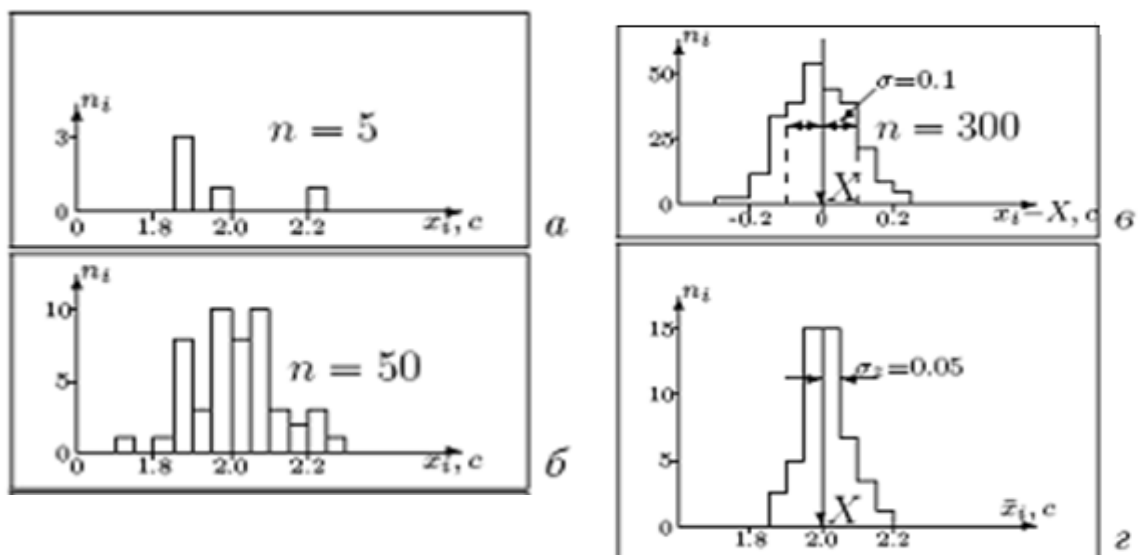


Рисунок 1.2 – Гістограми результатів проведених вимірювань

Гістограми, побудовані за великою кількості вимірювань, дозволяють вивчити закономірності, властиві випадковим похибкам. Гістограма на рис.3.2 є практично симетрична, має вигляд дзвону, положення її максимуму близьке до X . Це 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.1.3, отриманої при тих самих вимірюваннях іншим, більш удосконаленим методом. Гістограма (рис.1.3) також має вигляд дзвону але ширина її в 5 разів менша, ніж на рис.1.2в.

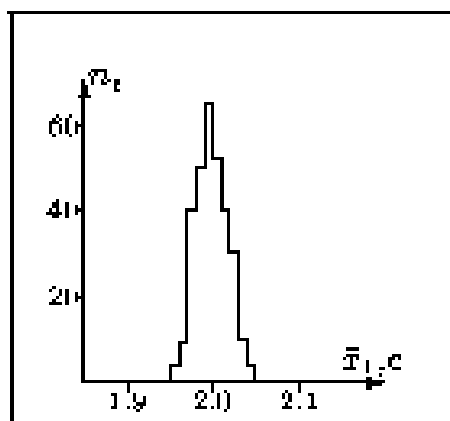


Рисунок 1.3 – Гістограма результатів проведених вимірювань удосконаленим методом

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.1.2 в і рис.1.3. 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):

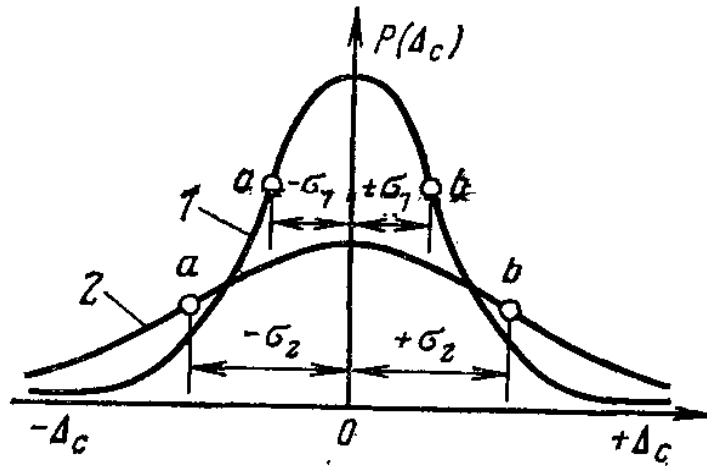
$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-X)^2}{2\cdot\sigma^2}}, \quad (1.14)$$

де X – істинне значення вимірюваної величини;
 σ – середня квадратична похибка;
 σ^2 – дисперсія.

На рис.1.4 показані криві 1 і 2 нормального розподілу випадкових похибок, побудованих за формулою (1.12), для двох значень середнього квадратичного відхилення σ , 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.1.4, 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 σ , 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 σ приводить до підвищення точності вимірювань.

Основні характеристики кривої нормального розподілу випадкових похибок наведені на рис.1.5. 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 $\pm\varepsilon$ називається **довірчим інтервалом**, а відповідна йому ймовірність появи випадкової похибки (заштрихована площа) $\Phi(t)$ (Рдов) – **довірчою ймовірністю**.



1 – при σ_1 ; 2 – при $\sigma_2=2\sigma$

Рисунок 1.4 – Криві нормального розподілу випадкових похибок

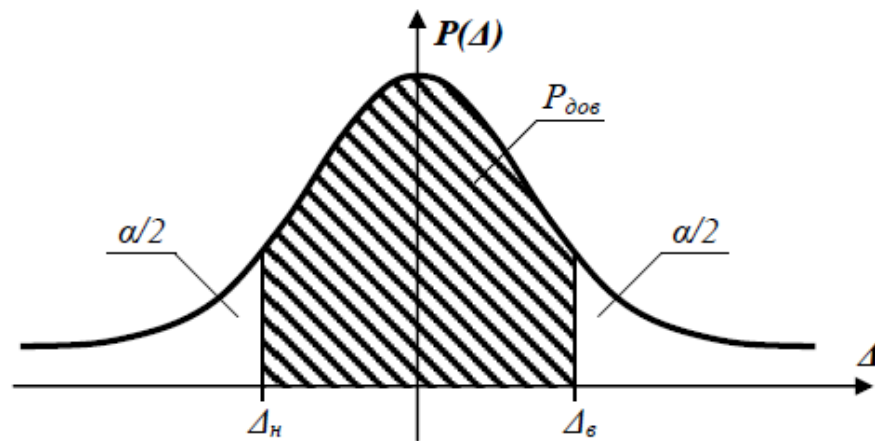


Рисунок 1.5 – Основні характеристики кривої нормального розподілу випадкових похибок

Довірчий інтервал, що характеризує ступінь відтворюваності результатів вимірювання, може мати різні значення, причому при великому довірчому інтервалі виходить і більша довірна ймовірність. При вимірюванні може задаватися або довірчий інтервал і за ним визначатися довірна 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 (1.12), 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.1.4 бачимо, що при зменшенні σ 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 σ . Імовірність того, що результат вимірювання потрапить у довірчий інтервал $(X-\Delta x, X+\Delta x)$:

$$P = \int_{X-\Delta x}^{X+\Delta x} f(x) dx. \quad (1.14)$$

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

$$X - \Delta x < x_i < X + \Delta x, \quad (1.15)$$

де Δx зручно виражати через σ і певний множник k :

$$\Delta x = k \cdot \sigma. \quad (1.16)$$

У таблиці 1.1 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 ∞ . 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 3δ . Тому з деякою часткою умовності величину $\Delta x=3\sigma$ називають **граничною похибкою вимірювання**.

Таблиця 1.1 - 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 (1.15) можна записати в іншому вигляді:

$$x_i - \Delta x < X < x_i + \Delta x, \quad (1.17)$$

або

$$X = x_i \pm \Delta x. \quad (1.18)$$

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 вимірювальної величини, називається *довірчим інтервалом*.

Відповідна ймовірність P — *довірча ймовірність* цього інтервалу. Напівширина довірчого інтервалу є оцінкою похибки результату вимірювання.

Примітка. Ймовірність 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 ймовірності, 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 $P=0,7$.

1.4 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 $\Delta\bar{x}$:

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}. \quad (1.19)$$

Співвідношення (1.19) має велике значення для теорії похибок. По-перше, з нього проглядається значна роль σ , від якої залежать похибки не тільки одиничного вимірювання, але й усередненого результату. По-друге, (1.19) 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 (1.19) 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 σ на $\sigma_{\bar{x}}$.

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

$$X = \bar{x} \pm \sigma. \quad (1.20)$$

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

$$\Delta \bar{x} = k \cdot \sigma_{\bar{x}} = \frac{k \cdot \sigma}{\sqrt{n}}, \quad (1.21)$$

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 σ і $\sigma_{\bar{x}}$, знаходять із цієї серії. Тоді

$$\Delta \bar{x} = k \cdot \sigma_{\bar{x}} = \frac{k \cdot \sigma}{\sqrt{n}} = k \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n-1)}}. \quad (1.22)$$

У такий спосіб для характеристики випадкової похибки необхідно зазначити два числа – саму похибку, тобто напівширину довірчого інтервалу Δx 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.

1.5 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 σ невідомо. Тому не можна скористатися формулою (1.19), а формула (1.20) для малої кількості вимірювань дає погані результати. Похибка $\Delta \bar{x}$ обчислена за (1.20) 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:

$$\Delta \bar{x} = t_{P,f} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n-1)}}. \quad (1.23)$$

Цей вираз відрізняється від (1.22) 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 – пп кількість вимірювань. Значення $t_{P,f}$, розраховані за теорією ймовірностей, наведені в табл.1.2.

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 (1.22). Дійсно, з табл.1.2 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 (1.23) і наближеною формулою (1.22) тим більше, чим менше n .

Таблиця 1.2 – Значення коефіцієнта $t_{P,f}$

$f=n-1$	Значення коефіцієнта $t_{P,f}$			
	$P=0,9$	$P=0,935$	$P=0,95$	$P=0,95$ 7
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
∞	1,65	1,96	2,58	3,29

1.6 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 $\Delta_{інстр}$, названого межею похибки, яка допускається. Наприклад, вимірювальна лінійка довжиною 1000 мм має $\Delta_{інстр} = \pm 0,20$ мм, тобто виробник не гарантує, що штрихи нанесені з більшою точністю.

Зв'язок між ціною поділки шкали і $\Delta_{інстр}$ 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 установлення, 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 $\sigma_{прил}$ 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 Δx має випадковий характер і не залежить від випадкової похибки багаторазових вимірювань, то при тому самому $p=0,7$ загальна випадкова похибка багаторазових вимірювань

$$\Delta x_{\text{вип}} = \alpha_{n,p} \cdot \sigma + \Delta x_{\text{прил}}. \quad (1.24)$$

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

$$\Delta x_{\text{вип}} = \alpha_{n,p} \cdot \sigma + \Delta x_{\text{прил}} + \Delta x_{\text{відлік}}. \quad (1.25)$$

Результат вимірювань записують у вигляді

$$x = \bar{x} \pm \Delta x_{\text{вип}}. \quad (1.26)$$

Відносна випадкова похибка

$$\mathcal{E} = \frac{\Delta x_{\text{вип}}}{\bar{x}}. \quad (1.27)$$

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

$$\sigma_{\text{сум}} = \sqrt{\frac{1}{3} \Delta_{\text{інстр}}^2 + \sigma^2}. \quad (1.28)$$

Якщо вимірювання виконані кілька разів і як результат взято середнє значення, то в (1.28) замість σ 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

$$\Delta x = \sqrt{(\Delta x_{\text{вип}})^2 + (\sigma_{\text{прил}})^2} . \quad (1.29)$$

Оскільки випадкову похибку звичайно оцінюють із довірчою ймовірністю 0,68, а $\sigma_{\text{прил}}$ - оцінка максимальної похибки приладу, то можна вважати, що вираз (1.27) 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_{min} , x_{max} - найбільше і найменше значення вимірюваної величини. Підвищення точності багаторазового вимірювання в такому випадку неможливе, а похибкою остаточного результату буде $\sigma_{\text{прил}}/3$.

1.7 Класи точності приладів вимірювання

Дуже часто на шкалі вимірювального приладу, на передній панелі або в технічному документі (паспорті) [1-4], 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 Δ_c до нормованого значення X_N , вираженого у відсотках:

$$\gamma = \frac{\Delta_c}{X_N} \times 100 . \quad (1.30)$$

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

$$\gamma = \frac{\Delta_c}{(X_e - X_n)} \times 100 \quad (1.31)$$

Відносною похибкою вимірювального приладу називають відношення абсолютної похибки вимірювального приладу Δ_c до дійсного значення вимірювальної величини X_D , яка виражена у відсотках,

$$\delta = \frac{\Delta_c}{X_D} \times 100. \quad (1.32)$$

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 рискою. Наприклад, на лицьовому боці приладу написано 0,02/0,01. У цьому випадку відносна похибка обчислюється за формулою

$$\delta = \frac{\Delta_c}{X} = \pm \left[c + d \cdot \left(\left| \frac{X_K}{X} \right| - 1 \right) \right], \quad (1.33)$$

де $c=0,02\%$; $d=0,01$;

X_K – більша (за модулем) межа вимірювань.

1.8 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:

$$x = \bar{x} \pm \Delta x. \quad (1.34)$$

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

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Як класифікують похибки при пілогазових вимірах?
2. Наведіть основні положення теорії випадкових похибок.
3. Що таке похибка середнього значення?
4. Які особливості визначення похибки середнього значення, при малій кількості експериментів?
5. Що таке інструментальна похибка?
6. Наведіть порядок виконання округлення в записі остаточного результату вимірювання.

РОЗДІЛ 2 ОСНОВИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

2.1 Елементи та засоби автоматики

Будь-яка автоматична система складається із окремих, зв'язаних між собою та виконуючих визначені функції конструктивних елементів, які прийнято називати *елементами автоматики* [4].

Елементи автоматики досить різноманітні за конструкцією, принципами дії, характеристиками, фізичною природою перетворюваних сигналів, задачами, які виконуються в пристроях автоматичного управління.

Кожен елемент автоматики має певну сукупність характеристик і параметрів, які визначають його метрологічні, динамічні, експлуатаційні і технологічні особливості, що дозволяє правильно вирішити питання про ефективність використання елемента в конкретному пристрої автоматичного управління.

Елементи мають вхід і вихід. На вхід потрапляє інформація, форма якої перетворюється в іншу, необхідну для подальшого руху. Вхідна величина позначається X , а вихідна Y . Вхідною величиною можуть бути миттєві значення фізичних величин (швидкості, прискорення, струму, напруги, температури, тощо). Вихідною величиною є електричний сигнал, різний за розміром та характером.

В залежності від способу отримання енергії, необхідної для перетворення вхідних сигналів, елементи діляться *на пасивні і активні*. Пасивні елементи - це такі елементи, в яких вхідний сигнал (X) перетворюється у вихідний сигнал (Y) за рахунок енергії вхідного сигналу. Активні елементи - це такі елементи, які одержують енергію від допоміжного джерела енергії. Залежно від виду енергії на вході і на виході елементів активні елементи діляться на електричні, гідравлічні, пневматичні, механічні і комбіновані.

За здійснюваними функціями елементи автоматики поділяються на *датчики, підсилювачі, виконавчі пристрої, реле, обчислювальні елементи, узгоджувальні та допоміжні елементи* і т. ін.

Датчики сприймають інформацію, що надходить на їх вхід, про величину, якою керують, об'єкта управління і перетворюють її в форму, зручну для подальшого використання. Більшість датчиків перетворює вхідний неелектричний сигнал X в електричний Y . Залежно від виду вхідного неелектричного сигналу датчики поділяються на датчики механічних величин (переміщення, швидкості, прискорення), теплових величин, оптичних величин та ін.

Підсилювачі – це елементи автоматики, які здійснюють кількісне перетворення: збільшення потужності вхідного сигналу (посилення). Іноді підсилювачі здійснюють поряд з кількісним перетворенням і якісне; наприклад, постійний струм в змінний, переміщення – в змінювання тиску. Залежно від

виду енергії, отриманої від зовнішнього джерела, вони підрозділяються на електричні, гідравлічні та комбіновані.

Виконавчі пристрої – це елементи автоматики, які створюють керуючий вплив на об'єкт управління. Вони змінюють положення або стан регулюючого органу таким чином, щоб керований параметр відповідав заданому значенню. До виконавчих пристроїв, які створюють керуючий вплив у вигляді сили або обертаючого моменту, який змінює положення робочого органу, відносяться силові електромагніти, електромагнітні муфти, двигуни, реле.

Реле – це елемент автоматики, у якого зміна вихідного сигналу Y проходить стрибком (дискретно) при досягненні вхідним сигналом X визначеного значення, що називається рівнем спрацьовування. Потужність вхідного сигналу X , що викликає реакцію реле, значно менша за потужність, якою може керувати реле, тому реле можна вважати і підсилювальним, і виконавчим елементом.

Обчислювальні елементи здійснюють у пристроях автоматичного управління математичні перетворення із сигналами, що надходять на їх вхід, з метою виконання заданого алгоритму роботи системи. В найпростішому випадку вони виконують алгебраїчне підсумовування, диференціювання, інтегрування, логічне складання, множення і т. ін. Найпростіші із них – це обчислювальні елементи аналогового типу, більш складні – мікропроцесор, спеціалізовані та універсальні ЕОМ.

Узгоджувальні та допоміжні елементи включаються до пристрою автоматичного управління для поліпшення його параметрів, розширення функціональних можливостей основних елементів. До таких елементів автоматики можна віднести стабілізатори напруги або струму, комутатори і розподільники, генератори напруги спеціальної форми, формувачі імпульсів, індикаторні і реєструючі прилади, сигнальні і захисні пристрої і т.д. Ці елементи, не будучи принципово необхідними для роботи пристрою автоматичного управління, в той же час дозволяють підвищити його точність і стабільність роботи, полегшують наладку і експлуатацію, розширюють можливості використання при створенні САУ. Наприклад, у САУ, де використовується в якості обчислювального елемента мікропроцесор, часто виникає потреба погоджувати його з інформаційними датчиками і виконавчими елементами аналогового типу, які широко застосовуються в автоматичці. Для цього на вході встановлюються аналого-цифрові перетворювачі (АЦП), що перетворюють механічний (переміщення, швидкість) або електричний (напруга, струм, опір) сигнал, одержуваний від аналогового датчика, в дискретний (кодовий) сигнал, здатний сприйматися мікропроцесором.

2.2 Основні принципи регулювання

Регульованою величиною називають параметр, значення якого необхідно стабілізувати або підтримувати закономірно змінюючимися [4].

Пристрій, призначений реалізувати задачу стабілізації або зміни регульованої величини за певним законом, називають **автоматичним регулятором**.

Регульовану величину, виміряну в даний момент, називають її поточним значенням. Значення регульованої величини, яке забезпечує найкращий хід процесу і який необхідно підтримувати в даний момент часу, називають її заданим значенням. В ідеальному випадку поточне і задане значення регульованої величини в кожен момент часу повинні бути рівні. Однак в силу зміни внутрішніх чи зовнішніх умов поточне значення регульованої величини може відхилитися від заданого. Різницю, що з'явилася в цьому випадку, називають помилкою або неузгодженістю.

Режим процесу, при якому помилка, або неузгодженість, дорівнюють нулю, називають сталим режимом. У реальних умовах часто спостерігається зміна температури, дисперсного складу пилу, питомого електричного опору пилу, вологості і т.д.

Завданням автоматичного регулювання будь-якого процесу є автоматичне підтримування за допомогою регулятора в об'єкті регулювання необхідних технологічних умов і відновлення їх у разі порушення. У ході автоматичного регулювання регулятор так впливає на об'єкт регулювання, що поточне значення регульованої величини стає рівним (або відрізняється на малу величину) заданому значенню, тобто неузгодженість зводиться до нуля або мінімуму.

Сукупність об'єкта регулювання і регулятора **складає автоматизовану систему регулювання (АСР)**. Взаємні зв'язки між окремими ланками системи зручно представляти у вигляді структурних схем, в яких ланки показані простими геометричними фігурами, а зв'язки між ланками - сполучними лініями зі стрілками, що показують напрямок передачі сигналу.

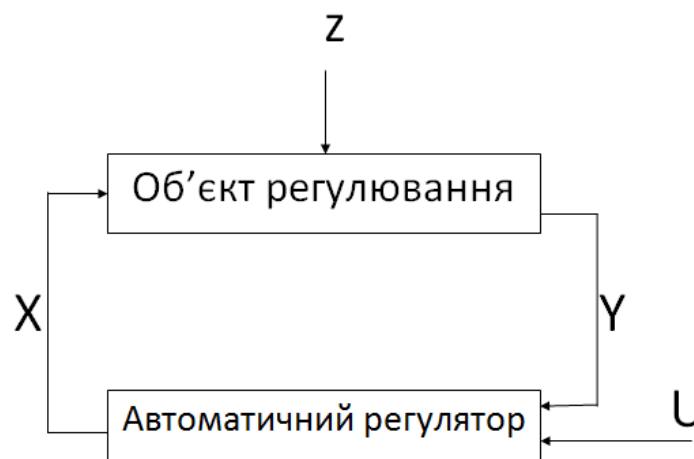


Рисунок 2.1 – Функціональна схема системи автоматичного регулювання

В регуляторі відбувається порівняння заданого значення U технологічного параметру з регульованим Y . Якщо ці дві величини рівні між собою $U = Y$, то регулятор не втручається в роботу об'єкту. Такий стан

називають станом динамічної рівноваги, який, правда, може порушитися під дією внутрішніх або зовнішніх збурень Z на об'єкт.

Збуренням Z прийнято називати таку дію, яка порушує стан рівноваги САР, внаслідок чого регульований параметр Y відхиляється від заданого значення U , тобто виникає розбаланс $\mathcal{E} = Y - U$ або похибка регулювання. Таким чином, виникає стан розбалансу або небалансу. Залежно від знаку та величини цієї похибки автоматичний регулятор (АР) виробляє дію X регулювання і передає її з допомогою виконавчого механізму та регулюючого органу на вхід об'єкту регулювання, щоб зменшити або повністю ліквідувати похибку регулювання.

Зміну вихідної величини в часі в результаті ступінчатого стрибкоподібного збурення на вході об'єкта називають *кривою розгону* (рис. 2.1.).

За допомогою кривої розгону можна визначити такі параметри об'єкта регулювання, як час запізнення t , стала часу об'єкта T , коефіцієнт передачі об'єкта K . Стала часу T – це час, за який вихідна величина досягла б нового усталеного значення, якби весь час змінювалась з найбільшою постійною швидкістю. Відрізок часу між моментом нанесення стрибкоподібного збурення до проекції точки перетину дотичної з віссю часу і визначає час запізнення t

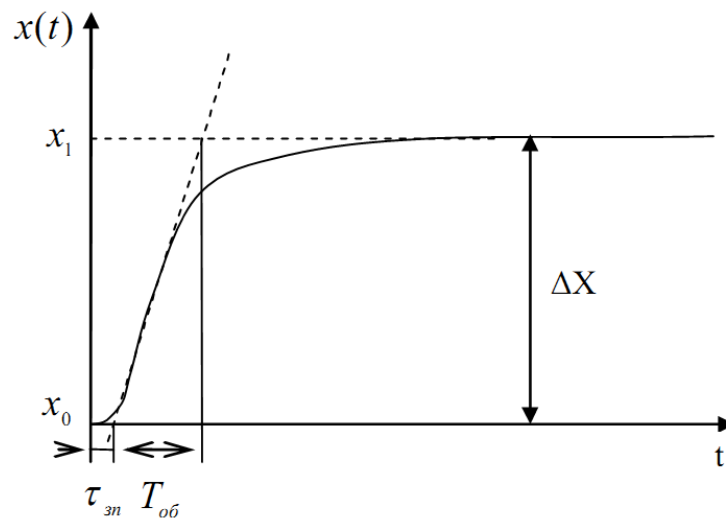
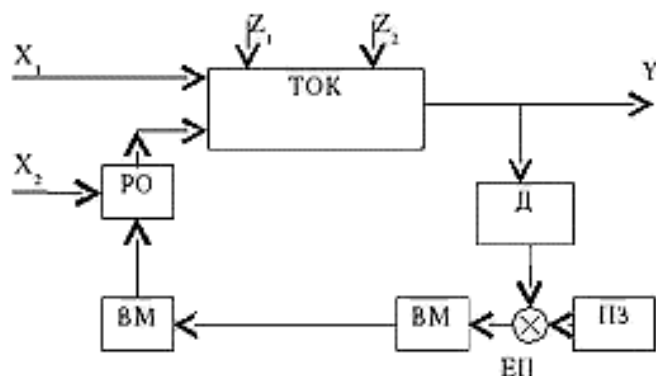


Рисунок 2.2 – Крива розгону об'єкта регулювання.

Функціональна схема системи автоматичного регулювання (АСПР) представлена на рис. 2.3. Вона включає, крім об'єкта регулювання, первинний вимірювальний перетворювач, вторинний вимірювальний прилад, регулятор, виконуючий механізм і регулюючий орган.

Первинний вимірювальний перетворювач встановлюється на виході об'єкта регулювання. Він сприймає вихідний параметр об'єкта, заміряє його і перетворює результат виміру у вихідний сигнал (струмовий або тиску) певної величини. Складається перетворювач з двох частин: вимірюючої (чутливого елемента) і перетворюючої.



ТОК – технологічний об’єкт керування; Д – давач; ПЗ – програмний задавач; РП – регулюючий пристрій; ВМ – виконавчий механізм; РО – регулюючий орган; ЕП – елемент порівняння; X1, X2 – вхідні параметри; Z1, Z2 – збурюючі дії; Y – вихідний параметр.

Рисунок 2.3 – Функціональна схема АСПР.

На відміну від стабілізуючої АСР система програмного регулювання містить програмний задавач ПЗ, сигнал від якого подається до елементу порівняння (ЕП). ЕП формує різницю між біжучим та заданим значенням регульованої величини. Вихідний сигнал ЕП подається на вхід регулюючого пристрою РП, який формує за певним законом (П-, ПІ-, ПІД- тощо) сигнал, керуючий виконавчим механізмом (ВМ). Останній через регулюючий орган РО діє на енергетичний або матеріальний потік на вході технологічного об’єкту керування (ТОК) підтримуючи регульовану величину на заданому значенні.

На виході об’єкта управління необхідно встановити пристрій, який сприймає регульовану величину і перетворює її в сигнал, зручний для подальшого використання в АСУ. Цей пристрій називають **датчиком**. Розрізняють *датчики прямої і непрямой дії*. Пристрій, в якому чутливий і перетворюючий елементи представляють єдине ціле, відносять до датчиків прямої дії. У датчику непрямой дії ці елементи зазвичай виконують роздільно. Датчики державної системи приладів мають на виході стандартні значення струму 0-5 мА (перший діапазон), 0-20 мА (другий діапазон) і тиску (19,6-98 кПа) при зміні вхідного сигналу від 0 до 100%.

Інформація про поточне значення регульованої величини, що виробляється датчиком, надходить на вхід **автоматичного регулятора**. Одночасно вона може вводиться і на вхід вторинного вимірювального приладу, який може бути показуючим, підсумовуючим, реєструючим, сигналізуючим або комбінованим.

До складу автоматичного регулятора входить блок порівняння: пристрій, призначений для здійснення операції алгебраїчного підсумовування сигналів, що надходять від датчика і задатчика. Блок порівняння на своєму виході виробляє сигнал, рівний різниці між поточним і заданим значеннями регульованої величини, тобто сигнал неузгодженості. Звідси випливає вимога, щоб сигнали, що надходять на вхід блоку порівняння, були однакової фізичної природи.

Сигнал з виходу автоматичного регулятора надходить на вхід виконавчого механізму. Пристрій, що перетворює командний сигнал регулятора у відповідне переміщення свого регулюючого органу, називають **виконавчим механізмом**. В процесі роботи системи об'єкт і регулятор взаємодіють між собою. Ці взаємодії називають внутрішніми впливами. На регулятор і об'єкт можуть впливати і зовнішні впливи. Зміну завдання і випадкові збурення слід розглядати як зовнішні впливи.

2.3 Класифікація автоматичних регуляторів

Регулятор – це пристрій, що керує величиною контрольованого параметра. Регулятори використовують в системах автоматичного регулювання. Вони стежать за відхиленням контрольованого параметра від заданого значення і формують управляючі сигнали для мінімізації цього відхилення [1,4].

Автоматичні регулятори класифікують за рядом ознак.

За призначенням розрізняють регулятори витрати, температури, тиску, рівня і т. д. По виду енергії, використовуваної для приведення в дію, регулятори бувають пневматичні, електричні, гідравлічні і комбіновані (електропневматичні, електрогідравлічні).

За способом дії автоматичні регулятори поділяють на дві групи: прямої дії, в яких зусилля, необхідне для переміщення регулюючого органу, створюється зміною регульованого параметра без застосування стороннього джерела енергії, і непрямої (опосередкованої) дії, що працюють з використанням стороннього джерела енергії.

По виду регулювання розрізняють регулятори стабілізуючі, програмні, що стежать і самоналагоджувальні.

За характером зміни керуючого сигналу в часі регулятори поділяють на пристрої безперервної дії, релейні й імпульсні. За законом регулювання автоматичні регулятори безперервної дії ділять на пропорційні (П-регулятори); інтегральні (І-регулятори); пропорційно-інтегральні (ПІ-регулятори), або ізодромні; пропорційно-інтегрально-диференціальні (ПІД-регулятори).

П-регулятором називають такий, у якого величина переміщення регулюючого органу пропорційна відхиленню регульованого параметра, а закон регулювання виражається рівнянням:

$$X_{\text{вих.п}} = K_{\text{п}} * X_{\text{вх.п}} \quad (2.1)$$

де $K_{\text{п}}$ – коефіцієнт підсилення (коефіцієнт передачі) регулятора.

Наявність ретрансляційного виходу

Часто в системах автоматичного регулювання величиною технологічного параметра треба не тільки керувати, а також її треба реєструвати. Для цього багато регуляторів мають додатковий аналоговий вихід. На нього подається в

заданому масштабі величина регульованого параметра. Цей вихід може бути заведений на вхід реєструючого приладу.

Дискретні виходи і можливість їх програмування

За наявності аналогового сигналу регулятор може мати один або два дискретних сигнали для реалізації функцій сигналізації, захисту або інших. Так, наприклад, ПД регулятор температури може формувати сигнали тривоги при виході регульованого параметра за вказані межі.

Наявність програмного задатчика (регулятор тиску, регулятор температури)

Часто в системах автоматичного регулювання циклічних процесів потрібно за певною програмою змінювати величину завдання регулятора. Для цього використовується програмний задатчик. Параметрами оцінки таких регуляторів є число кроків програми, максимальна і мінімальна довжина кроку програми, можливість плавної зміни завдання на кроці. Так, наприклад, ПД регулятор температури і ПД регулятор тиску в системі автоматичного регулювання установки вирощування кристалів мають складні програми зміни їх завдань. Часто треба регулювати який-небудь параметр з корекцією керуючого сигналу за величиною іншого параметра (наприклад, регулятор витрати газу з корекцією по температурі). Іншим прикладом може бути реалізація каскадного регулювання.

Тип регульованого параметра

Існують універсальні регулятори - їм на вхід можна подати будь-який тип сигналу. З їх допомогою можна робити системи регулювання будь-яких технологічних параметрів. Однак часто тип регульованого параметра жорстко обмежений: регулятор тиску, регулятор температури, регулятор рівня, регулятор витрати і т.п. Це пов'язано з тим, що для вимірювання різних типів сигналів можуть використовуватися різні алгоритми. Так регулятор температури при отриманні сигналу від термопар компенсує температуру холодного спаю і перетворює величину контрольованої термо ЕРС в значення температури. У регуляторі витрати часто треба уточнити величину вимірної витрати за значенням тиску і температури контрольованого середовища. Тому, щоб спростити програму, зашити в регулятор, і здешевити виріб, виробники поділяють їх за призначенням.

Точність регулювання

За цим параметром можна виділити загальнопромислові і прецизійні регулятори. Як приклад можна привести прецизійний регулятор температури Протерм.

Наявність інтерфейсу зв'язку з іншим обладнанням.

Сучасні системи регулювання зазвичай є частиною великих систем управління. Щоб інтегрувати регулятори з рештою обладнання або реалізувати зручний інтерфейс користувача на операторській станції, вони повинні мати інтерфейс зв'язку. Найпростіші регулятори не мають засобів підключення. Найбільш поширеними інтерфейсами для зв'язку з верхнім рівнем є RS-232 і

RS-485. Багато виробників реалізують свій протокол обміну з регуляторами, але найбільш поширеним стала підтримка протоколу MODBUS RTU.

Живлення регуляторів

Важливим параметром є необхідність використання зовнішнього джерела живлення на 24В постійного струму і наявність вбудованого живлення вимірювальних ланцюгів.

2.4 Класифікація автоматизованих систем регулювання

Розглянемо класифікацію АСР за рядом ознак, істотних з точки зору теорії автоматичного управління [1,4].

За методом управління. За цією ознакою АСР ділять на два класи: системи адаптивні (самі пристосовуються до змін у процесі) і неадаптивні (самі не пристосовуються). Адаптивні АСР мають здатність автоматично змінювати свої властивості в залежності від зміни зовнішніх умов роботи. Якщо в процесі управління відбуваються автоматичні зміни параметрів налаштувань і управляючих впливів, то такі зміни називають самоналаштуванням системи. Якщо ж у процесі пристосування змінюється структура системи, то її називають самоналаштувальною АСР з тимчасовою структурою. За способом самоналаштування розрізняють пасивні та активні системи. Окремим випадком адаптивних систем є оптимальні системи. Наприклад, система оптимального керування роботою електрофільтру, коли настройка регулятора напруги на електродах визначається з умов максимальної ефективності електрофільтру або мінімальної залишкової запиленості.

За характером використання інформації АСР ділять на розімкнені і замкнуті. АСР, у якої відсутній зовнішній зворотний зв'язок між вихідними і вхідними величинами, називають розімкнутою. Прикладами систем з жорсткою програмою управління є системи автоматичного пуску і зупинки вузла генерації рукавного фільтра. АСР, яка діє за принципом компенсації збурень, передбачає можливість вимірювання нових збурюючих факторів і усунення або зменшення їх впливу на кінцеві результати процесу.

Залежно від характеру дії різних ланок, що входять в АСР, розрізняють системи безперервної, дискретної і релейної дії.

До дискретних автоматичних систем відносять системи імпульсного регулювання, а також системи з цифровими обчислювальними пристроями.

Системою релейної дії називають таку систему, в якій хоча б в одній ланці при безперервній зміні вхідної величини вихідна величина в деяких точках процесу, залежних від значення вхідної величини, змінюється стрибком. Таку ланку називають релейною. Статична характеристика релейної ланки має точки розриву.

За способом математичного опису АС ділять на лінійні і нелінійні.

1) Системи з постійним заданим значенням регульованої величини (стабілізуючі АСР). Завдання регулятора в цих системах полягає в підтримці регульованої величини на певному, строго постійному значенні та стабілізації

параметрів процесу очищення газу. Стабілізуючі АСР отримали в даний час найбільшого поширення при автоматизації газоочисних установок.

2) Системи із змінним по заздалегідь відомому закону значенням регульованої величини (системи програмного регулювання). У них заданий вплив виробляється задатчиком регулятора, який змінює значення регульованої величини за певним законом у часі.

3) Системи, в яких задане значення регульованої величини визначається залежно від якої-небудь іншої величини, що довільно змінюється в часі (слідкуючі АСР).

За методом використання енергії, необхідної для переміщення регулюючих органів, АСР ділять на дві групи: прямої (безпосередньої) дії та непрямой дії. У системах прямої дії енергія, необхідна для переміщення регулюючого органу, надходить від сигналу безпосередньо від об'єкта на вхід регулятора; в системах непрямой дії використовується стороннє джерело енергії.

Залежно від виду енергії, що надходить від стороннього джерела, розрізняють електричні, пневматичні, гідравлічні і змішані АСР.

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Назвіть основні елементи та засоби автоматики.
2. Дайте пояснення, яка різниця між пасивним і активним елементом автоматики.
3. Загальна характеристика елементів автоматики. Класифікація елементів автоматики. Поняття « датчик», «реле» , «підсилювач».
4. Що являє собою датчик?
5. Поясніть принцип дії автоматичної системи регулювання.
6. Як класифікують автоматичні регулятори?
7. Яке призначення наступних елементів АСР: виконавчого механізму, регулювального органу, управляючого елемента, елементу порівняння, задавача та первинного вимірювального перетворювача?
8. Які типи автоматизованих систем регулювання розрізняють?

РОЗДІЛ 3 КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСІВ ОЧИСТКИ

Фізична величина – це кожна означена якісно властивість фізичних об'єктів. Фізичні величини існують в часі й просторі. Тому їх розміри і напрямки є функціями часу та координат простору [1-4].

Вимірювальною інформацією називають інформацію про значення вимірюваних фізичних величин. Матеріальними носіями вимірювальної інформації завжди є сигнали. Один із параметрів вимірювального сигналу, який містить вимірювальну інформацію, називають інформативним параметром.

Для отримання вимірювальної інформації вимірювальні сигнали піддають відповідним перетворенням. Переносниками інформації можуть бути і пасивні величини, розміри яких модулюються активними величинами. Модуляція та кодування органічно пов'язані між собою і покладені в основу всіх перетворень вимірювальних сигналів вимірювальної інформації, яка в них міститься. Відображення інформації умовними знаками (символами), зокрема цифровими, називається цифровим кодуванням. Відповідно до цього розрізняють аналогові та цифрові вимірювальні сигнали та аналогову і цифрову форми вимірювальної інформації. Аналоговий сигнал може бути неперервним або дискретним, а цифрові сигнали – завжди дискретні. Аналоговий сигнал стає цифровим після цифрового кодування.

Засобом вимірювальної техніки називають технічний засіб, який застосовується під час вимірювань і має нормовані метрологічні характеристики. Засобами вимірювань є вимірювальні прилади, реєструвальні прилади, вимірювальні канали, вимірювальні установки, вимірювальні системи.

3.1 Загальна характеристика очисних споруд як об'єктів автоматизації

Процес очищення характеризують змінні фізико-хімічні величини: тиск, температура, витрата, запиленість, хімічний склад, вологість, напруга на електродах і т.п., так звані *параметри* процесу. Для того щоб очисні установки працювали ефективно, необхідно підтримувати на певному рівні значення параметра, що характеризує процес очищення [3,4].

Нижче наводиться перелік контрольованих параметрів, найбільш важливих для забезпечення успішної роботи очисних споруд.

Температурний режим.

Вимірювання температури газів, що очищаються, необхідно проводити в наступних місцях пиловловлювальної установки:

- Охолоджувальний пристрій - на вході і виході газів. При застосуванні декількох послідовно встановлених охолоджувальних пристроїв (скрублер, газовий холодильник) температуру газів заміряють в кожному з них.

- Пиловловлювачі – на вході і виході; для великих установок, коли пиловловлювальні апарати покриті тепловою ізоляцією і розташовані в одній будівлі, тобто коли немає передумов для істотної різниці температури газів в окремих апаратах, заміри можна виконувати тільки у вхідному і вихідному газових колекторах. Однак у багатьох випадках бажано заміряти температуру і по окремим апаратам і, більше того, на їхніх секціях (для багатосекційних апаратів); це дозволяє надійно судити про розміри підсосів повітря, рівномірність газового навантаження, про роботу механізмів струшування та продувки (на рукавних фільтрах). В установках електрофільтрів в деяких випадках необхідно заміряти температуру в ізоляторних коробках з електричними підігрівачами. В установках рукавних фільтрів заміряють температуру повітря для продування. В установках мокрого пиловловлення і при охолоджуючих пристроях з подачею води проводять періодичні заміри температури води, яка подається і відходить.

Манометричний режим.

Необхідні заміри тиску (розрідження) газів здійснюють на вході і виході кожного апарату, що входить до складу технологічного ланцюга пиловловлювальної установки (охолоджувальний пристрій, грубий пиловловлювач, ексгаустер, апарат тонкого пиловловлювання та ін.). Різниця результатів замірів тиску (розрідження) на вході і виході кожного апарату дозволяє судити про його гідравлічний опір. Заміри на загальних колекторах пиловловлювальної установки (вхідному і вихідному) доцільно проводити реєструючими приладами.

Обов'язково реєструють тиск (розрідження) на вході і виході (іншими словами – гідравлічний опір) для тих апаратів, де цей параметр найбільш важливий для роботи установки (наприклад, для рукавних фільтрів). Кількість газів, що очищаються, заміряють на загальних вхідному і вихідному газових колекторах, бажано реєструючими приладами. Також бажано виконання замірів кількості газів, що очищаються, за окремими апаратам і за їх окремими секціями (ці виміри дозволяють контролювати розподіл газів по апаратам і секціях).

Тиск води, що подається в охолоджуючі пристрої (скрубери) або мокрі пиловловлювачі, бажано заміряти реєструючими приладами. Кількість води (оборотної, що додається свіжою, виведеної з циклу) для цих же апаратів (мокрих пиловловлювачів, охолоджувальних пристроїв) вимірюється водомірами або дросельними приладами з реєстрацією показань (у разі потреби).

Підсоси атмосферного повітря. У власне пиловловлювачах, а також і інших апаратах пиловловлювальної установки (наприклад, повітряних холодильниках та ін.) підсоси заміряють або по аналізу газів (найчастіше на CO_2 , SO_2 або O_2) на вході і виході апарату, в якому визначають підсоси, або по вимірах кількості газів в цих же місцях.

Ступінь уловлювання пилу (ефективність очищення газів). Контроль ступеня уловлювання пилу можна здійснювати як для всієї пиловловлювальної

установки в цілому, так і по окремих її апаратах і секціях. Для визначення ефективності очищення пиловловлювальної установки в цілому заміряють запиленість газів на загальних вхідному і вихідному газоходах (або тільки на загальному вихідному газоході). Якщо запиленість заміряють лише на загальному вихідному газоході, то можна розрахувати втрати пилу з газами, що йдуть в атмосферу, а при відомій величині маси вловленого пилу, - і ступінь її уловлювання.

Електричний режим. На установках електрофільтрів фіксують показники струму (первинного та вторинного) і напруги (вторинної) за показами приладів (амперметра, міліамперметра і вольтметра), встановленими на панелях управління високовольних агрегатів. Залежно від схеми живлення струмом високої напруги систем коронуючих електродів зазначені показники (сила струму, напруга) фіксують для окремих секцій або полів електрофільтрів. У деяких випадках застосовують реєструючі прилади.

Кількість уловленого пилу. Періодичність замірів кількості уловленого пилу для визначення ефективності очищення газів, виявлення розподілу пилу по окремих апаратах пиловловлювальної установки, виконання розрахунків із суміжними цехами, якщо пил використовується для вилучення з нього цінних компонентів - цілком визначається місцевими умовами. Рівним чином визначається і методика визначення кількості уловленого пилу: зважування автомашин або інших засобів транспортування, транспортні ваги і т.д.

Вологість газів при контролі визначають порівняно рідко, переважно при встановленні оптимального режиму роботи пиловловлювачів (в тому числі і температурного режиму для запобігання конденсації водяної пари). Вологість газів заміряють на вході в пиловловлювачі.

Хімічний склад пилу. Уловлений пил потрібно регулярно піддавати хімічному аналізу для визначення вмісту найбільш цінних компонентів, що встановлюються в кожному окремому випадку залежно від характеру і складу пилу.

Стан фільтрувальної тканини (в рукавних фільтрах) контролюють з використанням даних про ступінь уловлювання пилу, запиленості відхідних газів і втрат пилу, а також, наприклад, по осадженню пилу на прутках, що вводяться в окремі секції фільтрів, по візуальному спостереженню за прозорістю очищених газів, по даним оглядів фільтрувальних рукавів при ревізіях. Критерієм зносу тканини в залежності від терміну її служби може служити, наприклад, розривне навантаження тканини на розривній машині.

Низьконапірний (низьковакуумний) пневматичний транспорт. Тиск (розрідження) по трасі низьконапірного (низьковакуумного) пневматичного транспорту заміряють, по-перше, у вентилятора, а потім в місцях траси, найбільш схильних до забивання. Для замірів можуть бути застосовані водяні манометри. Крім перерахованих параметрів, слід контролювати: рівень заповнення бункерів пиловловлювачів пилом (шламом) і водяних затворів рідиною; щільність і вміст осаду для рідини, що відводиться з мокрих пиловловлювачів і охолоджувальних пристроїв (скрубєрів), а також для пульпи,

що подається з згущувача на фільтрацію, і для кеку, що знімається з фільтру; вміст у очищаються газах певних газових компонентів, наприклад SO₂ або CO. Вміст SO₂ в газах впливає, наприклад, на повноту їх використання для отримання сірчаної кислоти, а від вмісту CO залежить вибухонебезпечність газів.

Водовідведення і водоочищення.

Основними завданнями експлуатації очисних споруд водовідведення є:

- захист відкритих водойм від забруднення стічними водами, забезпечення очищення стічних вод і обробки осадів, їх відведення від очисних споруд згідно із затвердженим проектом, Правилами охорони поверхневих вод, Санітарними правилами і нормами охорони поверхневих вод від забруднення;
- створення умов для переробки стічних вод і осадів для їх подальшого використання;
- організація ефективної безперебійної і надійної роботи очисних споруд, зниження собівартості обробки стічних вод, економія електроенергії, реагентів і води, що витрачаються на технологічні цілі;
- систематичний лабораторно-виробничий і технологічний контроль роботи очисних споруд;

Автоматизація очисних споруд забезпечує автоматичне виконання ряду різноманітних операцій: приготування і дозування реагентів, обертання лопатних змішувачів, регулювання роботи фільтрів знезараження води, перемішування розчинів з водою, регулювання швидкості фільтрування, хлорування або озонування води, так як в умовах ручного управління потрібна висока точність виконання цих процесів по суті неможлива. На каналізаційних очисних спорудах підтримується автоматично потрібна температура осаду в метантенках, автоматично контролюється рівень осаду у відстійниках і його вилучення. За допомогою реєструючих приладів вимірюється приток стоків до споруд, витрата повітря, наявність в очищеній рідині розчиненого кисню.

Впровадження автоматичних пристроїв дозволяє скоротити чисельність обслуговуючого персоналу на очисних спорудах. Автоматизація технологічних вимірювань і сигналізації забезпечує оперативне отримання безперервної та достовірної інформації про зміну параметрів процесів, які протікають в спорудах. Автоматика дозволяє економити електричну енергію та реагенти. Автоматизація в значній мірі покращує умови праці на виробничих об'єктах. Також автоматика використовується для аварійного захисту установок, відключення окремих агрегатів при аваріях і заміні їх резервними, а також для сигналізації про роботу окремих споруд та їх електротехнічного обладнання. Без автоматизації неможливо знизити собівартість продукції, дотримуватись діючих державних стандартів на показники якості викидів та захистити природні водойми від подальшого їх забруднення.

3.2 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 [3]:

- 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.

3.2.1 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 [3]. 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 $^{\circ}F$. За цією шкалою точка плавлення льоду дорівнює 32, а кипіння води $212^{\circ}F$.

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

$$t^{\circ}\text{C} = T \text{ K} - 273,15 = 0,556 (n^{\circ}\Phi - 32), \quad (3.1)$$

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

3.2.2 Класифікація приладів для вимірювання температури

Прилади для вимірювання температури поділяють залежно від використовуваних ними фізичних властивостей речовин на такі групи з діапазоном показань [3]:

Термометри розширення (-190...+650°C) засновані на властивості тіл змінювати під дією температури свій об'єм.

Манометричні термометри (-160...+200°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...+650°C) засновані на властивості металевих провідників змінювати залежно від нагрівання їх електричний опір.

Термоелектричні термометри (-50...+1800°C) побудовані на властивості різнорідних металів і сплавів утворювати в парі (спаї) термоелектрорушійну силу, що залежить від температури спаю.

Пірометри (-30...+6000°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°C (точка кипіння) і середній температурний коефіцієнт об'ємного розширення $0,18 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

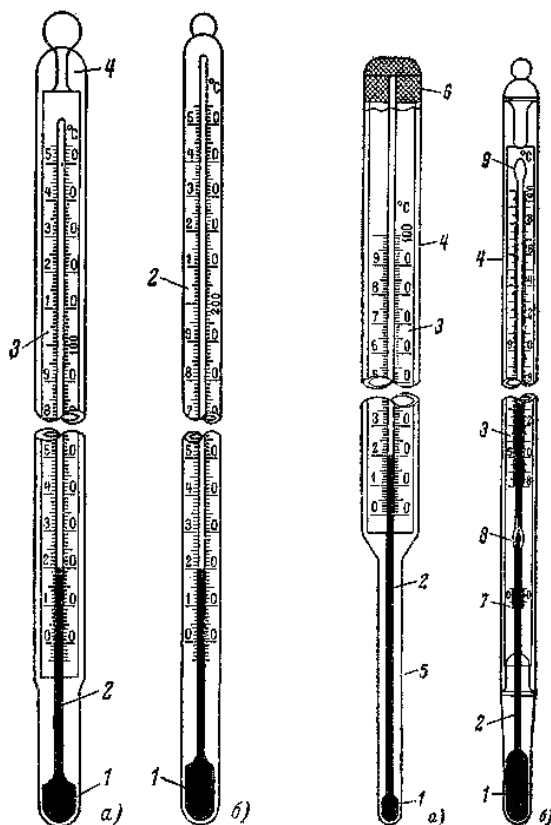
Термометри з органічними рідинами здебільшого придатні лише для вимірювання низьких температур у межах до 100°C.

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.

3.2.3 Ртутні термометри

Ртутні термометри за призначенням поділяють на **промислові (технічні), лабораторні і зразкові** [3]. 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.3.1).



а - з вкладеною шкалою; *б* – паличний

Рисунок 3.1 – Ртутні термометри

Термометр із вкладеною шкалою має заповнений ртуттю резервуар 1 (рис.3.1 *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.3.1 *б*), з'єднаного з товстостінним капіляром 2 зовнішнім діаметром 6-8 мм. Шкала термометра нанесена безпосередньо на поверхні 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 встановлення, 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 встановлення термометра, що дає більшу втрату тепла в навколишнє середовище, може привести до заниження його показань на 10-15% [3].

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

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

Досить поширеним є встановлення термометра в захисній гільзі (рис.3.2), 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 від гільзи до резервуара термометра кільцевий зазор, що утвориться в гільзі, між резервуаром та її стінкою заповнюється при вимірюванні температури до 150⁰С 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 встановлюється 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.3.2 *a*), тому що при цьому умови обтікання кінця гільзи досить сприятливі. На горизонтальному трубопроводі діаметром до 200 мм термометр установлюється похило до осі труби, назустріч потоку (рис.3.2 *б*). При діаметрі трубопроводу більше 200 мм термометр може бути розміщений за нормаллю до осі труби (рис.3.2 *в*). На прямій вертикальній ділянці трубопроводу з висхідним потоком термометр завжди встановлюється похило, назустріч потоку (рис.3.2 *г*). Установлювати термометри на вертикальних трубопроводах зі спадним потоком не рекомендується.

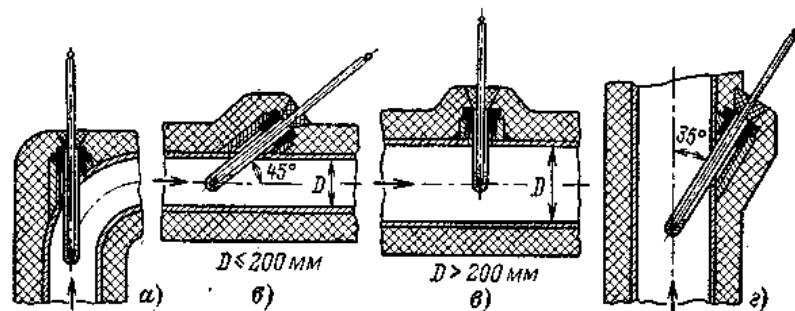


Рисунок 3.2 - Установлення ртутного термометра у захисній гільзі

3.2.4 Дилатометричні термометри

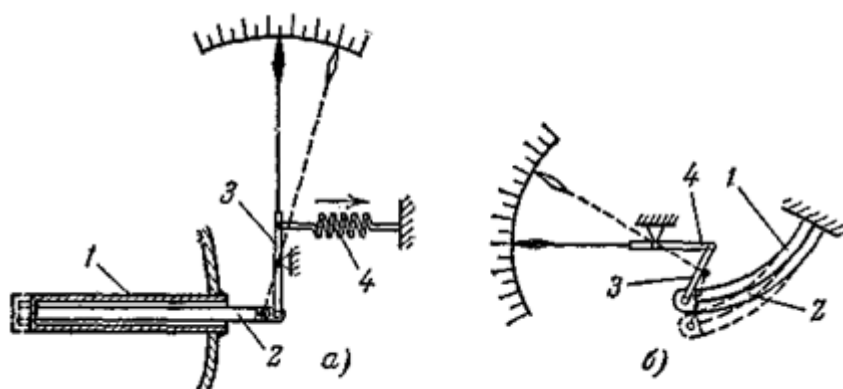
До дилатометричних термометрів відносять **стрижневі і пластинчастий (біметалічний)** термометри, дія яких заснована на відносному подовженні під впливом температури двох твердих тіл, що мають різні температурні коефіцієнти лінійного розширення.

Стрижневий термометр (рис.3.3 *a*) має закрити 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.3.3 *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 у бік металу з меншим коефіцієнтом лінійного розширення [3].

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.



a – стрижневий; *б* – пластинчастий

1 – металева смужка, яка має великий коефіцієнт лінійного розширення;
 2 – металева смужка, яка має малий коефіцієнт лінійного розширення; 3 – тяга;
 4 – важелі;

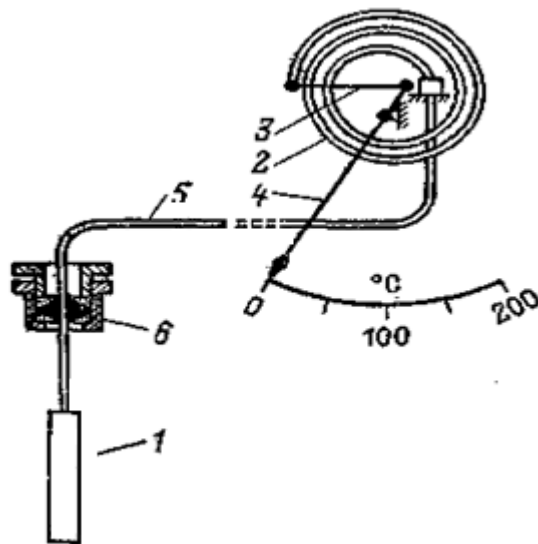
Рисунок 3.3 – Дилатометричні термометри

3.2.5 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.3.4.



1 – термобалон; 2 – трубчаста пружина; 3 – тяга; 4 – вказівна стрілка; 5 – капіляр

Рисунок 3.4 – Схема манометричного показуючого термометра

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.

3.2.6 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 електровимірювальним приладом, можна знайти реальне значення температури в місці вимірювання [3].

Термоелектричний термометр, що складається із двох спаяних і ізольованих 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.

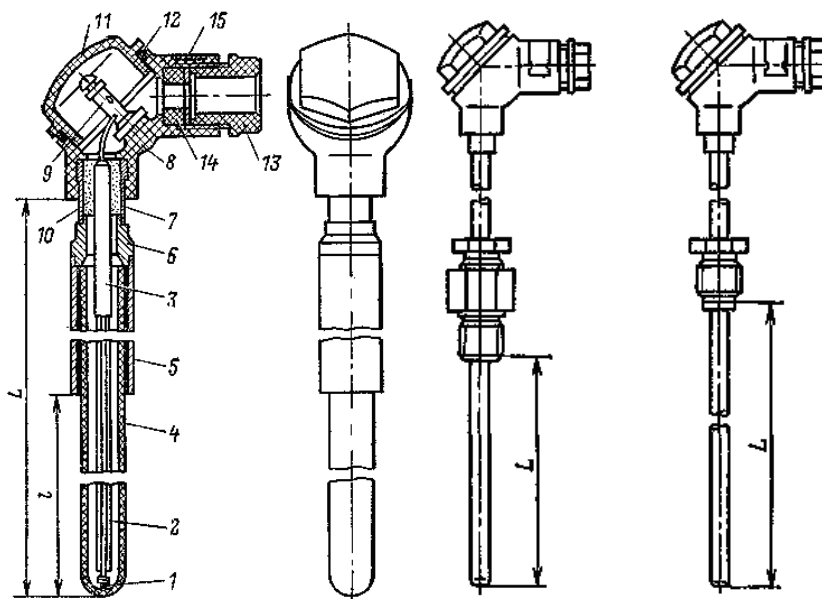
Для одержання порівняно високих значень термоерс вибір термоелектродів проводиться таким чином, щоб у парі із платиною один з них створював позитивну, а інший - негативну термоерс.

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.3.5 показано будову термометра типу ТПП.



а)

б)

1 - робочий кінець (спай); 2,3 - порцелянові трубки ; 4- захисний чохол; 5 - сталеву трубку; 6 - сталеві втулки; 7 - захисний чохол; 8 – корпус; 9 – затискач; 10 - термоелектроди; 11 - знімна кришка; 12 - прокладка; 13 – штуцер; 14- ущільнення; 15 – металева табличка

Рисунок 3.5 – Термоелектричний термометр

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.

3.2.7 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 [3].

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 головою для підключення з'єднувальних проводів, є первинним вимірювальним перетворювачем, який живиться від стороннього джерела струму.

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

Кінцева межа вимірювань дровових термометрів опору, обумовлена стійкістю їх при нагріванні, дорівнює 650°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.

3.2.8 Пірометри

Пірометри застосовуються для вимірювання температури тіл у діапазоні від мінус 30 до плюс 6000°C . 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 [3].

З підвищенням температури нагрітого тіла інтенсивність його теплового випромінювання у вигляді електромагнітних хвиль різної довжини швидко зростає. При нагріванні до 500°C 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 градуувати 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 пірометрами спектрального відношення*.

Оптичні пірометри широко застосовуються в лабораторних і виробничих умовах для вимірювання температур вище 800°C [3]. 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.

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 нуля-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 °С радіаційної температури, має нерівномірні розподіли, сильно стислі на початку і розтягнуті наприкінці.

Для вимірювання температур вище 3000 °С 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.

3.2.9 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 [3].

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

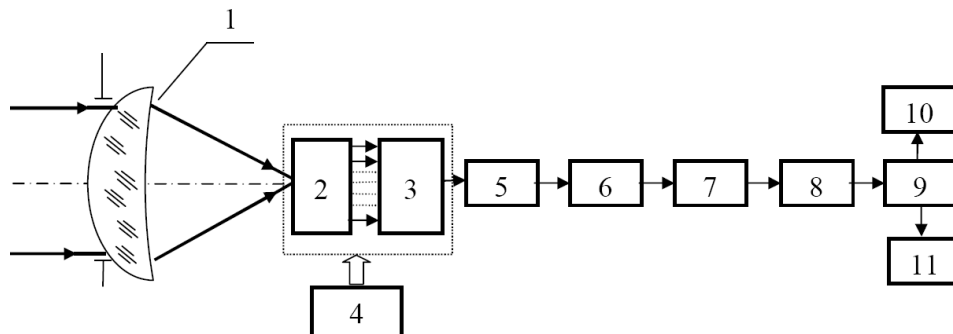
Сучасний тепловізор має досить просту будову: об'єктив, тепловізійну матрицю (чутливий елемент) і електронний блок обробки сигналу. Матриця - це ґратка мініатюрних детекторів, що сприймає інфрачервоні сигнали і перетворює їх в електричні імпульси, які після посилення перетворюються у відеосигнал. Розмір фотоелектричних матриць у середньому 640×480 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°С. 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.3.6 наведена узагальнена функціональна схема тепловізора з фокальною ІК-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

Рисунок 3.6 – Узагальнена функціональна схема тепловізора з фокальною матрицею

Принцип дії тепловізорів. Принцип роботи тепловізорів полягає в тому, що вони "бачать" не відбите інфрачервоне випромінювання, а власне випромінювання цілей і предметів [3]. 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 налаштувати 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.

Області застосування тепловізорів. Тепловізори застосовуються для контролю стану об'єктів і технологічних процесів у різних галузях промисловості, а також при проведенні наукових досліджень [3].

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.

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°C.

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 устанавлення 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 огорожуючих 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.

3.3 Вимірювання тиску

Тиском називають відношення сили, що діє перпендикулярно до поверхні, до площі цієї поверхні. Тиск - одна з основних величин, що визначає термодинамічний стан речовин [3]. 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_b) – 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:

$$P_a = P_{\bar{o}} + P. \quad (3.2)$$

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

$$P_a = P_{\bar{o}} - P. \quad (3.3)$$

В окремому випадку, коли P або $P_{\bar{o}}$ дорівнює нулю, абсолютний тиск дорівнює атмосферному.

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

$$V = \frac{P_{\bar{o}}}{P_a} \cdot 100. \quad (3.4)$$

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

Повний тиск середовища, що рухається (P_{Π}), складається зі статичного (P_c) і динамічного (P_d) тисків:

$$P_{\Pi} = P_c + P_d. \quad (3.5)$$

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

$$P_d = \frac{v^2 \cdot \rho}{2}, \quad (3.6)$$

де v – швидкість руху речовини, м/с;

ρ – густина речовини, кг/м³.

У Міжнародній системі одиниць (SI) за одиницю тиску береться *Паскаль* (Па) – тиск, створюваний силою в 1 *ньютон* (Н), рівномірно розподіленої по поверхні площею 1 м² і спрямованої нормально до неї.

Несистемна одиниця тиску (1 кгс/см²) дорівнює тиску на площу 1 см² сили в 1 кгс, де 1 кгс – сила, що надає масі в 1 кг нормального прискорення вільного падіння в 9,81 м/с². Одиниця тиску системи МКГСС (метр, кілограм-сила, секунда) дорівнює 1 кгс/м².

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. Неважко встановити, що тиск в 1 мм.вод.ст. дорівнює тиску в 1 кгс/м².

Несистемна одиниця тиску – бар дорівнює тиску 1·10⁵ Па, або 1,01972 кгс/см². Ця одиниця зручна у тому відношенні, що числа, що виражають тиск у барах і кгс/см², відрізняються між собою не більше ніж на 2%.

Через те, що зазначені одиниці – кгс/см², 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 (0,645·10⁻³ м²).

Співвідношення між одиницею тиску системи SI і колишніми наведені в табл.3.1.

Таблиця 3.1 - Співвідношення між одиницями тиску

Одиниця тиску	Па	бар	кгс/см ²	кгс/м ²	мм рт. ст.
Па	-	1×10 ⁻⁵	10,2×10 ⁻⁶	0,102	7,5×10 ⁻³
бар	1×10 ⁵	-	1,02	10,2×10 ³	750
кгс/см ²	98,1×10 ³	0,981	-	1×10 ⁴	735,6
кгс/м ²	9,81	98,1×10 ⁻⁶	1,10 ⁻⁴	-	73,56×10 ⁻³
мм рт. ст.	133,3	1,333×10 ⁻³	1,36×10 ⁻³	13,6	-

Для наближеного перелічення тиску, вираженого в кгс/см² і кгс/м², 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/см² відповідає тиску в 10 МПа, а тиск у 100 кгс/м² – 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** – вакууметри 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.

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.

3.3.1 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 [3].

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 δ 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 [3].

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 перетворюється в кутове переміщення стрілки на $270 - 300^\circ$.

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.3.7 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 запаєний 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 трибкосекторний механізм.

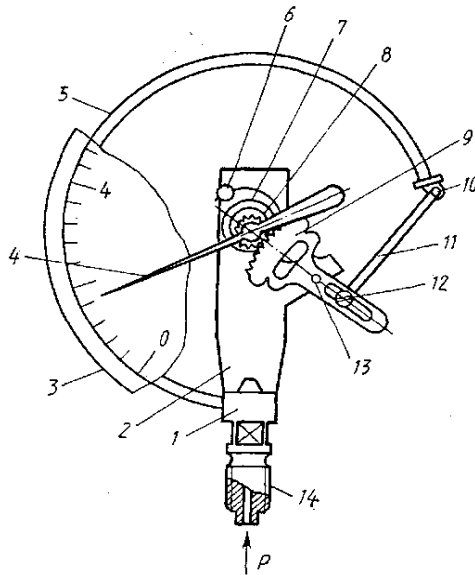


Рисунок 3.7 – Схема манометра з одновитковою трубчастою пружиною

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 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 вимірюваному 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 сигналізуючими пристроями. Ці засоби вимірювання тиску мають назву **електроконтактних** [3]. Клас точності електроконтактних манометрів і вакуумметрів 1,5. Похибка спрацьованості сигналізуючого пристрою $\pm 2,5\%$.

Загальний вигляд манометра-сигналізатора електроконтактного типу показаний на рис.3.8. 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.

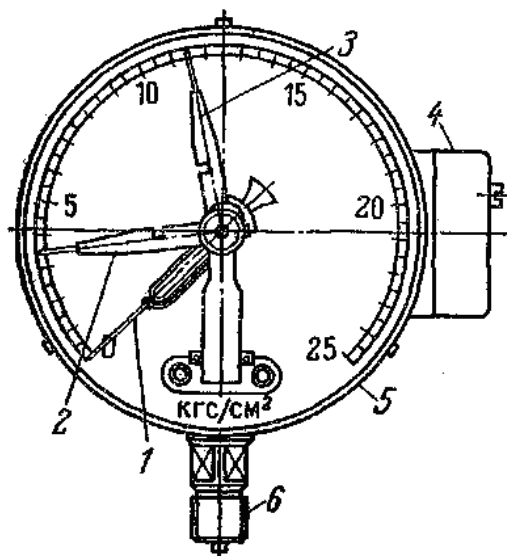


Рисунок 3.8 – Манометр- сигналізатор

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 [3].

Вимірювальні прилади із сифонним чутливим елементом. Прилади цього типу призначені для вимірювання надлишкового тиску, розрідження і різниці тисків. Їх виконують показуючими і самописними. Схема самописного сифонного манометра показана на рис.3.9.

Вимірювальний тиск через штуцер 11 подається в камеру 10, де розміщений деформаційний чутливий елемент – сифон 9. Для збільшення твердості сифона всередині нього розміщена гвинтова пружина 8. Під дією тиску сифон 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 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 сифонних приладів обмежена тисками 0,025-0,4 МПа. Класи точності сифонних манометрів надлишкового тиску, вакуумметрів і мановакуумметрів 1,5; 2,5.

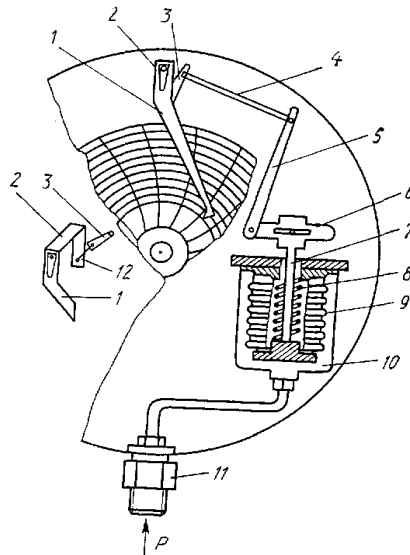


Рисунок 3.9 — Схема самописного сифонного манометра

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

Зразкові манометри типу МО (рис.3.10) застосовуються для перевірки промислових манометрів, а також для виконання точного вимірювання тиску в лабораторних установках. Прилади мають трубчасту пружину і зубчасто-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/см². Шкала має 100 умовних поділок із цифровими поділками через кожні 5 поділок. Для переведення умовних поділок у кгс/см² 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°С і відносної вологості до 80%.

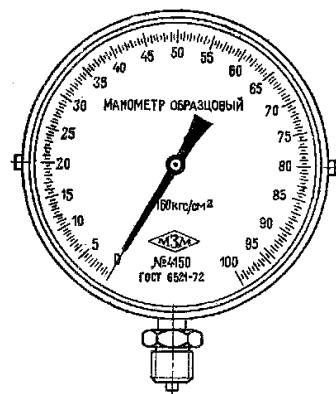


Рисунок 3.10 – Зразковий манометр типу МО

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 трибкосекторного механізму перетворюється в обертовий 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.

3.3.2 Встановлення 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 [3].

Показання трубчасто-пружинного манометра залежать від температури чутливого елемента, тому устанавлення 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°C, тому манометри не можна встановлювати біля сильно нагрітих поверхонь. При устанавленні манометра безпосередньо в місцях вимірювання тиску пари або гарячої води для захисту приладу від надмірного нагрівання на сполучній лінії перед ним устанавлюється кільцева або U-подібна сифонна трубка, що утворить гідравлічний затвор з остиглої рідини.

Для устанавлення манометра при робочому тиску середовища до 2,5 МПа застосовується триходовий пробковий кран, а вище – триходовий вентиль. Іноді в сполучній лінії розміщуються два вентиля: один для відключення приладу, а інший – для з'єднання його з атмосферою. Загальний вигляд устанавки показуючого манометра на паропроводі високого тиску наведений на рис.3.11.

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.

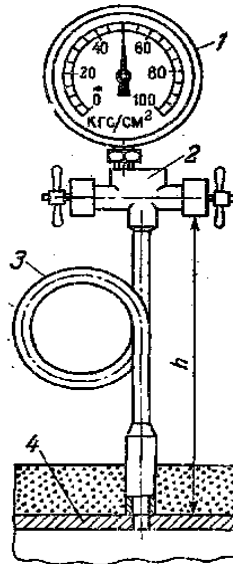


Рисунок 3.11 – Установлення манометра

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 сталевий 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 устанавлення 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 устанавленні манометрів служать пароніт (до 6 МПа) і відпалена червона мідь (понад 6 МПа).

3.3.3 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 [3].

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 у бік 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 $0-60^\circ\text{C}$.

3.3.4 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.3.12 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.3.12 б) містить деформаційний чутливий елемент 1 і ДТ-елемент 2. Перетворювальний елемент являє собою каркас із діелектрика, на якому

розміщені котушка з первинною обмоткою 7, що складається із двох секцій, відповідно намотаних, і двох секцій 4, вторинних обмоток 5, увімкннутих зустрічно. У середині каналу котушки розміщене рухоме осердя 6 з магнітом'якого матеріалу, пов'язане із пружиною 1 тягою 3.

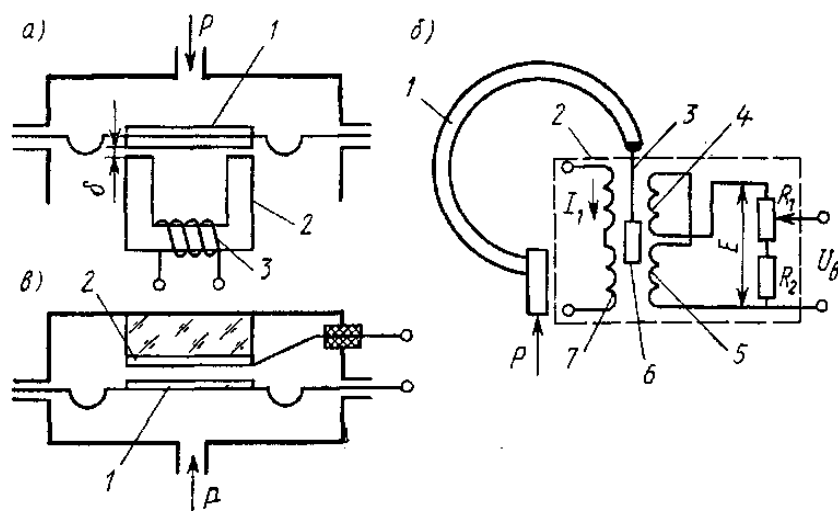


Рисунок 3.12 – Схеми вимірювальних перетворювачів тиску

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 [3].

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.3.12 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 δ 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 [3].

Дістали поширення дротові 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 $0-10^{-3}$ до 0-60 МПа; розрідження – 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

$$Q = k \cdot N, \quad (3.7)$$

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

На рис.3.13 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 [3]. 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

$$Q = k \cdot P \cdot F, \quad (3.8)$$

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.

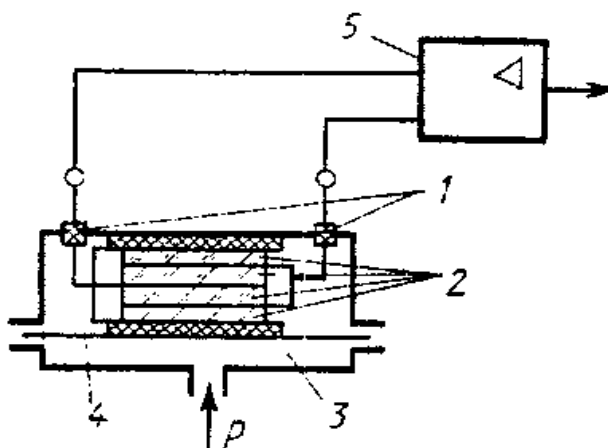


Рисунок 3.13 – Схема п'єзоелектричного вимірювального перетворювача тиску

Чутливість п'єзоелектричних 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.

3.4 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 (m^3), 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, м³/с і м³/год, а масової – кг/с, кг/год и т/год.

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

$$Q_m = Q_{об} \cdot \rho, \quad (3.9)$$

де Q_m – масова витрата речовини, кг/год;

$Q_{об}$ – об'ємна витрата речовини, м³/год;

ρ – густина речовини, кг/м³.

Для зведення об'ємної витрати сухого газу $Q_{об}$ у робочому стані до витрати $Q'_{об}$ (м³/год) у нормальному стані є залежність

$$Q'_{об} = Q_{об} \frac{p \cdot T'}{p' \cdot T \cdot K}, \quad (3.10)$$

де p і p' – тиски газу в робочому і нормальному станах, Па;

T і T' – температури газу в робочому і нормальному станах, К;

K м 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:

Контактні

- Статичні:

1. Змінного перепаду тиску: діафрагми, сопла, сопла Вентурі, труби Вентурі.

2. Трубки Піто.

3. Щиткові.

4. Вихрові.

- Динамічні:

1. Об'ємної дії: кулачкові (шестеренні), ротаційні, поршневі, мембранні.

2. Швидкісні: турбінні, крильчасті.

3. Ротаметри

4. Вібраційні

Безконтактні

Швидкісні:

1. Теплові.

2. Індукційні.

3. З мітками.

4. Ультразвукові: часоімпульсні, частотно-імпульсні, доплерівські, фазові

3.4.1 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 градированої 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 градирується 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 якої 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.3.14 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 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.

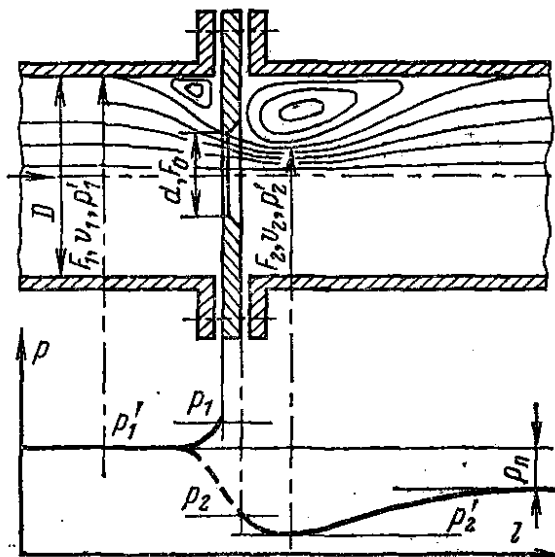


Рисунок 3.14 – Характер потоку при встановленні звужуючого пристрою

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_{II} 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:

$$\begin{aligned} G &= \alpha \frac{\pi \cdot d^2}{4} \sqrt{2\rho(P_1 - P_2)}, \\ Q &= \alpha \frac{\pi \cdot d^2}{4} \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_1 - P_2)}. \end{aligned} \quad (3.11)$$

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 (3.11) 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

$$\begin{aligned} G &= C \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot d^2 \cdot \sqrt{\rho \cdot (P_1 - P_2)}, \\ Q &= C \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot d^2 \cdot \sqrt{\frac{1}{\rho} \cdot (P_1 - P_2)}, \end{aligned} \quad (3.12)$$

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

ρ – густина середовища;

d – діаметр отвору діафрагми;

α – коефіцієнт діафрагми (величина, яка тарується);

P_1 і P_2 – відповідно тиск потоку перед діафрагмою і після неї.

Рівняння (3.11) і (3.12) 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 [3]: *витратомірна діафрагма* (рис.3.15 а), *витратомірне сопло* (рис.3.15 б), *сопло Вентурі* (рис.3.15 в) і *труби Вентурі* (рис.3.15 г), які мають посередині круглий отвір. Дослідним шляхом для цих звужуючих пристроїв знайдені точні значення коефіцієнта витрати α , що дозволяє застосовувати їх без попереднього градування. На рис.6.2 показані місця відбору тисків P_1 і P_2 від звужуючих пристроїв до дифманометра. Характерною рисою звужуючих пристроїв (рис.3.16 б, в, г) є менша, ніж для діафрагми, безповоротна втрата тиску.

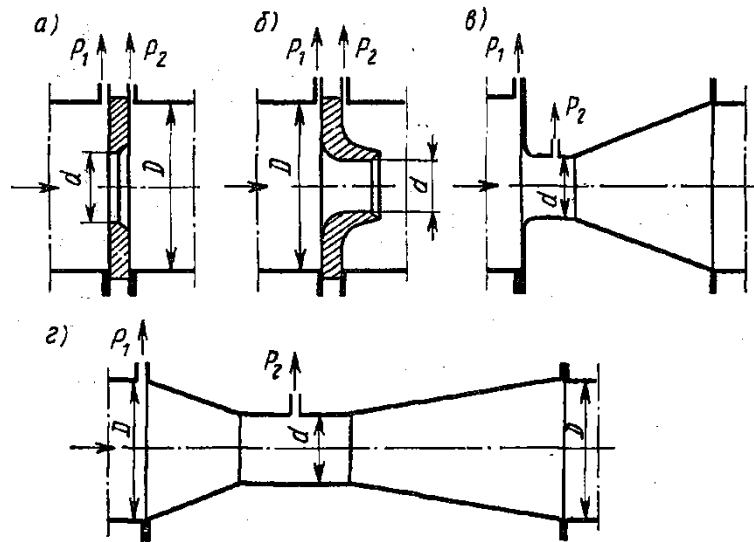
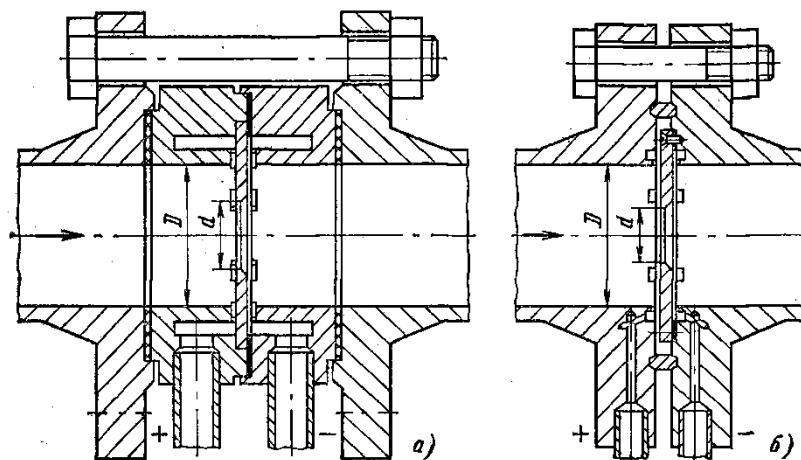


Рисунок 3.15 – Схеми стандартних звужуючих пристроїв

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.3.16 показана схема установа на трубопроводі діафрагми, рис.3.16 *а* – камерного типу, а на рис.3.16 *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.



а – камерна; *б* - безкамерна

Рисунок 3.16 – Установлення діафрагм у трубопроводі:

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 α . 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 α . Рекомендується зазначену арматуру по можливості розміщувати за звужуючим пристроєм.

Встановлення дифманометрів. Дифманометри призначені для визначення перепаду тиску між двома точками вимірювання в рідкому, газовому або паровому середовищі [3]. Особливо широкого застосування вони набули для вимірювання перепаду тиску у витратомірах із звужуючим пристроєм. Основна похибка двотрубних дифманометрів ± 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.

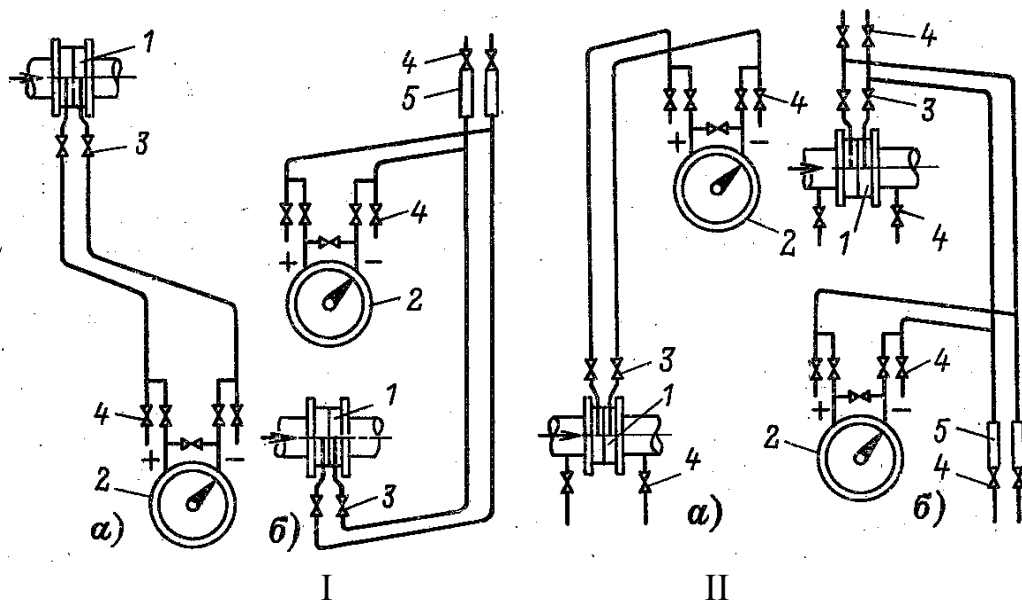
Щоб уникнути запізнювання показань, довжина сполучних ліній звичайно не перевищує 50 м, а внутрішній діаметр їх становить не менше 6 мм. Для вільного видалення зі сполучних трубок води (газові лінії) або повітря

(водяні лінії) вони прокладаються вертикально або з нахилом не менше 0,1 у бік 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.3.17) може бути встановлений вище або нижче звужуючого пристрою 1. При вимірюванні витрати рідини бажано установлення 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 установлюються газозбірники із продувними вентилями (поз. 4, 5).

При вимірюванні витрати газу (повітря) дифманометр доцільно встановлювати вище звужуючого пристрою 1 (рис.6.4 IIб). У випадку зворотного розміщення в нижніх точках сполучних ліній містяться відстійні посудини для води 4, що утворюється під час конденсації пари [3].

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.



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

Рисунок 3.17 – Схема установлення дифманометра у комплекті зі звужуючим пристроєм:

3.4.2 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 $Q_{об}$ ($\text{м}^3/\text{с}$) речовини залежністю

$$Q_{об} = v_{cp} \cdot F, \quad (3.13)$$

де v_{cp} – середня швидкість потоку, $\text{м}/\text{с}$;
 F – поперечний переріз потоку, м^2 .

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:

$$Q_{об} = \frac{n \cdot F}{C}, \quad (3.14)$$

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

З формули (3.14) 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 (3.14) 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 [3].

Крильчасті лічильники призначені для встановлення 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.3.18 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 стрілковороликовий 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.

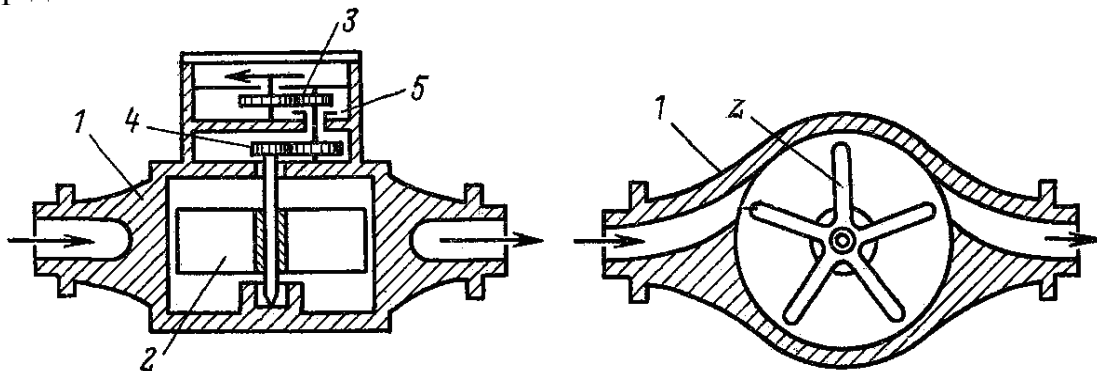


Рисунок 3.18 – Схема крильчастого лічильника води

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 (3.14) набирає вигляду

$$Q_{об} = \frac{n \cdot F \cdot l}{K}, \quad (3.15)$$

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

Гідрравлічний опір лічильників при номінальній витраті становить 2000-2500 Па.

Установлення турбінних лічильників найчастіше виконується в горизонтальних трубопроводах, хоча при висхідному потоці допускається встановлення під кутом і вертикально. Для заспокоєння потоку довжина прямої ділянки трубопроводу перед лічильником вибирається такою, що дорівнює $10D_y$, 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.

3.4.3 Анемометри

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 - анемометри, які придатні для вимірювання газових потоків, що перебувають під невеликим надлишковим тиском [3].

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

Механічний анемометр. Чутливим елементом анемометра 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.3.19) являє собою металеве кільце 1, усередині якого на горизонтальній осі закріплена крильчатка 2 з лопатями, що розміщені на спицях під 45° 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.

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.

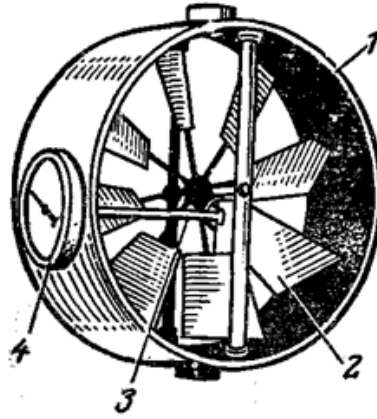


Рисунок 3.19 - Крильчастий анемометр

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.

3.4.4 Об'ємні лічильники

Принцип дії об'ємних лічильників ґрунтується на відмірюванні певного об'єму речовини, який проходить через прилад, і підсумовуванні результатів цього вимірювання [3]. 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.3.20. 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 зливу рідини з мірних баків у збирач служать зливальні патрубки із запірними клапанами 12 і 13. Кожен мірний бак попередньо градується, 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 [3] застосовуються для вимірювання кількості рідини в широкому діапазоні в'язкості (до $300 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$). Дія їх ґрунтується на відмірюванні (витисненні) певних обсягів рідини, які утворюються між стінками вимірювальної камери і овальними шестернями, 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.

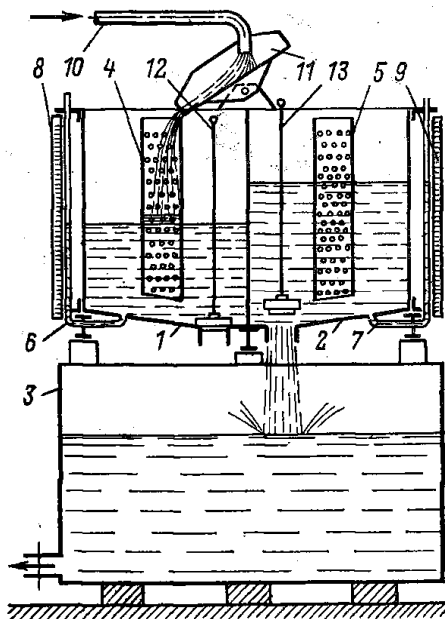


Рисунок 3.20 – Мірний бак

Кількість рідини, що пройшла через лічильник, розраховується за кількістю обертів однієї з його шестерень, зв'язаної з рахунковим стрілковороликовим 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 корпусом приладу. Лічильники рідини з овальними шестернями призначені для установа в горизонтальних трубопроводах, причому осі обертання шестерень розміщуються горизонтально, а круговий циферблат – вертикально нульовою оцінкою шкали вгорі. 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 $0,7 \cdot 10^{-3} - 60 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$. Гідравлічний 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 [3] в основному застосовуються для вимірювання кількості горючих газів, принцип дії яких той самий, що і лічильників рідини з овальними шестернями. Ротаційний лічильник (рис.3.21) 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 лопатей 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.3.21 не показані).

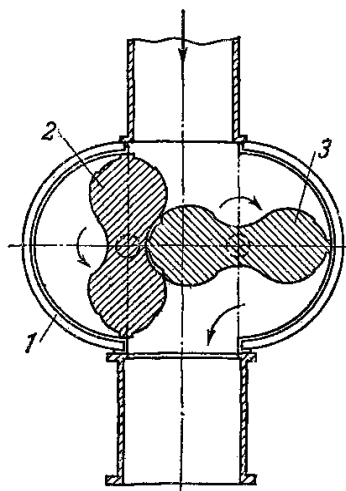


Рисунок 3.21 – Схема ротаційного лічильника

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.

3.4.5 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.3.22 наведені принципові схеми перетворювальних елементів витратомірів обтікання, що дістали найбільшого поширення [3].

Згідно зі схемою рис.3.22 *а* в конічній трубці 1 розміщений поплавець 2, при підніманні якого нагору під дією потоку збільшується площа прохідного кільця між поплавцем і стінкою конічної 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.3.22 *б*). На схемі рис.3.22 *в* при підніманні поршня 1 збільшується площа вихідного бічного отвору 3 у стінці циліндра 2.

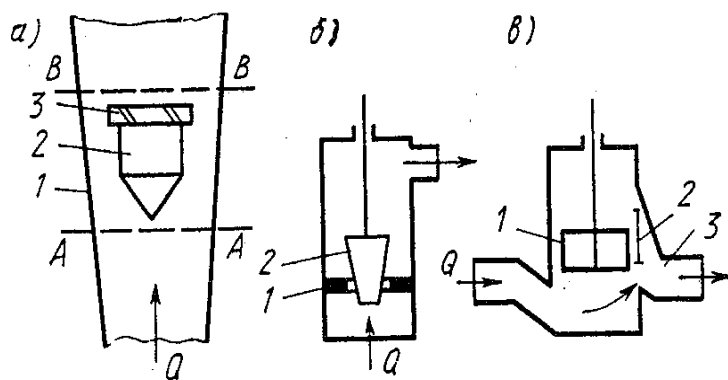


Рисунок 3.22 – Схеми витратомірів обтікання

Витратоміри обтікання, які застосовуються для вимірювання витрати рідин і газів, мають кілька різновидів. Найпоширеніші з них наведені на рис.3.23. У ротаметрах зі скляною конічною трубкою 1 (рис.3.23 *а*), призначених для вимірювання газів або прозорих рідин, шкала 4 нанесена безпосередньо на зовнішній поверхні скла. Показчиком 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.

Для вимірювання витрати непрозорих рідин (рис.3.23 *б*) застосовують циліндричну скляну трубку 3 і циліндричний поплавець 1 з отвором посередині, через який проходить нерухомий стрижень 2 конічного перетину.

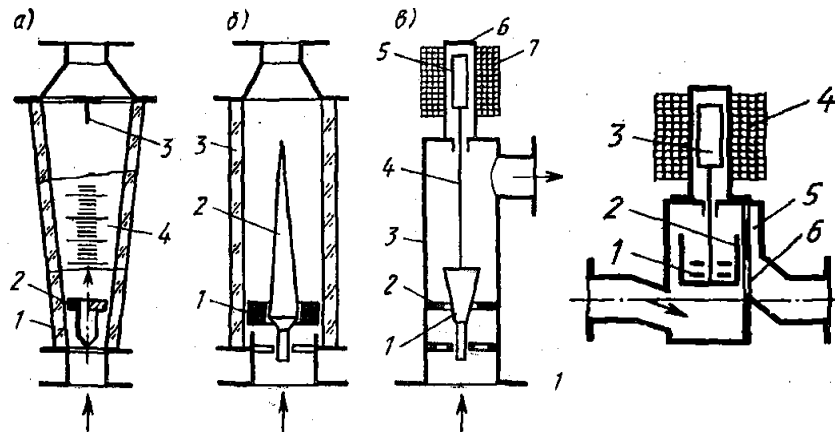


Рисунок 3.23 – Конструктивні схеми ротаметрів

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.3.23 в) або пневматичним вихідним сигналом.

Ротаметр, показаний на рис.3.23 в, складається з металевого корпусу 3, усередині якого при зміні витрати переміщується 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.3.23 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 переміщується усередині немагнітної трубки, на якій установлена 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.

3.4.6 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 [3].

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:

$$E = B \cdot l \cdot v_{cp} = \frac{4 \cdot B \cdot Q}{\pi \cdot d} \quad , \quad (3.16)$$

де B – магнітна індукція;

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

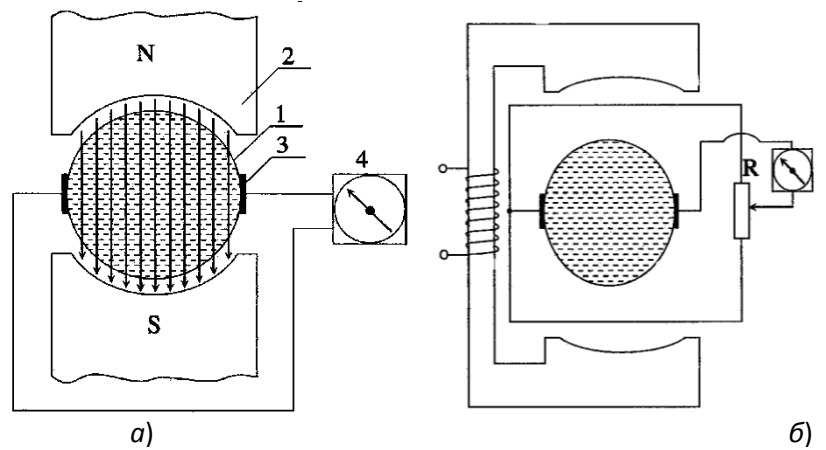
v_{cp} – середня швидкість руху рідини, м/с;

Q – витрата рідини, що протікає, м³/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 [3].

Схема електромагнітного витратоміра з постійним магнітним полем зображена на рис.3.24 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.



а) – з постійним магнітним полем; б) – зі змінним магнітним полем
Рисунок 3.24 – Схема електромагнітного витратоміра

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, залізобуглецеві 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. [3].

Для вимірювання витрати середовищ із іонною провідністю застосовуються витратоміри зі змінним магнітним полем, створюваним електромагнітом (рис.3.24 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.

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.

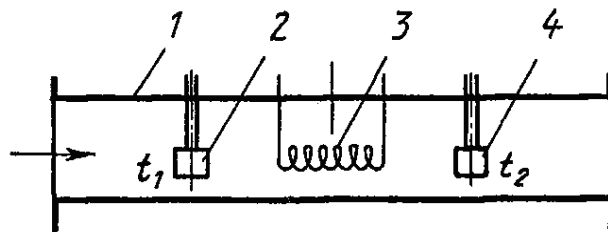
До основних недоліків електромагнітних витратомірів можна віднести:

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

3.4.7 Теплові витратоміри

Принцип дії теплових витратомірів ґрунтується на нагріванні потоку речовини і вимірюванні різниці температур до 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 [3].

Схема калориметричного витратоміра показана на рис.3.25. 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 .



1 – трубопровід; 2,4 – термоперетворювачі; 3 – нагрівач потоку

Рисунок 3.25 – Схема калориметричного витратоміра

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 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 Δt 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 Δt . Таким чином, при більших витратах різниця температур Δt обернено пропорційна витраті [3].

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

$$G = \frac{N}{k \cdot c_p \cdot \Delta t}, \quad (3.17)$$

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 (3.17) видно, що вимірювання масової витрати може бути здійснено двома способами:

1. За значенням подаваної до нагрівача потужності N , що забезпечує постійну задану різницю температур Δt .

2. За значенням різниці Δt 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) [3,4].

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.

3.4.8 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 [3,4].

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 Δt проходження відстані L цими хвилями пропорційна швидкості v середовища. Одним зі способів вимірювання Δt є вимірювання різниці фаз змінних напрямків, що виникають на приймаючих п'єзоелементах

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

$$Q = \frac{F \cdot L}{2} \cdot (f_1 - f_2), \quad (3.18)$$

де F – перетин трубопроводу (каналу), м^2 ;

L – відстань між приймачами ультразвукового сигналу, м ;

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

Як бачимо з формули (3.18), 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 напрямком ультразвукового сигналу зі швидкістю c усе більше відхиляється за напрямком швидкості потоку (рис.3.25). Кут відхилення напрямку сигналу α буде визначатися виразом:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{v}{c}\right). \quad (3.19)$$

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 $V[3,4]$.

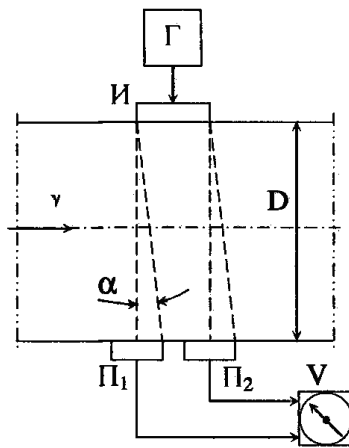


Рисунок 3.25 - Ультразвуковий витратомір з вертикальним відхиленням ультразвуку

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-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 м³/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%.

3.4.9 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) [3,4].

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.

3.4.10 Ваговий метод вимірювання витрати сипучих середовищ

Ваговий метод вимірювання масової витрати сипучої речовини полягає в періодичному або безперервному вимірюванні сили ваги, створеної вагою окремих порцій або ділянок потоку сипучої речовини [3,4].

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.

3.5 Вимірювання рівня рідин

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[3,4].

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...±100) мм або (0...±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* [3,4].

3.5.1 Візуальні, поплавкові та буйкові 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 (рис.3.26). Вимірювання рівня за допомогою скляних рівнемірів 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 [3,4].

Через низьку механічну міцність скляні рівнеміри звичайно виконують довжиною не більше 0,5 м. Тому для вимірювання рівня в резервуарах встановлюється декілька скляних рівнемірів з тим розрахунком, щоб вони перекривали один одного. Абсолютна похибка вимірювання рівня скляними рівнемірами ±(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 [3,4].

Серед існуючих різновидів рівнемірів **поплавкові** є найбільш простими. Дістали поширення поплавкові рівнеміри вузького і широкого діапазонів. Поплавкові рівнеміри вузького діапазону (рис.3.26) 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.3.26 а) і *камерні* (рис.3.26 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.3.26 в) являють 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.

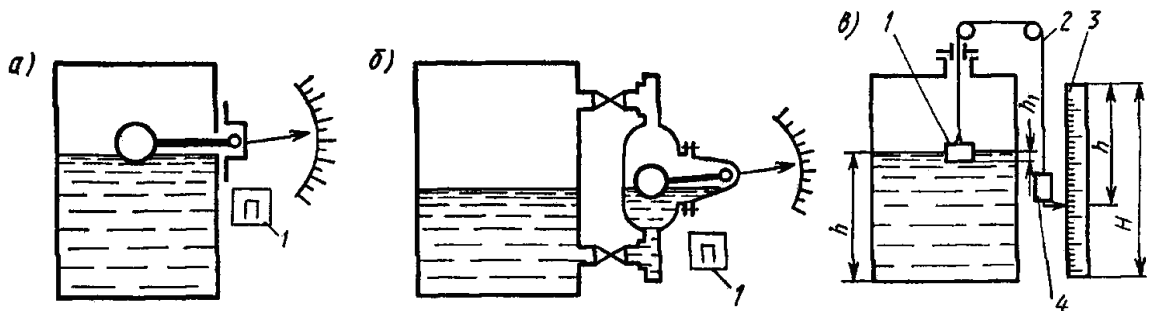


Рисунок 3.26 – Схеми поплавкових рівнемірів

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:

$$G_B = G_{II} - S \cdot h_1 \cdot \rho_{жс} \cdot g, \quad (3.20)$$

де G_B , G_{II} – сили ваги противаги і поплавка, Н;

S – площа поплавка, м²;

h_1 – глибина занурення поплавка, м;

$\rho_{жс}$ – густина рідини, кг/м³.

Підвищення рівня рідини змінює глибину занурення поплавка і на нього діє додаткова сила виштовхування. У результаті рівняння (3.20) порушується, і противага 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 [3,4].

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.3.27. 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 противагою 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 O 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 посилається в сильфон 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 [3,4].

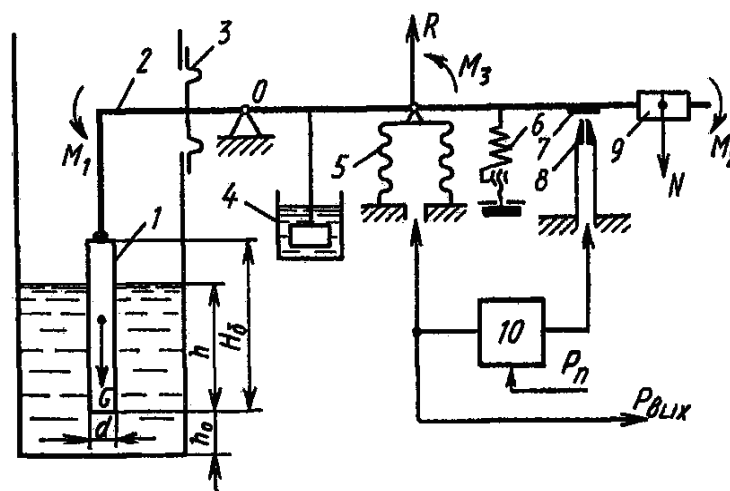


Рисунок 3.27 – Схема буйкового пневматичного рівнеміра

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 $1,5$.

3.5.2 Гідростатичні засоби вимірювання рівня

Вимірювання рівня гідростатичними рівнемірами зводиться до вимірювання гідростатичного тиску P , Па, створюваного стовпом h рідини постійної густини ρ , відповідно до рівності [3,4]:

$$P = \rho \cdot g \cdot h. \quad (3.21)$$

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, опущеній в рідину, що заповнює резервуар, на фіксовану глибину.

На рис.3.28 а наведена схема вимірювання рівня манометром. Застосовуваний для цих цілей манометр 1 може бути будь-якого типу з відповідними межами вимірювання, обумовленими залежністю (3.21). Вимірювання гідростатичного тиску манометром може бути здійснено і за схемою, наведеною на рис.3.28 б. Відповідно до даної схеми про значення вимірюваного рівня роблять висновок про тиск повітря, що заповнює манометричну систему.

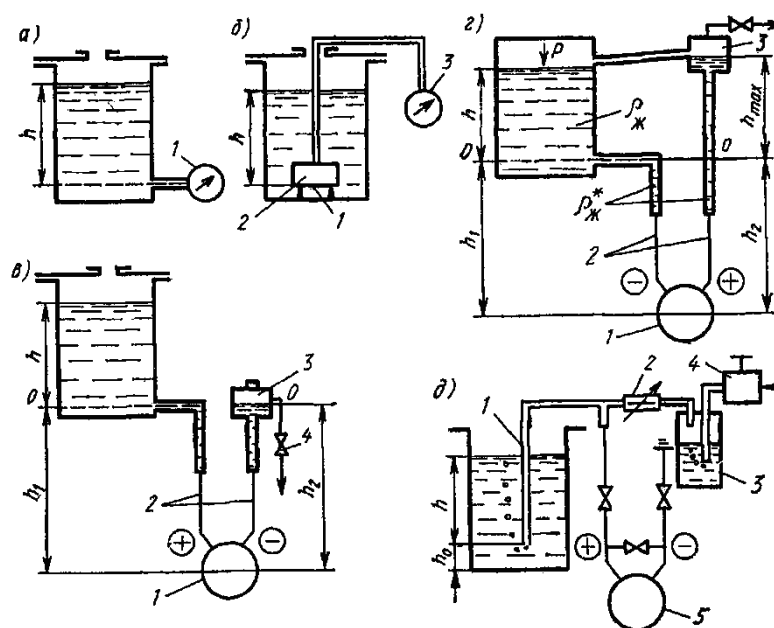


Рисунок 3.28 – Схеми гідростатичних рівнемірів

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 [3,4].

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.3.28 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,

$$\Delta P = \rho_{pid} \cdot g \cdot h. \quad (3.22)$$

При вимірюванні рівня в апаратах, які перебувають під тиском, застосовують схему, наведену на рис.3.28 г. 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 ΔP , Па, можна визначити за формулою

$$\Delta P = -\rho_{pid} \cdot g \cdot h. \quad (3.23)$$

Як бачимо з рівняння (3.24), 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.3.28 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) [3,4].

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.

3.5.3 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.3.29. Одиницею електропровідності в *SI* служить сименс (См) – величина, обернена ому (Ом) [3,4].

Чутливий елемент (рис.3.29 *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, Φ , циліндричного конденсатора визначається рівнянням

$$C_{II} = C_0 + \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot H}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)} \cdot \left[1 + (\varepsilon_{жс} - 1) \cdot \frac{h}{H} \right], \quad (3.25)$$

де ε – відносна діелектрична проникність міжелектродної речовини;

ε_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.3.29 *a* повна ємність C_{II} визначається виразом

$$C_{II} = C_0 + C_1 + C_2, \quad (3.26)$$

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.3.29 *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.

Для вимірювання рівня електропровідних рідин — рідин з питомою провідністю більше 10^{-4} См/м - застосовують рівнеміри, оснащені ємнісним чутливим елементом, зображеним на рис.3.29 *б*.

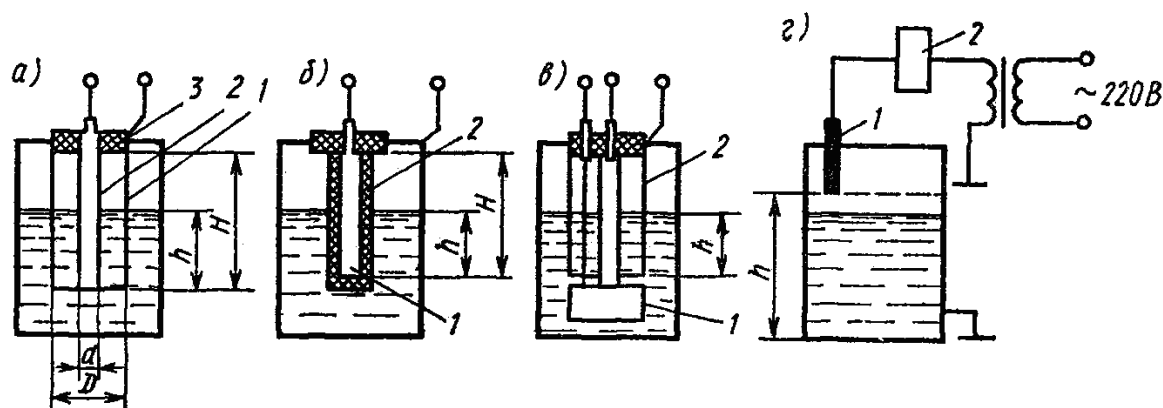


Рисунок 3.29 - Схеми електричних рівнемірів

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 ± 10 мм.

Розроблено ємнісні рівнеміри сипучих середовищ. Верхні межі вимірювання рівнемірів обмежені значеннями 4-20 м. Клас точності 2,5 [3,4].

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.3.29 г 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.

3.5.4 Акустичні та радіоізотопні засоби вимірювання рівня

На даний час запропоновані різні принципи побудови акустичних рівнемірів, з яких великого поширення дістав принцип локації [3,4].

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.

Акустичний 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.

Відстань між первинним і проміжним перетворювачами – не більше 25 м. Діапазони вимірювання рівня 0-3 м. Клас точності 2,5. Температура контрольованого 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.

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 γ -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 γ -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 ± 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.

3.6 Аналіз складу газів

Можна виділити такі основні напрями газового аналізу[3,4]:

- 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 агрегату. 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 агрегату 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 виплавляння сталі і чавуну (кисень), при рафінуванні рідкого металу в робочому просторі агрегату 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 агрегату 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 градууються 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.

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.3.30), що складається зі сталевий 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 закріпленій 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/м³. Від швидкого забруднення фільтр охороняє захисний козирок, установлений назустріч потоку газу [3,4].

Кінцівку газовідбірної 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, шиббером 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.

Температура газу в місці відбору проби повинна бути в межах 200-600⁰С. При температурі нижче 200 °С можливе забруднення поверхні керамічного фільтра незгорілими продуктами, що конденсуються на ній (смолами). При температурі вище 600⁰С виникає небезпека руйнування газовідбірної трубки і відновлення CO_2 у CO і O_2 .

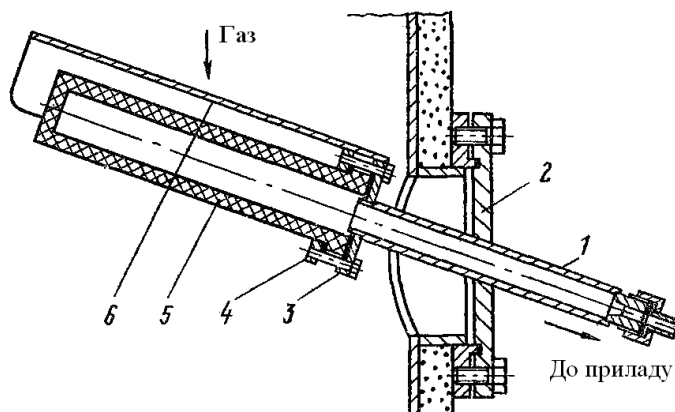


Рисунок 3.30 – Схема установлення газовідбирного пристрою

Для зменшення запізнювання показань первинний перетворювач газоаналізатора необхідно встановлювати якнайбільше ближче до місця відбору проби. Температура газу при надходженні в прилад не повинна перевищувати 35⁰С.

Газоаналізатор встановлюється в місцях, що не зазнають вібрації, і розміщений удалині від нагрітих поверхонь. Температура навколишнього повітря, що допускається, 5-50⁰С і відносна вологість до 95%. Періодично газовідбірна трубка з керамічним фільтром продувається стисненим повітрям тиском 0,05 МПа.

3.6.1 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 [3,4].

Схема пристрою газоаналізатора для аналізу одного компонента з газової суміші наведена на рис.3.31.

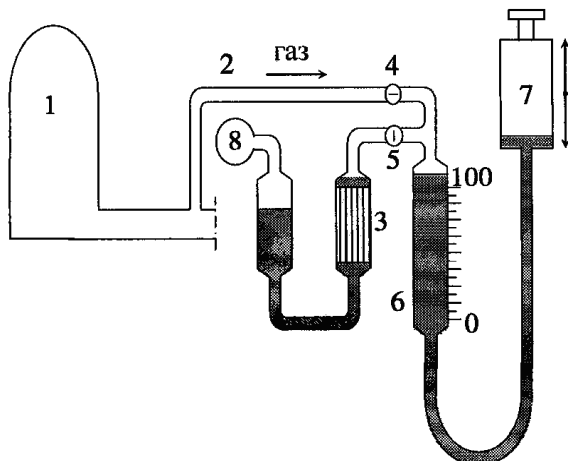


Рисунок 3.31 – Схема хімічного газоаналізатора

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.

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 частої заміни реактивів; неможливість використання в системах автоматичного регулювання.

3.6.2 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. [3,4].

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 багатоконпонентної 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 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 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.3.32). 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%).

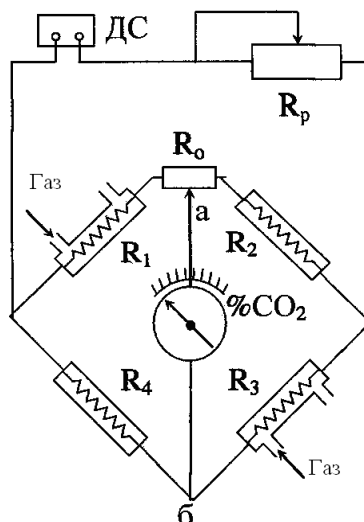


Рисунок 3.32 – Схема термокондуктометричного газоаналізатора

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 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 [3,4].

На рис.3.33 подана схема термохімічного газоаналізатора, у роботі якого використовується тепловий ефект реакції окислювання горючих газів на каталітично активній поверхні. У термохімічному аналізаторі (рис.3.33) 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°C. 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.

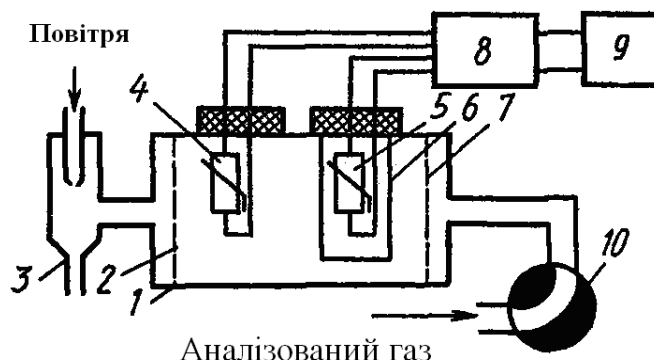


Рисунок 3.33 – Схема термохімічного газоаналізатора

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.

3.6.3 Магнітні та дифузні газоаналізатори

В основу роботи магнітних газоаналізаторів покладені різні явища, пов'язані із взаємодією обумовленого компонента аналізованої (у загальному випадку багатоконпонентної) 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 відносну 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.

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 багатоконпонентної суміші спостерігається тільки при її попередньому 3 – 4-кратному розведенні.

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 багатоконпонентних газових сумішей.

3.6.4 Сорбційні, випарні і конденсаційні 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 призначений для вимірювання концентрації водню. У камері, через яку прокачується аналізований газ, розміщена тонкостінна трубка, виготовлена з паладію. Водень, який

знаходиться в аналізованому газі, розчиняється в паладії. При цьому довжина трубки за рахунок ефекту набрякання зі зростанням концентрації водню збільшується, тому що верхній кінець трубки, закріплений на корпусі, то її нижній кінець вільно переміщається. За допомогою ємнісного, індуктивного або пневматичного перетворювача переміщень вимірюються переміщення пластини 3, закріпленої на нижньому кінці трубки. 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).

Іntenсивно 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 вимірюванні вмісту кожного компонента, що виділився, електричним методом.

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 аналізованій 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 [3,4].

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 %:

$$\varphi = \frac{A}{A_n} \cdot 100, \quad (3.27)$$

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

$$\varphi = \frac{P}{P_n} \cdot 100, \quad (3.28)$$

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.3.34, призначений для вимірювання відносної вологості повітря.

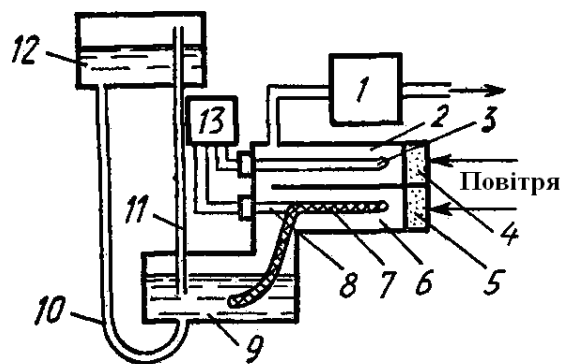


Рисунок 3.34 – Схема випарного аналізатора

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. 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 перекриває 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.3.35). У цей час такі газоаналізatori використовуються в основному як гігromетри. 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.

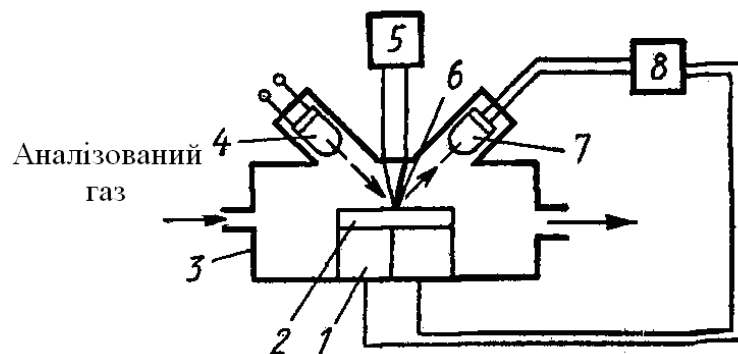


Рисунок 3.35 – Схема конденсаційного аналізатора

Цю температуру прийнято називати **температурою точки роси** (або інею), а аналізатори, що базуються на вимірюванні цієї температури, – **гігromетрами 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 спая цієї термопари припаяне металеве дзеркальце 2. До гарячого спая 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 вхідного 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 перетворюється 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 $0,05-10$ 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.

3.6.5 Діелькометричні та оптичні аналізатори

Принцип дії **діелькометричних аналізаторів** полягає у вимірюванні діелектричної проникності середовища, що заповнює електричний конденсатор.

Ці аналізатори застосовуються для аналізу складу бінарних або псевдобінарних сумішей газів і рідин. На рис.3.36 показана схема діелькометричного гігрометра, у якому вимірювання діелектричної проникності використовується разом з явищем сорбції пари води з аналізованого газу [3,4].

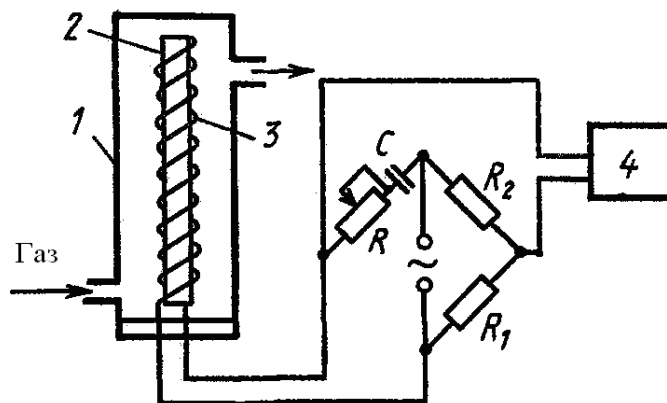


Рисунок 3.36 – Схема діелькометричного аналізатора

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.

Для вимірювання концентрацій складових газів використовується ефект випромінювання практично всього спектра електромагнітних коливань, починаючи з радіохвиль і закінчуючи γ -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**.

Колориметричний аналізатор (рис.3.37) 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.

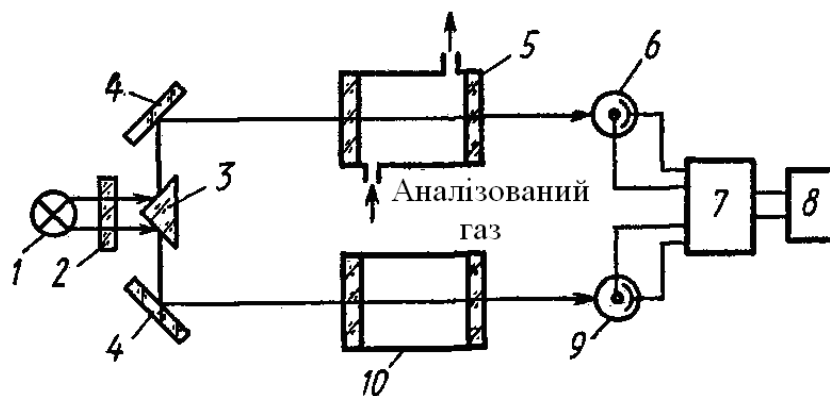


Рисунок 3.37 – Схема колориметричного аналізатора

Оптичні аналізатори, у роботі яких використовується випромінювання видимої частини спектра, залежно від схеми і конструкції мають класи точності 2-20.

3.6.6 Іонізаційні, полум'яно-іонізаційні, фотометричні і хемілюмінесцентні газоаналізатори та пиломіри

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.) [3,4].

На рис.3.38 наведена схема іонізаційного газоаналізатора. Аналізований газ надходить у камеру 1 (так звану іонізаційну) з постійною об'ємною витратою. Під дією джерела випромінювання 2 (α - або β -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.

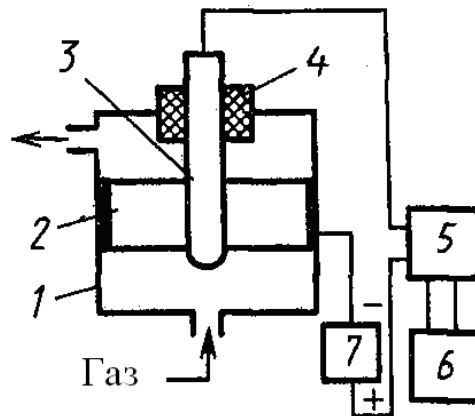


Рисунок 3.38 – Схема іонізаційного газоаналізатора

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.

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'яно-іонізаційний газоаналізатор (рис.3.39 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.

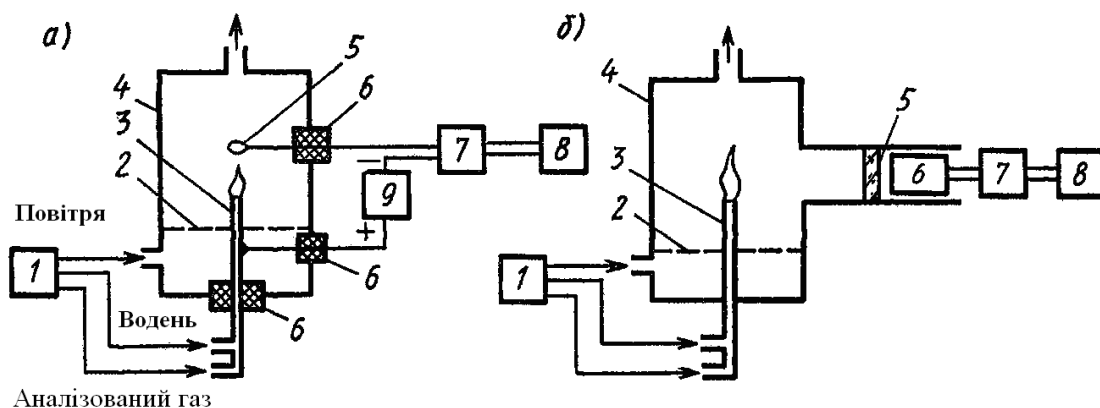


Рисунок 3.39 – Схеми полум'яних газоаналізаторів

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 парі), 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 входним опором, а сигнал останнього сприймається автоматичним потенціометром 8.

Полум'яний фотометричний газоаналізатор (рис.3.39 б) працює на ефекті зміни інтенсивності і спектрального складу випромінювання полум'я [3,4]. Схема подачі газів у цьому аналізаторі аналогічна розглянутій (рис.3.40 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 рідку речовину перед згорянням розпорошує потоком газу.

Принцип дії **хемілюмінесцентних** газоаналізаторів базується на явищі люмінесценції, що супроводжує певні хімічні реакції. Таку люмінесценцію називають хемілюмінесценцією.

У **хемілюмінесцентному газоаналізаторі** (рис.3.40) 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 попадає у фотомножник 4, сигнал якого перетворюється в уніфікований сигнал за допомогою перетворювачів 5.

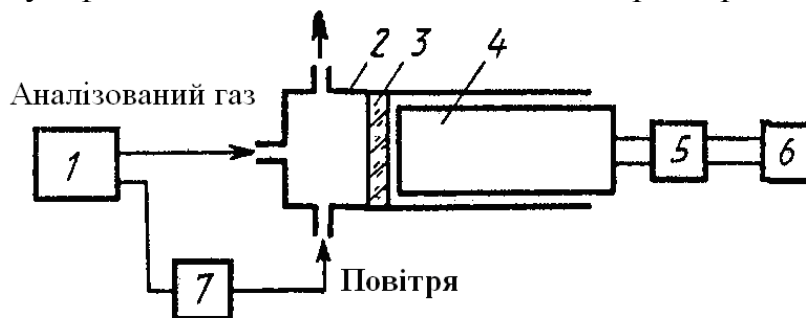


Рисунок 3.40 - Схема хемілюмінесцентного газоаналізатора

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.

Контролювання **вмісту пилу** у газоповітряній суміші та атмосферному повітрі дає змогу оцінювати ефективність роботи газоочисного устаткування, обирати необхідну ступінь очистки, вдосконалювати технічні процеси.

Методики вимірювання концентрації пилу поділяють на методики, основані на попередньому осадженні, і методики без попереднього осадження пилу (безпосередні виміри у самій суміші з повітря, газів, пилу). Істотною перевагою першої методики є здатність вимірювати масову концентрацію пилу, утвореного з різних складових. Другому методу властиві практичність та безперервність процесу вимірів, висока чутливість, але за його допомогою важко визначити дисперсний склад пилу (розміри складових часток пилу).

Для промислового контролювання пилу використовують методики, які ґрунтуються на попередньому осадженні пилу, якщо його параметри змінюються в широких межах протягом певного часу. При цьому складним процесом є отримання проби (на відбір проби впливає багато різних факторів). Методики без попереднього осадження (оптичні, електричні) дають змогу миттєво виміряти концентрацію пилу та її зміни у часі.

Середовище з пилу і газів є досить нестійким, його не можна описати одним або двома параметрами. Пил майже завжди є полідисперсним, тобто характеризується спектром розмірів частинок від 10^{-2} до 10^2 мкм, інтервал концентрацій перебуває в межах від 10^{-8} до 10^5 мг/м³. Фізико-хімічні властивості пилу можуть бути найрізноманітнішими і змінюватись у часі.

Для вимірювання концентрацій пилу у повітрі використовують спеціальні прилади – **пиломіри** (для вимірювання концентрації пилу в атмосферному повітрі та промислових приміщеннях і для вимірювання концентрації пилу у різноманітних газових викидах промислових підприємств). Пиломіри, які належать до першої групи, вимірюють зміни мікроконцентрації різноманітних домішок протягом певного часу і внаслідок впливу природних факторів. Друга група пиломірів призначена для вимірювання великих концентрацій з широким спектром частинок (0,05...100 мкм), при різній швидкості виходу (до 40 м/с) газоповітряної суміші та з різною температурою (до 1200°C).

У пиломірах використовують тільки фізичні методи вимірювання. Пиломіри першої групи повинні відповідати таким вимогам: безперервність вимірювань; автоматизація процесу вимірювань; похибка вимірів не повинна перевищувати $\pm 10\%$ від ГДК; реєстрація результатів вимірів; нечутливість до параметрів навколишнього середовища; простота конструкції і т. д. Пиломіри, призначені для контролювання промислових викидів, повинні відповідати додатковим вимогам: мала інерційність; лінійність градуїрованої характеристики; можливість отримання середніх значень (наявність інтегруючого блоку); наявність попереджувальної сигналізації; пристосованість до певних умов; конструктивні характеристики і т. д.

Метрологічні характеристики пиломіра переважно визначаються характеристиками первинного вимірювального перетворювача. Різницею між

дійсними і номінальними характеристиками перетворювача є похибка пиломіра, зумовлена властивостями пилу (основна похибка), впливом зовнішніх величин (додаткова похибка) та ін. Для градування пиломірів використовують «еталони» пилу. У якості «еталонів» використовують монодисперсні сферичні частинки (штучні, природні), наприклад пилок з розмірами частинок 12, 20, 50 і 90 мкм.

Періодичну повірку пиломірів проводять із використанням повірочного блоку як стосовно окремих його частин, так і стосовно приладу загалом.

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Поясніть класифікацію та принцип дії приладів для вимірювання температури.
2. Яка класифікація та принцип дії приладів для вимірювання тиску?
3. Яка класифікація та принцип дії приладів для вимірювання витрати рідин і газів?
4. Як здійснюють вимірювання рівнів накопичення рідин та сипких речовин?
5. Які існують методи і прилади для контролю якості очистки відхідних газів і стічної води?
6. Методи і засоби вимірювання запиленості газів.
7. Застосування і принцип дії газоаналізаторів.

РОЗДІЛ 4 ПОБУДОВА СХЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

4.1 Зображення засобів автоматизації на функціональних схемах

Функціонально-технологічна схема (ФТС) автоматизації відображає технічні рішення автоматизації конкретних технологічних процесів. Вона виконується для кожної дільниці виробництва окремо і містить машино-апаратну схему технологічного процесу, на якій за допомогою умовних позначень відображають пристрої керування, прилади і засоби автоматизації і зв'язки між ними, які визначають в цілому принципи побудови системи автоматичного контролю і керування об'єктом.

Схеми автоматизації розробляють загалом на технологічну (інженерну) систему або її складову частину – технологічну лінію, блок обладнання, установку або агрегат [3,4].

Схему автоматизації допускається суміщати зі схемою з'єднань (монтажною), що виконується у складі основного комплекту, або зі схемами інженерних систем.

На схемі автоматизації зображають:

1) технологічне і інженерне обладнання і комунікації (трубопроводи, газоходи, повітропроводи) об'єкту, що автоматизується (далі - технологічне обладнання);

2) технічні засоби автоматизації або контури контролю, регулювання і управління (сукупність окремих функціонально зв'язаних приладів, що виконують певне завдання по контролю, регулюванню, сигналізації, управлінню і т.п.);

3) лінії зв'язку між окремими технічними засобами автоматизації або контурами (при необхідності).

Структурні схеми системи автоматизації виконуються по вузлах і включають всі елементи системи від датчика до регулюючого органа з вказуванням місця розташування та їх взаємозв'язку між собою.

Схеми автоматизації визначають:

- функціонально-блокову структуру окремих вузлів автоматичного контролю, сигналізації, керування й автоматичного регулювання;
- оснащення об'єкта керування приладами і засобами автоматизації, у тому числі засоби обчислювальної техніки (ЗОТ).

При розробці схем вирішують наступні задачі:

- одержання інформації про стан технологічного устаткування; безпосередній вплив на технологічний процес для керування ним;
- стабілізація технологічних параметрів;
- контроль і реєстрація технологічних параметрів процесу і стану устаткування.

Ці функціональні задачі вирішуються на базі технічних засобів автоматизації (ТЗА), включаючи ЗОТ.

Результатом розробки схем автоматизації є [3,4]:

- вибір методів виміру технологічних параметрів;
- вибір основних технічних засобів автоматизації;
- визначення приводів виконавчих механізмів регулюючих і запірних органів, керованих автоматично чи дистанційно;
- розміщення ТЗА на щитах і пультах, технологічному устаткуванні і трубопроводах.

Умови розробки функціональних схем (схем автоматизації).

1. Повинна зберігатися можливість нарощування функцій керування (принцип відкритості системи).

2. Система повинна будуватися на базі ТЗА державної системи промислових приладів і засобів автоматизації (ДСП).

3. Система повинна будуватися на базі уніфікованих комплексів, що дає значні переваги при монтажі, налагодженні, експлуатації і ремонті.

4. ТЗА вибирають, виходячи з наступних умов:

- виробництва (пожежо- і вибухонебезпечність, запиленість, агресивність і токсичність середовища);
- параметрів вимірюваного середовища;
- відстаней, що допускаються від давачів і виконавчих механізмів до регулюючих пристроїв;
- вимог до точності і швидкодії роботи системи.

Згідно із ДСТУ Б А.2.4-16:2008 умовні зображення приладів, засобів автоматизації і ліній зв'язку, які застосовуються при виконанні схем автоматизації технологічних процесів, повинні відповідати наведеним у табл. 1.

Відбірний пристрій всіх постійно підключених приладів зображають суцільною тонкою лінією, що з'єднує технологічний трубопровід або апарат з приладом (рис. 4.1). За необхідності вказати конкретне місце розташування пристрою для відбору (всередині контура технологічного апарата) його позначають колом діаметром 2,5 мм (рисунок 4.2).

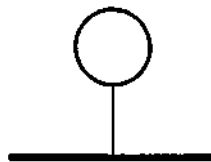


Рисунок 4.1 – Позначення з'єднання приладу з трубопроводом

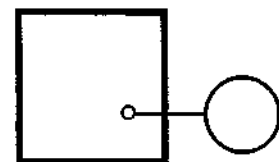


Рисунок 4.2 – Позначення розташування пристрою для відбору

Основні літерні позначення вимірюваних величин і функціональних ознак приладів повинні відповідати наведеним у табл. 4.1-4.2.

Таблиця 4.1 – Основні літерні позначення вимірюваних величин і функціональних ознак приладів

Найменування	Зображення
<p>1. Прилад, що встановлюється поза щитом (за місцем):</p> <p>а) основне зображення;</p> <p>б) зображення, що допускається</p>	
<p>2. Прилад, що встановлюється на щиті, пульті:</p> <p>а) основне зображення;</p> <p>б) зображення, що допускається</p>	
<p>3. Виконавчий механізм. Загальне зображення</p>	
<p>4. Виконавчий механізм, який при припиненні подачі енергії або керуючого сигналу:</p> <p>а) відкриває регулюючий орган;</p>	
<p>б) закриває регулюючий орган;</p> <p>в) залишає регулюючий орган у незмінному положенні</p>	
<p>5. Виконавчий механізм із додатковим ручним приводом</p> <p>Примітка. Зображення може застосовуватися з будь-яким із додаткових знаків, що характеризують положення регулюючого органу при припиненні подачі енергії або керуючого сигналу</p>	
<p>6. Лінія зв'язку. Загальне зображення</p>	
<p>7. Перетин ліній зв'язку без з'єднання між собою</p>	
<p>8. Перетин ліній зв'язку зі з'єднанням між собою</p>	

Таблиця 4.2 – Функціональні ознаки та позначення вимірювальних величин

Позначення	Вимірювана величина		Функціональна ознака приладу		
	основне позначення вимірюваної величини	додаткове позначення, що уточнює вимірювану величину	відображення інформації	формування вихідного сигналу	додаткове значення
	+	-	Сигналізація	-	-
	+	-	-	Автоматичне регулювання, управління	-
	Густина	Різниця, перепад	-	-	-
	Електрична величина	-	+	-	-
	Витрата	Співвідношення, частка, дріб	-	-	-
	Розмір, положення, переміщення	-	+	-	-
	Ручна дія	-	-	-	Верхня межа вимірюваної величини
	+	-	Показання	-	-
	+	Автоматичне перемикання, оббігання	-	-	-
	Час, часова програма	-	-	+	-
	Рівень	-	-	-	Нижня межа вимірюваної величини
	Вологість	-	-	-	-
	Тиск, вакуум	-	-	-	-
	Величина, що характеризує якість: склад, концентрація (п. 4.13)	Інтеграція, підсумовування за часом	-	+	-
	Радіоактивні	-	Реєстра	-	-

	сть (п. 4.13)		ція		
	Швидкість, частота	–	–	Включе ння, відключ ення, перемикання, блокування	–
	Температура	–	–	+	–
	Декілька різномірних вимірюваних величин	–	–	–	–
	В'язкість	–	+	–	–
	Маса	–	–	–	–

4.2 Правила побудови умовних зображень

Згідно з ДСТУ Б А.2.4-16:2008 введено два методи побудови умовних зображень: а) спрощений; б) розгорнутий.

При спрощеному методі прилади і засоби автоматизації, що здійснюють складні функції, наприклад, контроль, регулювання, сигналізацію, і виконані у вигляді окремих блоків, відтворюють одним умовним зображенням. При цьому первинні вимірювальні перетворювачі і всю допоміжну апаратуру не зображають.

При розгорнутому методі побудови кожен прилад або блок, що входить в єдиний вимірювальний, регулюючий або керуючий комплект засобів автоматизації, вказують окремим умовним зображенням.

Умовні зображення приладів і засобів автоматизації, які застосовуються в схемах, включають графічні зображення, літерні і цифрові позначення.

У верхній частині графічного зображення наносять літерні позначення вимірюваної величини і функціональної ознаки приладу, що визначає його призначення.

У нижній частині графічного зображення наносять цифрове (позиційне) позначення приладу або комплекту засобів автоматизації.

Порядок розташування букв у літерному позначенні наступний:

- основне позначення вимірюваної величини;
- додаткове позначення вимірюваної величини (за необхідності);
- позначення функціональної ознаки приладу.

При побудові зображень комплектів засобів автоматизації перша літера в позначенні кожного приладу або пристрою (окрім пристроїв ручного управління), які входять у комплект, є найменуванням вимірюваної комплектом величини.

Літерні позначення пристроїв, виконаних у вигляді окремих блоків і призначених для ручних операцій, незалежно від того, до складу якого комплекту вони входять, повинні починатися з букви *H*.

Порядок розташування літерних позначень функціональних ознак приладу приймають із дотриманням послідовності позначень: /, R, C, S, A.

При побудові літерних позначень вказують не всі функціональні ознаки приладу, а лише ті, які використовують у даній схемі.

Літеру A застосовують для позначення функції "сигналізація" незалежно від того, чи винесена сигнальна апаратура на який-небудь щит або для сигналізації використовуються лампи, вбудовані у сам прилад.

Літеру S застосовують для позначення контактного пристрою приладу, що використовується тільки для включення, відключення, перемикання, блокування.

При застосуванні контактної пристрою приладу для включення, відключення і одночасно для сигналізації в позначенні приладу використовують обидві літери: S і A.

Граничні значення вимірюваних величин, за якими здійснюється, наприклад, включення, відключення, блокування, сигналізація, допускається конкретизувати додаванням літер H і L. Ці літери наносять праворуч від графічного зображення.

За необхідності конкретизації вимірюваної величини праворуч від графічного зображення приладу допускається вказувати найменування або символ цієї величини.

Для позначення величин та функціональних ознак, не передбачених даним стандартом, допускається використовувати резервні літери. Застосування резервних літер повинне бути розшифроване на схемі.

Підведення ліній зв'язку до приладу зображають у будь-якій точці графічного зображення (зверху, знизу, збоку). За необхідності вказівки напряму передачі сигналу на лініях зв'язку наносять стрілки. Принцип побудови умовного зображення приладу наведений на рис. 4.3.

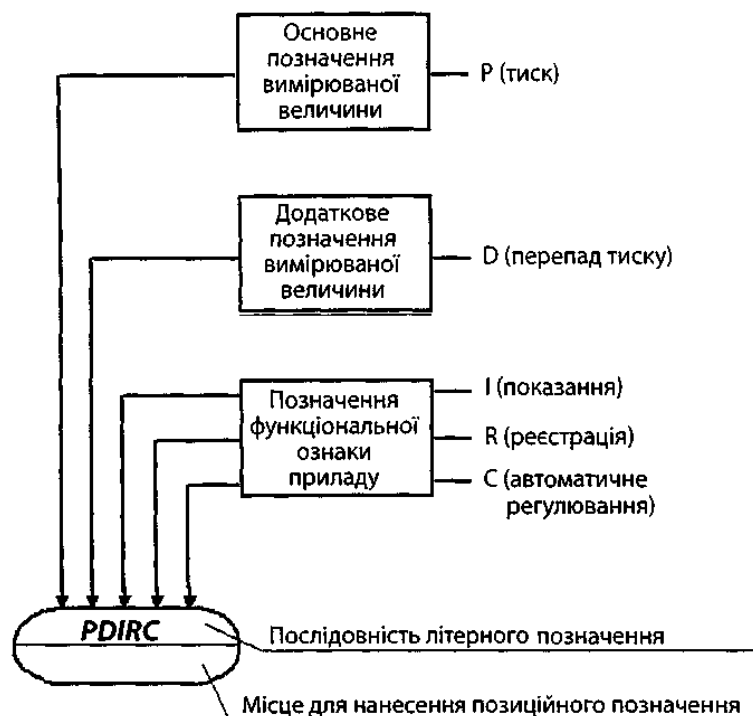


Рисунок 4.3 – Принцип побудови умовного зображення приладу

Таблиця 4.3 – Приклади побудови умовних зображень приладів і засобів автоматизації

№.	Зображення	Найменування
1		Первинний вимірювальний перетворювач (чутливий елемент) для вимірювання температури, встановлений за місцем. Наприклад, перетворювач термоелектричний (термопара), термоперетворювач опору, термобалон манометричного термометра, датчики пірометра тощо
2		Прилад для вимірювання і показу температури, встановлений за місцем. Наприклад, термометр рідинний, термометр манометричний тощо
3		Прилад для вимірювання і показу температури, встановлений на щиті. Наприклад, логометр, потенціометр, мілівольтметр тощо
4		Прилад для вимірювання температури безшкальний із дистанційною передачею показань, встановлений за місцем. Наприклад, термометр манометричний (або будь-який інший датчик температури), безшкальний із пневмо- або електропередачею
5		Прилад для вимірювання температури однокерований, реєструючий, встановлений на щиті. Наприклад, логометр, потенціометр тощо
6		Прилад для вимірювання температури з автоматичним оббігаючим пристроєм, реєструючий, встановлений на щиті. Наприклад, багатоточковий самописний потенціометр, міст автоматичний тощо
7		Прилад для вимірювання температури реєструючий, регулюючий, встановлений на щиті. Наприклад, будь-який реєструючий регулятор температури
8		Регулятор температури безшкальний, встановлений за місцем. Наприклад, ділатометричний регулятор температури
9		Прилад для вимірювання температури безшкальний із контактним пристроєм, встановлений за місцем. Наприклад, реле температурне
10		Байпасна панель дистанційного керування, встановлена на щиті
11		Перемикач електричних ланцюгів вимірювання (керування), перемикач для газових (повітряних) ліній, встановлений на щиті
12		Прилад для вимірювання і показу тиску (розрідження), встановлений за місцем. Наприклад, будь-який показувальний манометр, дифманометр, тягомір, напоромір, вакуумметр тощо
13		Прилад для вимірювання і показу перепаду тиску, встановлений за місцем. Наприклад, дифманометр показувальний
14		Прилад для вимірювання тиску (розрідження) безшкальний із дистанційною передачею показань, встановлений за місцем. Наприклад, манометр (дифманометр) безшкальний із пневмо- або електропередачею
15		Прилад для вимірювання тиску (розрідження) реєструючий, встановлений на щиті. Наприклад, будь-який вторинний прилад для реєстрації тиску

1	2	3
16		Прилад для вимірювання тиску з контактним пристроєм, встановлений за місцем. Наприклад, реле тиску
17		Прилад для вимірювання і показу тиску (розрідження) з контактним пристроєм, встановлений за місцем. Наприклад, манометр електроконтактний, вакуумметр тощо
18		Регулятор тиску, що працює без використання стороннього джерела енергії (регулятор тиску прямої дії) "поперед себе"
19		Первинний вимірювальний перетворювач (чутливий елемент) для вимірювання витрати, встановлений за місцем. Наприклад, діафрагма, сопло, труба Вентурі, датчик індукційного витратоміра тощо
20		Прилад для вимірювання витрати безшкальний із дистанційною передачею показань, встановлений за місцем. Наприклад, дифманометр (ротаметр), безшкальний із пневмо- або електропередачею
21		Прилад для вимірювання співвідношення витрат реєструючий, встановлений на щиті. Наприклад, будь-який вторинний прилад для реєстрації співвідношення витрат
22		Прилад для вимірювання і показу витрати, встановлений за місцем. Наприклад, дифманометр показувальний
23		Прилад для вимірювання витрати інтегруючий, встановлений за місцем. Наприклад, будь-який безшкальний лічильник-витратомір із інтегратором
24		Прилад для вимірювання і показу витрати, інтегруючий, встановлений за місцем. Наприклад, показувальний дифманометр з інтегратором
25		Прилад для вимірювання витрати інтегруючий, з пристроєм для видачі сигналу після проходження заданої кількості речовини, встановлений за місцем. Наприклад, лічильник-дозатор
26		Первинний вимірювальний перетворювач (чутливий елемент) для вимірювання рівня, встановлений за місцем. Наприклад, датчик електричного або ємнісного рівнеміра
27		Прилад для вимірювання і показу рівня, встановлений за місцем. Наприклад, манометр (дифманометр), що використовується для вимірювання рівня
28		Прилад для вимірювання рівня з контактним пристроєм, встановлений за місцем. Наприклад, реле рівня, що використовується для блокування і сигналізації верхнього рівня
29		Прилад для вимірювання рівня безшкальний, регулюючий, з контактним пристроєм, встановлений за місцем. Наприклад, електричний регулятор-сигналізатор рівня. Літера <i>H</i> в даному прикладі означає блокування по верхньому рівню
30		Прилад для вимірювання і показу рівня з контактним пристроєм, встановлений на щиті. Наприклад, вторинний показувальний прилад з сигнальним пристроєм.

	Літери H і L означають сигналізацію верхнього та нижнього рівнів
--	--

РОЗДІЛ 5 АВТОМАТИЗАЦІЯ РОБОТИ ОЧИСНИХ СПОРУД

5.1 Автоматизація процесу очистки відхідних газів в мокрих газоочисних установках

Незважаючи на велику кількість газоочисних установок, що вельми відрізняються один від одної як по конструкції, так і за принципом дії, спільність головного призначення установок (уловлювання пилу і видалення його з установки) призводить до того, що ряд вузлів АСР служать для виконання однакових функцій. Найбільш поширеними в АСР газоочисних установок є наступні вузли (рисунок 5.1): регулювання температури газу; регулювання рівня пилу в бункері газоочисної установки; автоматичного блокування та сигналізації падіння тиску (води, стисненого повітря).

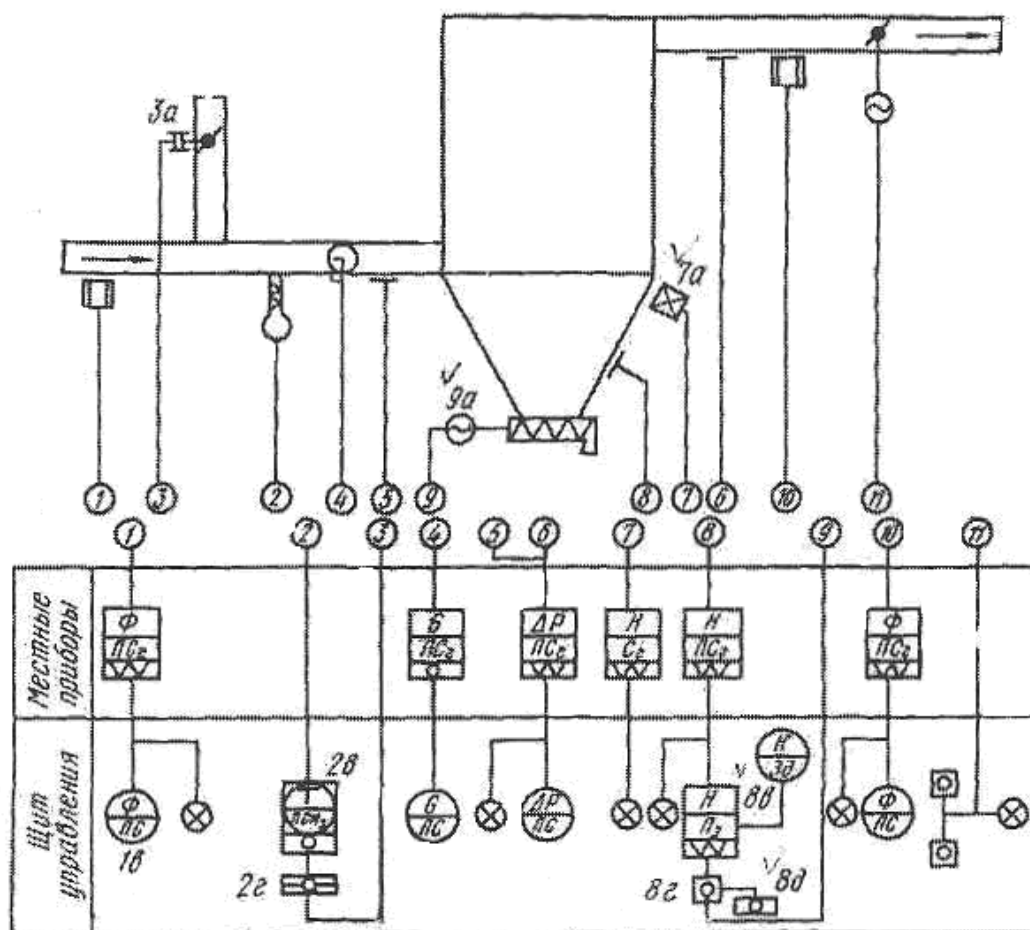


Рисунок 5.1 – Типові вузли АСР газоочисної установки

Температуру регулюють додаванням до відхідних газів металургійної печі аспіраційного повітря. Для цього на трубопроводі аспіраційного повітря встановлюють регулюючий дросель. В якості його приводу використовують виконавчий механізм 3а типу ПСП-Т-1. Схема забезпечує автоматичне і дистанційне керування дроселем аспіраційного повітря. Для автоматичного управління можуть бути прийняті пневматичні регулюючі пристрої самописних

мостів 2в типу КСМЗ, що реалізують закон регулювання ПІ-регулятора. Для таких регуляторів передбачають панелі управління 2г типу ПП 12.2, за допомогою яких відключають регулятор і здійснюють ручне управління поршневим пневмоприводом 3а.

Мокрі газоочисні установки широко застосовують у металургії, особливо у випадках, коли поряд з очищенням потрібне охолодження і зволоження газу. У всіх мокрих апаратах очищення газу виділення часток пилу з газового потоку відбувається під дією сил інерції. Відмінною особливістю мокрих пиловловлювачів є взаємодія частинок пилу з поверхнею рідини. Найбільш поширеними апаратами мокрою газоочистки є форсункові скрубери і скрубери Вентурі. Застосовувані в металургійному виробництві форсункові скрубери являють собою вертикальні циліндри діаметром 6-8 і висотою 20-30 м. Для зрошення газу водою в скрубері розташовано кілька ярусів форсунок.

По конструкції скрубери ділять на насадкові і порожнисті. В якості насадки часто застосовують хордову насадку з дерев'яних дощок товщиною 10-15 мм заввишки 100-150 мм. Окремі ряди дощок зміщені на 45 або 90 °. На роботу скруберів насадочного типу впливає відношення висоти шару насадки до діаметру скрубера. Найбільш рівномірний розподіл води в насадці забезпечується при відношенні 0,5-1,5.

Для здійснення тонкого очищення газу мокрим способом розроблений високоефективний апарат (скрубер Вентурі). Він складається з труби Вентурі і краплевловлювача. Труба Вентурі, або труба-розпилювач, має або круглий, або прямокутний перетин. Запилені газ надходить в конфузори труби Вентурі, де фільтрується через завісу зрошуючої води. Конфузор переходить в горловину труби, де швидкість руху газу становить 80-100 м/с. Вода розпорошується турбулентним потоком газу на дрібні краплі, що сприяє змочуванню частинок пилу і забезпечує захоплення краплями води частинок пилу розміром в десяті частки мікрометра. Горловина труби Вентурі переходить в дифузор, де швидкість газу зменшується і відбувається коагуляція крапель води з частинками пилу, що полегшує їх відділення в краплевловлювачі. В якості краплевловлювача зазвичай використовують прямоочний циклон.

До завдань автоматизації форсункового скрубера Вентурі відносять управління температурним режимом, витратою води на зрошення, рівнем води в скрубері і краплевловлювачі, контролем залишкової запиленості та сигналізацією перевищення залишкової запиленості.

Автоматичне регулювання витрати води на зрошення мокрих газоочисних установок.

За своїм динамічним характеристикам об'єкт регулювання витрати води, що представляє собою ділянку трубопроводу між чутливим елементом і регулюючим органом, є малоінерційним об'єктом, на якому зазвичай використовують регулятори І і ПІ. На рис. 5.2 зображена принципова схема регулювання витрати води. Схема може бути побудована на базі електричної, пневматичної і гідравлічної апаратури. У розглянутій схемі з метою підтримки постійної витрати води на скрубері встановлено електронний регулятор Ів типу

РП2-Ш. На вхід регулятора подається сигнал неузгодженості між сигналом перетворювача ПФ-4, вбудованого в прилад 1в і входить в комплект витратоміра води

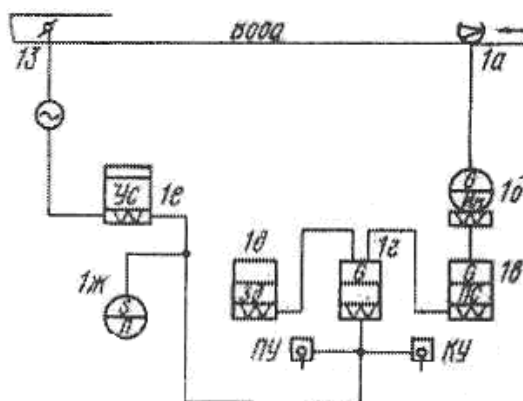


Рисунок 5.2 – АСР витрати води на скрубери

Вихідний сигнал регулятора надходить на підсилювач 1е типу УМД, який управляє виконавчим механізмом 1з типу МЕО-400/250. При відхиленні витрати води на скрубери від заданого значення регулятор відпрацьовує серію імпульсів певної величини і тривалості, переміщаючи регулюючий дросель, встановлений на трубопроводі води. Переміщення буде до тих пір, поки задана витрата води на скрубери не відновиться. В системі передбачено дистанційне керування регулюючим органом за допомогою ключа управління КУ і перемикача ПУ [3,4].

Автоматичне регулювання рівня шламової води в мокрих газоочисних установках.

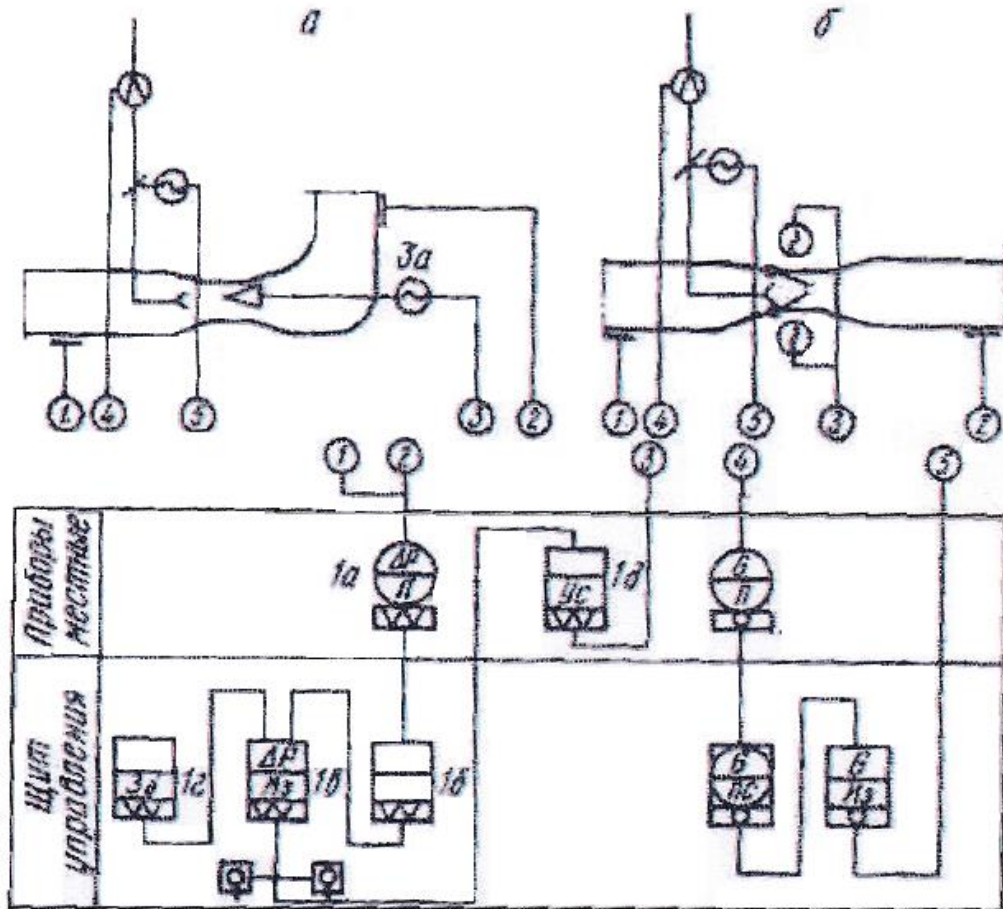
Відведення шламової води з скрубера нормального тиску не викликає труднощів, оскільки тиск газу в ньому невеликий. Безпечне відведення шламової води і регулювання рівня в цьому випадку досягаються виконанням гідрозатвору, у якого висота замикаючого шару води врівноважує тиск газу.

У скруберах підвищеного тиску рівень води підтримують за допомогою пневматичної АСР, в комплект якого входить регулятор рівня буйковий типу РУБ. Регулятор управляє регулюючим дроселем, змінюючи витрату шламової води з скрубера. Вимірювання і регулювання рівня шламової води регулятором РУБ засновані на ареометричеськім принципі. Вимірюваним параметром є виштовхуюча сила, що діє на потопуючий буйок. Зміна виштовхуючої сили викликає пропорційну зміну кута закручування торсіонної трубки, яке передається заслінкам пневматичного перетворювача. Останній перетворює кутове переміщення заслінок в пропорційну зміну пневматичних вихідних сигналів. За характером регулюючого впливу регулятор рівня типу РУБ відноситься до пропорційного типу з межами пропорційності від 5 до 100%. Регулятор рівня монтують на виносній камері, буйок розташований всередині камери і може працювати при температурі від -40 до +200 ° С і тиску в камері до 6,4 МПа [3,4].

Автоматичне регулювання гідравлічного опорускрубера Вентурі

При роботі в режимі тонкого очищення від високодисперсного пилу швидкість в горловині повинна підтримуватися в межах 100-150 м/с, а питома витрата води в межах 0,5-1,5 дм³/м³. Якщо джерело пилогазоутворення характеризується змінною у часі витратою газу, то необхідно змінювати перетин горловини для того, щоб швидкість газів в горловині підтримувалася в межах 100-150 м/с.

На рис. 5.3 зображені принципові схеми регулювання гідравлічного опору прямокутних і круглих труб Вентурі. У схемі може бути використана електрична, пневматична та гідравлічна апаратура.



a – прямокутних; *б* – круглих

Рисунок 5.3 – Схема регулювання гідравлічного опору труб Вентурі

У розглянутій схемі відбірні пристрої 1 і 2 працюють в комплекті з дифманометром типу ДМ 3537Ф. При відхиленні перепаду тиску (зміні швидкості газів в горловині) від заданого значення регулятор відпрацьовує серію імпульсів певної величини і тривалості, переміщає регулюючий конус (в круглій трубі Вентурі) або шторки (в прямокутній трубі Вентурі). Переміщення буде до тих пір, поки заданий перепад тисків (задана швидкість в горловині) не відновиться.

5.2 Автоматизація процесу очистки відхідних газів в електрофільтрі

Принцип дії електрофільтра полягає в наступному: газовий потік проходить через неоднорідне електричне поле високої напруженості, що створюється поміж коронуючими та осаджувальними електродами. Ступінь очистки газів в електрофільтрі залежить не тільки від процесів, які протікають в активній зоні апарата, але і від аеродинамічних характеристик газового потоку на вході і виході, фізико-хімічних властивостей пилогазового потоку, конструктивних особливостей апарата тощо. Електрофільтри широко застосовують на металургійних заводах, що пояснюється їх перевагами:

- принципово можна отримати газ високої чистоти і, виходячи тільки з економічної доцільності, ступінь очистки газу в електрофільтрах доводять до 97 – 99 %;
- витрата енергії на осадження часток пилу не перевищує 0,3 кВт/год на 1000м³ очищуваного газу, а втрати тиску не перевищують 200 Па;
- можливість уловлення часток розміром від 100 до 0,1 мкм и навіть менших. При цьому температура газу може перевищувати 500°C.

При збільшенні напруги до певної величини в просторі між електродами утворюється коронний розряд, наслідком якого є заповнення міжелектродного простору в основному негативно зарядженими іонами газів. Під дією сил електричного поля вони рухаються від коронуючих електродів до осаджувальних. Зустрічаючи на своєму шляху іони, частинки пилу абсорбують їх і під впливом сил поля також рухаються до осаджувальних електродів, осідаючи на них. Електроди періодично струшують, шар осадженого пилу руйнується і пил обсипається в бункер, звідки його періодично видаляють.

Заряджена частинка, досягнувши осаджувального електрода, віддає йому свій заряд і утримується на ньому силами зчеплення. Якщо ж частинка є діелектриком, то процес осадження ускладнюється тим, що осаджений шар повністю або частково зберігає свій заряд і перешкоджає утриманню нових частинок на електроді. Коли це явище супроводжується зворотною короною, то ефект очищення газу в значній мірі знижується.

Основне завдання автоматизації може бути розділене на ряд окремих задач, вирішення яких дозволяє вибрати і стабілізувати раціональні режими роботи електрофільтру. До цих завдань, зокрема, відноситься управління: електричним режимом, властивостями пилогазового потоку на вході, процесом регенерації електродів, розподілом газового потоку по перетину електрофільтра, вивантаженням уловленого пилу.

На першому етапі автоматизації електрофільтра стабілізуються окремі параметри процесу: напруга на електродах електрофільтра, температура, вологість і витрата газу, що очищається. На другому етапі вирішують зазначені вище окремі задачі з вибору і стабілізації оптимальних режимів, і, нарешті, останній етап полягає в координації роботи всіх окремих систем з метою досягнення критерію управління [3,4].

Статичні і динамічні характеристики електрофільтра

Електроочищення газу в реальних умовах є складним процесом і протікає при великому числі збурюючих впливів: зміні хімічного і гранулометричного складу, питомого електричного опору пилу, температури, швидкості, вологості та тиску газу. Основним керуючим впливом є напруга на електродах електрофільтру.

Статичні характеристики електрофільтру пов'язують ступінь очищення зі швидкістю газу, вологістю газу, питомим електричним опором, розміром частинок, з температурою і з числом іскрових розрядів. Залежність впливу дисперсного складу пилу на ефективність електрофільтру має екстремальний характер. Зі збільшенням розміру частинок до 20 - 25 мкм ефективність зростає, а починаючи з 40 мкм зменшується. Зменшення ефективності роботи електрофільтру на крупному пилу пояснюється великою провідністю та схильністю її до вторинного винесення. Істотний вплив на ефективність може надати і початкова запиленість газу. Починаючи з певної межі ефективність знижується через зменшення іонного струму. Крім того, висока запиленість газів ускладнює регенерацію осаджувальних електродів. Накопичення великого шару пилу на осаджувальному електроді знижує активну напругу на електродах, підвищує вторинне винесення уловленого пилу. Внаслідок неоднорідності шару можливий пробій на його виступах.

Аналіз статичних характеристик дозволяє зробити висновок, що максимальна ефективність електрофільтру досягається при роботі його з максимально можливою напругою на електродах, визначеною дуговим пробоем, якому передують іскріння. Іскріння в електрофільтрі відбувається в досить широкому інтервалі напруги з великим діапазоном зміни частоти і має яскраво виражений екстремум, положення якого залежить від багатьох факторів: питомого електричного опору (ПЕО), складу газу, вологості і т. д.

Питомий електричний опір (ПЕО) пилу істотно впливає на ефективність очищення газу. Після деякого критичного значення ПЕО пилу ефективність електрофільтру різко падає. Це можна пояснити появою на осаджувальному електроді зворотної корони або впливом великого падіння напруги на шарі високоомного пилу. Зворотна корона на електроді виникає в результаті того, що різниця потенціалів між поверхнею шару і поверхнею осаджувального електрода перевищує пробивну напругу шару; в його порах виникає тліючий розряд, спрямований до коронуючого електроду. Позитивні іони, що генеруються з поверхні шару пилу, частково нейтралізують негативний об'ємний заряд, в результаті чого пробивна міцність розрядного проміжку падає.

Автоматичні системи регулювання електричного режиму електрофільтра

Стабілізація робочої напруги, яка максимально можлива за умовами пробою на електродах, є основним завданням АСР електричного режиму електрофільтру. Таким чином необхідно, щоб різниця між напругою пробою U_{np} і робочою напругою U_p становила нескінченно малу величину $U_{np} - U_p = 0$.

АСР електричного режиму електрофільтру за останні десятиліття пройшли всі стадії розвитку - від використання простих реостатів, з'єднаних послідовно з автотрансформаторами загальмованих асинхронних двигунів, до сучасних систем управління на базі тиристорних регуляторів, магнітних підсилювачів, що володіють високим к.к.д. і швидкодією, які дозволяють створювати більш складні системи управління процесу електроочистки із застосуванням ЕОМ. Розроблено кілька АСР електричного режиму електрофільтру, в основу яких покладені принципи управління напругою на електродах по межі дугового пробою, числу іскрових розрядів, максимальній середній напрузі, максимальній величині корисної потужності, що спожива електрофільтр.

Конструктивно АСР мають агрегатно-блочне виконання. Розглянемо агрегат АРС-250 (400). Пошук екстремального значення напруги здійснюють способом послідовних кроків, при якому напруга на електродах через задані інтервали часу підвищується з постійною швидкістю до виникнення пробою. У момент пробою напруга відключається на 0,5-3 с або різко знижується до величини, що забезпечує гасіння дуги. Напруга пробою запам'ятовується, елемент логіки виробляє операцію визначення величини завдання регулятора напруги $U_3 = U_{пр-б}$. Величину $б$ обирає так, щоб при повторному включенні не виникало дугового пробою. У разі повторного пробою напруга знову знизиться, і так буде продовжуватися, поки не настане стійкий режим поблизу межі пробою. Якщо не відбудеться пробою протягом заданого інтервалу часу, напруга знову піднімається до настання пробою, після чого знову слідує відключення, і цикл повторюється.

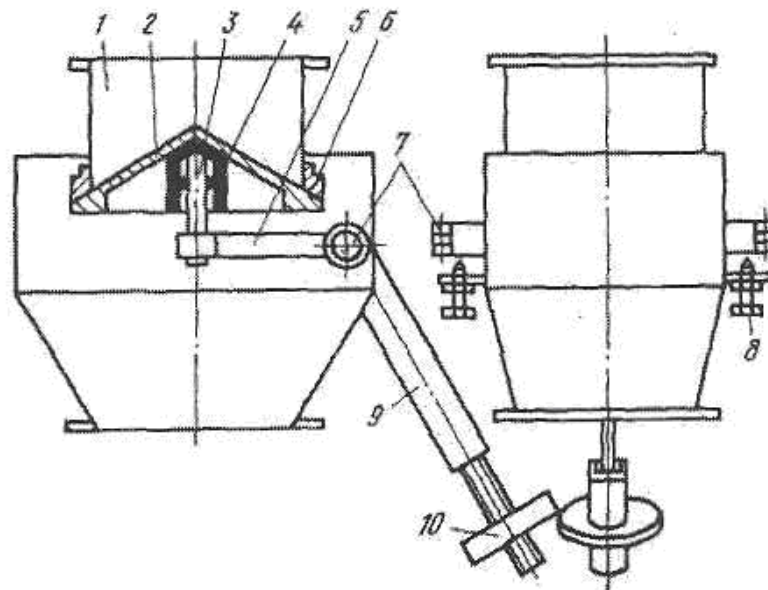
Силовий блок агрегату АРС включає високовольтний підвищуючий трансформатор $ТП$ і високовольтний селеновий випрямляч $ВС$. Блок управління складається з реле максимального струму $РМ$, реле мінімальної напруги $РН$, пристрої зворотного зв'язку, релейних елементів регулюючого пристрою $Р$, випрямляча управління $ВУ$, дроселя $Др$ і магнітного підсилювача $МУ$. Пульт керування виконаний у вигляді шафи з двостороннім обслуговуванням. На передніх верхніх дверцятах розташовані: вольтметр, амперметр, міліамперметр, перемикач вольтметра, кнопка включення пульта, червоні лампи для сигналізації включення пульта і сигналізації включення високої напруги та аварійного відключення агрегату, перемикач управління роду роботи «Ручне» і «Автоматичне», кнопки «Пуск» і «Стоп», кнопки для ручного регулювання напруги «Більше» і «Менше». У середині шафи змонтовані релейна схема автоматики і магнітні підсилювачі (основний і проміжний). Всі реле в пульті управління закриті кожухами, що забезпечує захист їх контактних систем від пилу [3,4].

Регулювання рівня пилу в бункері газоочисної установки

Вловлений пил виводиться з газоочисної установки через її бункер. Рівень пилу в бункері багато в чому визначає показники роботи газоочисної установки. При високому рівні спостерігається вторинне винесення пилу, а при низькому рівні можливий підсос повітря через механізм вивантаження пилу.

Отже, необхідним є вузол автоматичного контролю, регулювання та сигналізації верхнього та нижнього рівнів пилу в бункері.

Для регулювання рівня пилу застосовують розімкнуті і замкнуті вузли регулювання. Розірвані вузли регулювання, як правило, мають регулятори прямої дії. На рис. 5.4 показана конструкція регулятора рівня пилу безперервної дії (конусна мигалка). Рекомендовано застосовувати даний регулятор в тому випадку, якщо розрідження над ним не перевищує 1000 Па. При великих розрідженнях можуть встановлюватися послідовно два регулятора. При роботі на вологих пилах кут розкриття конуса зменшують з 90 до 60 °.

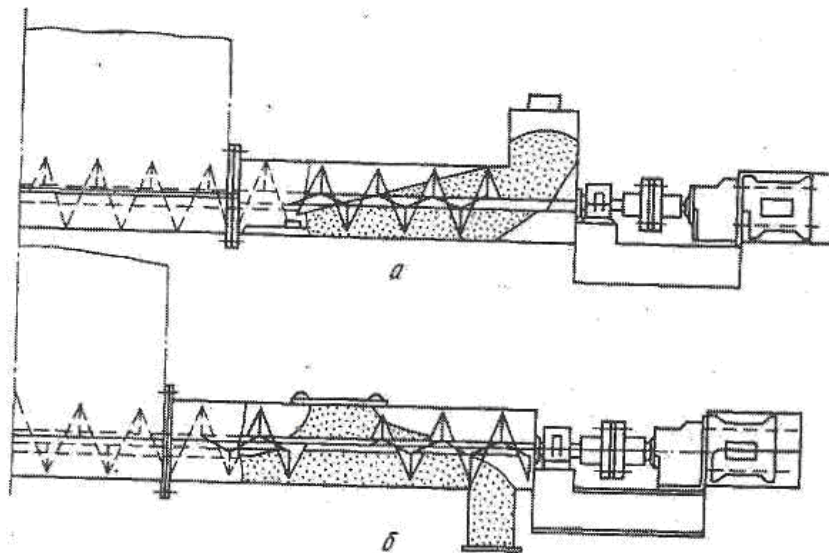


1 – приймальний патрубок; 2 – клапан конусний; 3 – голка опорна; 4 – стакан; 5 – важіль; 6 – сідло; 7 – вісь; 8 – гвинти регулювальні; 9 – ричаг; 10 – вантаж

Рисунок 5.4 – Регулятор рівня пилу прямої дії – конусна мигалка.

Завдання регулятора встановлюють знаходженням найвигіднішого положення вантажу. Після налагодження регулятора пил безперервно і майже рівномірно висипається з бункера при мінімальному коливанні клапана.

Для регулювання рівня пилу в бункері, що працює під розрідженням більше 1000 Па, застосовують шнекове вивантаження пилу. Схема такого вузла показана на рис. 5.5. Гвинт ущільнюючого шнека, показаного на рис 5.5,а, монтують частково в бункері апарату і частково у власному кожусі. Перед вивантажувальним патрубком шнека, кінець якого позбавлений кількох гвинтів, встановлена похила металева площина, завдяки якій утворена в цьому місці пробка з пилу проштовхується в бічну розвантажувальну точку. В буферному шнеку, показаному на рис. 5.5,б, утворення пилової пробки відбувається приблизно в центрі шнека, де прибрані від одного до двох витків гвинта. Форма і висота металевого листа поблизу ущільнюючого шнека, так само як і довжина ділянки, на якій утворюється пробка за рахунок вилучення частини витків, визначені властивостями пилу і гідравлічним режимом пиловловлюючого апарату [3,4].



a – ущільнюючий шнек; *б* – буферний шнек.

Рисунок 5.5 – Схеми герметичного розвантаження пилу

5.3 Автоматизація процесу очистки відхідних газів в рукавних фільтрах

За останні роки в металургійній промисловості для уловлювання найбільш дрібнодисперсного і цінного пилу все більше застосовують фільтри з натуральних і штучних тканин. Найбільше застосування отримали фільтруючі елементи у вигляді рукавів (рукавні фільтри). Ефективність очищення рукавними фільтрами може становити 99,99% і відносно не залежати від дисперсності пилу. У той же час рукавні фільтри мають серйозні недоліки. Вовняні і бавовняні тканини дозволяють очищати гази з температурою не вище 77°C. Склотканина може витримувати температуру до 377°C.

Надійна робота рукавних фільтрів можлива тільки при дотриманні і підтримці допустимих температурних режимів. Перевищення температури газів, що очищаються, вище зазначених в інструкціях з експлуатації призводить до зменшення терміну служби тканин; вони стають крихкими і вимагають заміни. При зниженні температури газів до точки роси відбувається конденсація парів води, можливе утворення кислот, в результаті чого пил, який осів на тканину, зволожується, злипається, ускладнюється процес регенерації тканини і різко підвищується гідравлічний опір. Температура газів на виході з рукавного фільтра повинна бути на 20-30 °C вище температури точки роси. Низька швидкість фільтрування вимагає великої площі фільтра. Слід відзначити, що при регенерації необхідно руйнувати і видаляти з тканини тільки частина шару пилу з тим, щоб мати високу ефективність очищення газу.

Необхідно контролювати ряд технологічних параметрів газоочищення, а саме:

1) розрідження перед апаратом (для настройки та оцінки відбору газів від технологічного обладнання);

2) розрідження після апарату (для запобігання роботі ГОУ з надмірно великим розрідженням і оцінки роботи тягодуттєвих пристроїв ТДУ);

3) перепад тиску на апараті АР (наприклад, для контролю ступеня забруднення фільтрувальних рукавів);

4) температуру газу на вході в апарат;

5) температуру газу на виході з апарату;

6) тиск стисненого повітря на ввіді (для контролю наявності стисненого повітря в магістралі);

7) тиск стисненого повітря у накопичувачі (для контролю справності вузла редукування стисненого повітря і його наявності для продувних клапанів);

8) аварійний рівень пилу в бункері (для сигналізації про гранично допустимий рівень пилу і запобігання переповнення апарату пилом);

9) верхній рівень пилу в бункері (для подачі команди на вивантаження пилу);

10) нижній рівень пилу в бункері (для подачі команди на припинення вивантаження пилу).

Завдання автоматизації рукавного фільтра: створення найбільш сприятливих умов для протікання процесу фільтрації. При цьому рукавний фільтр працює з максимальною ефективністю очищення і має найкращі економічні показники при обмеженнях, обумовлених властивостями фільтруючого матеріалу (термостійкістю, стійкістю до дії кислот, лугів і т.п.), потужністю тягодуттєвих пристроїв [3,4].

До цих завдань відносять:

- управління температурним режимом фільтра;

- процесом регенерації тканини;

- вивантаженням уловленого пилу.

Температурний режим в газоочисній установці визначає ефективність процесу очищення і надійність її роботи. Термостійкість фільтрувальної тканини зумовлює верхню межу регулювання температури. Наприклад, верхня межа регулювання температури рукавного фільтра, фільтруючі елементи якого виконані з капрону, складе 65°C , а для фільтрів зі скловолкна 250°C . Робота пиловловлюючих апаратів на газах з температурою вище верхньої межі неприпустима [3,4].

Температура точки роси газів, що очищаються, визначить нижню межу регулювання. Гази, які містять вільний сірчаний ангідрид, мають точку роси близько 220°C , а при більш низьких температурах будуть конденсуватися.

Датчиками температури найчастіше є термометри опору, межі вимірювання яких відповідають значенням контрольованих температур. В якості регуляторів температури застосовують найрізноманітніші модифікації регулюючих пристроїв: пневматичні, електричні, гідравлічні. Тип виконавчого механізму залежить від типу обраного регулятора (пневматичного, електричного, гідравлічного).

Статичні і динамічні характеристики рукавного фільтра

Роботу рукавного фільтра оцінюють за такими параметрами: залишковою запиленістю очищеного газу, ефективністю роботи, гідравлічним опором, рівнем пилу в бункері, температурами газу та повітря зворотного продування.

Основний керуючий вплив в рукавних фільтрах здійснюють на наступні показники:

- товщина шару пилу на поверхні фільтруючої тканини, яка може бути забезпечена частотою та інтенсивністю струшування,
- витрата повітря на зворотну продувку,
- швидкість переміщення каретки струменевої продувки,
- частота та інтенсивність імпульсної регенерації.

Гідравлічний опір різного типу тканин лінійно змінюється зі зміною товщини шару пилу. Залежність ефективності рукавного фільтра від товщини шару пилу має екстремальний характер. Динамічні характеристики рукавного фільтра також залежать від типу тканини і теплофізичних параметрів газу і пилу.

Автоматичне управління режимом роботи систем регенерації рукавних фільтрів

Аналіз статичних характеристик показує, що товщина шару пилу, H_p , виходячи з отримання максимальної ефективності, повинна знаходитися в інтервалі $H_{min} < H_p < H_{max}$. Для того щоб товщина шару пилу змінювалася в зазначеному інтервалі, розроблені системи регенерації.

Найбільш простою є система механічного струшування. При цьому механічний вплив на рукав здійснюється через виконавчий механізм. Для струшування рукава застосовують ланцюгової виконавчий механізм, для горизонтального переміщення рукава кривошипно-шатунний, для стиснення і підтягування тканини; а для вібрації - інерційний і ударний механізми. Зворотну продувку здійснюють або атмосферним повітрям при відкриванні клапану підсосу, або очищеними газами за допомогою додаткового вентилятора.

Основним недоліком системи регенерації струшуванням і зворотною продувкою є необхідність відключення секції під час регенерації.

Імпульсна регенерація здійснюється при працюючому фільтрі і не вимагає його відключення. Для цього імпульс стисненого повітря подають всередину рукава. Тривалість імпульсу становить 0,1-0,2 с при надлишковому тиску повітря 400-800 кПа. Частота імпульсів залежить від характеру вхідних величин і, в першу чергу, від початкової запиленості газу. Витрата повітря для продування становить 0,1-0,2% від кількості газів, що очищаються. Управління електромагнітними клапанами стисненого повітря здійснюється електронним таймером.

Зворотня струменева продувка також здійснюється при працюючому фільтрі і не вимагає його відключення. Застосовують струминну продувку при малих початкових концентраціях пилу. При цьому спосіб регенерації дозволяє підвищити швидкість фільтрації до 3-5 м³ / (м² · хв). Принцип дії струменевої продувки заснований на наступному. Через вузьку щілину в порожнистому кільці, яке рухається уздовж рукава вгору і вниз, відбувається витікання

кільцевого струменя стиснутого повітря тиском 500-600 кПа зі швидкістю 10-30 м / с, що видуває пил з тканини всередину рукава. При цьому можливі два варіанти роботи АСР: при заданій або постійній швидкостях переміщення каретки. У другому випадку швидкість каретки коригується залежно від початкової запиленості або зміни гідравлічного опору рукавного фільтра.

5.4 Автоматизація процесу очистки стічних вод

Використання автоматизованих систем контролю якості води, аналізаторів контролю якості води та засобів вимірювальної техніки дає змогу вимірювати різноманітні параметри водних об'єктів, своєчасно приймати управлінські рішення для унеможливлення появи екологічних негараздів.

Автоматизування аналізу якості водних об'єктів також сприяє уникненню похибок, спричинених людським фактором.

Виділяють наступні методи очищення стоків:

- очищення від емульгованих і суспендованих домішок. Для цього грубі домішки відокремлюють відстоюванням, фільтрацією і проціджуванням, флотацією і відцентровим відстоюванням. Дрібнодисперсні речовини відокремлюють шляхом флокуляції, електрофлотації і електрокоагуляції;
- очищення від домішок, розчинених у стоках. Для цього використовується іонний обмін, дистиляція, зворотний осмос, заморожування, електродіаліз, методи очищення із застосуванням хімічних реагентів;
- очищення від органічних домішок;
- регенеративні методи: ректифікація, освітлення, ультрафільтрація, зворотний осмос.
- деструктивні: окиснення парофазне, рідкофазне, електрохімічне,
- очищення від газів: реагентні методи, нагрів.

Найбільш радикальним вирішенням проблеми очищення стоків є будівництво найсучасніших очисних споруд. У таких спорудах на першому етапі передбачена механічна чистка. На шляху руху стоків встановлюється сито або ґрати, за допомогою якої відбувається уловлювання зважених часток і плаваючих предметів. Пісок та інші неорганічні речовини осідають в пісковловлювачі. Нафтовловлювачі і жироловки вловлюють нафтопродукти та жири. Пластівчасті частинки уловлюються після осадження їх за допомогою хімічних коагулянтів.

На другому етапі відбувається очищення біологічними методами. Анаеробні бактерії розкладають завислу і розчинену органіку. Стоки пропускають через різні фільтри: піщані, гравійні, керамзитові і фільтри з синтетичних полімерів. У відстійниках утворюється активний мул.

Третинна очистка сприяє видаленню забруднювачів, що залишилися. На цьому етапі видаляються пестициди і фосфати шляхом фільтрації через деревне вугілля або при додаванні коагулянтів.

Автоматизація споруд механічної очистки стічних вод

Вибір методу очистки води, типи і розміри очисних споруд залежать від складу, властивостей і витрати промстоків, площі території підприємства та інших факторів, а також вимог до якості очищеної води.

Одним з основних видів забруднень виробничих стічних вод є нерозчинні (легкі й важкі) мінеральні і органічні домішки, концентрація яких коливається в широких межах. Усереднення концентрації й регулювання витрати стічних вод, а також виділення нерозчинних домішок з води в очисних спорудах становлять завдання механічного очищення. Механічна очистка служить для видалення нерозчинених речовин розміром більше 10^{-4} см. Забезпечується це за рахунок проціджування на ґратах, дугових ситах, грохотах; відстоювання (гравітаційного або відцентрового), фільтрування через спеціальні сітки або піщано-гравійні фільтри (для відділення дрібних частинок що перебувають у воді в зваженому стані, тобто суспензій) та центрифугування.

Залежно від вимог до якості очищеної води застосовують різні очисні споруди:

- ґрати та сітки, призначені для затримки крупних домішок, що рухаються по каналу (проціджування);
- пісковловлювачі - для виділення важких мінеральних домішок, головним чином, піску;
- відстійники та фільтри - для затримки більш дрібних у воді домішок;
- гідроциклони та осаджувальні центрифуги.

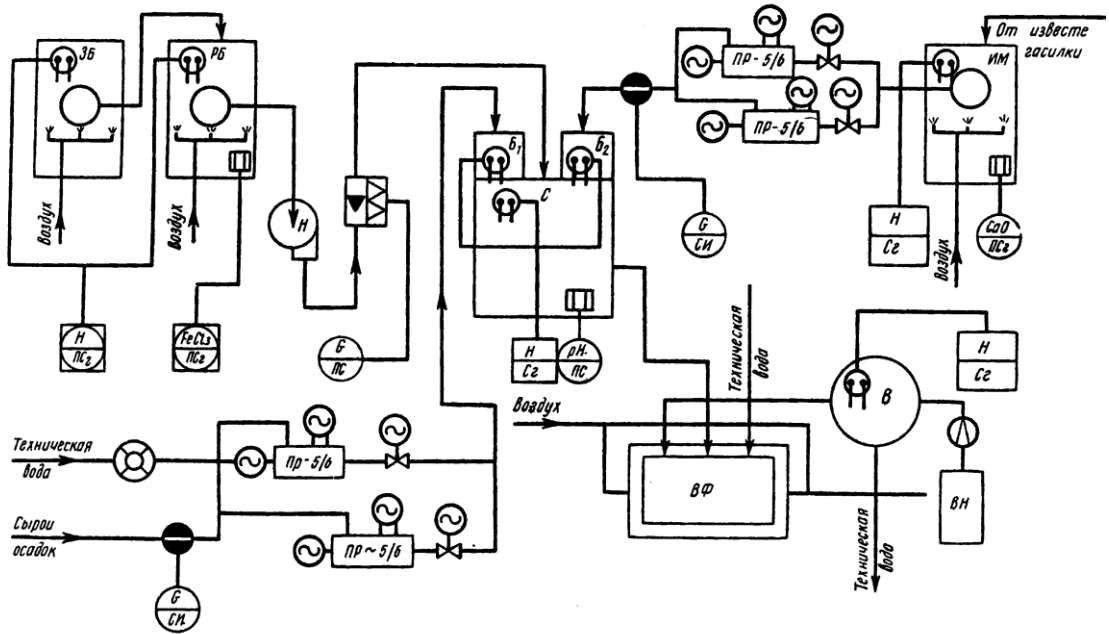
Як правило, механічна очистка є попереднім, рідше – остаточним етапом очистки виробничих стічних вод. При механічному очищенні забезпечується видалення завислих речовин зі стічних вод на 90-95 % , зниження органічних забруднень (по БПК_{повн}) на 20-25 %. Більш високий ефект механічної очистки стічних вод досягається інтенсифікацією гравітаційного відставання, наприклад, добавкою реагентів, проясненням у зваженому шарі або в тонкому шарі (тонкошарові відстійники) (рисунки 5.6).

Системи автоматичного управління процесів фізико-хімічної очистки забезпечують надійність роботи очисних установок в складних динамічних режимах і служать основою для вирішення завдань синтезу оптимальних енерго- і ресурсозберігаючих автоматизованих хімічно-технологічних систем очищення стічних вод.

Основне завдання САУ процесів реагентної очистки стічних вод - забезпечення заданої якості очищення шляхом дозування необхідних кількостей реагенту. Часто застосовують систему стабілізації якості очищення води за відхиленням від заданого значення.

Дозування реагентів. На багатьох очисних станціях побудовані установки для механізації і автоматизації завантаження, розчинення і мокрого дозування коагулянтів, в основу яких покладені автоматичний дозатор системи Чейшвілі - Кримського. Загальна схема установки наведена на рис. 5.7.

Завантаження коагулянту відбувається в бункер 9 з автомобіля-самоскиду.



ВФ – вакуум-фільтр, ВН – вакуум-насос, В – вакуум-бак. С- змішувач, Б1 – дозувальний бачок сирого осаду, Б2 – дозувальний бачок вапнякового молока, ИМ – витратний блок вапнякового молока, Н – насос, РБ – витратний бак хлорного заліза, ЗБ – затворний бак хлорного заліза, ПР 5/6 – насоси-дозатори
 Рисунок 5.6 – Схема автоматичного контролю зневоднення осадку

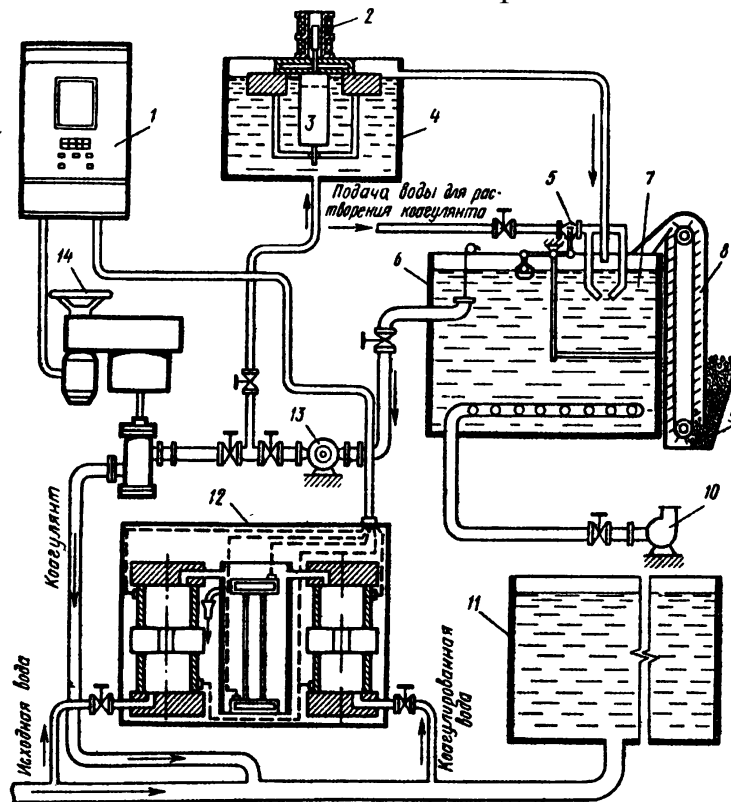


Рисунок 5.7 – Загальна схема автоматизації завантаження, розчинення та дозування коагулянтів

Далі коагулянт елеватором 8 подається в камеру 7, яка має дірчасте дно. В цю ж камеру для розчинення коагулянту подається вода. Подача води

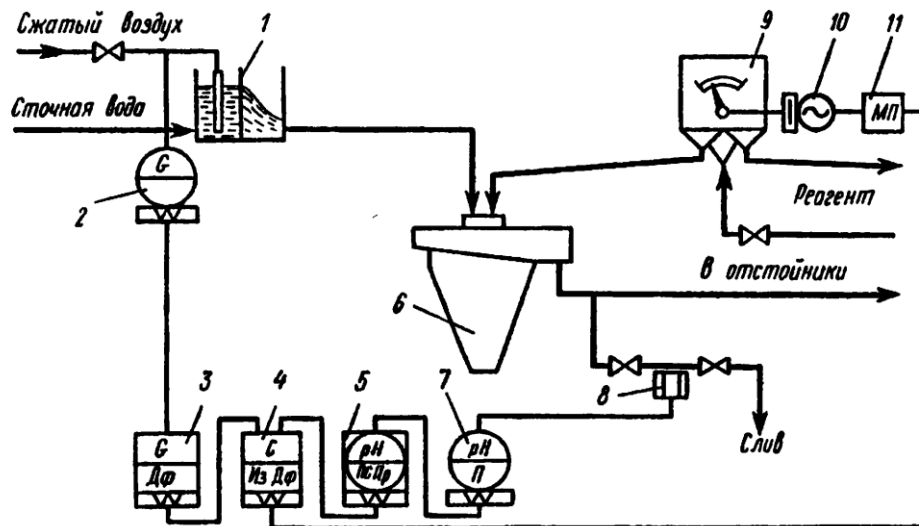
регулюється дросельними клапаном 5 з поплавцевим пристроєм. Перемішування розчину відбувається за допомогою стиснутого повітря та подається за допомогою повітродувки 10 в мережу перфорованих труб, які укладені на дні бака 6. В умовах періодичного завантаження коагулянту в камеру 7 концентрація розчину, що забирається з бака 6 буде повільно підвищуватися або знижуватися в певних межах. Контроль концентрації розчину здійснюється ареометром 3 з електричним індукційним датчиком 2. До датчика підключені вторинний прилад для вимірювання та реєстрації концентрації коагулянтів та контактна система, яка регулює роботу елеватора 8. Ареометр вимірює концентрацію розчину в улаштованому для цієї мети баку 4. Розчин з бака 6 подається насосом 13 через регулюючий вентиль з електроприводом 14 в трубопровід, по якому вода поступає у змішувач 11. Перед регулюючим вентилем встановлено трійник, через який частина розчину безперервно подається в бак 4, а з нього по переливній трубі відводиться у бак 7. Цим забезпечується контроль концентрації робочого розчину коагулянту перед його подачею у воду. Введення розчину коагулянту в трубі під тиском забезпечує швидке та повне перемішування його з водою. До складу дозатора входять рівноважній електронний міст ЕМД-217 і датчик електропровідності 12, який включає дві вимірювальні і одну компенсаційну електролітичні комірки. До однієї з вимірювальних комірок підводиться вода з трубопроводу до введення в неї розчину коагулянтів, а до іншої - після введення коагулянту. Електропровідність води, в яку введено коагулянт, більше, ніж без коагулянту. За різницею електропровідності води в електролітичних комірках можна визначити кількість коагулянту у воді.

При вживанні дозаторів цього типу відпадає необхідність в улаштуванні окремих баків для приготування і витрати розчинів; досить мати лише один невеликий бак розчину. Проте треба забезпечити такі умови роботи бака, щоб швидкість розчинення коагулянту перевищувала його найбільшу витрату.

Досвід застосування дозатора коагулянту Чейшвілі - Кримського показав, що до його недоліків можна віднести: запізнювання в регулюванні, порушення роботи при відкладенні осаду, складність температурної компенсації. Для успішної роботи дозатора необхідне кваліфіковане обслуговування.

Величина рН є одним з основних параметрів автоматичного контролю та регулювання процесів очищення стічних вод, який забезпечує інформацію про ступінь забруднення їх кислотами і лугами, у багатьох випадках визначає швидкість і напрямок хімічних реакцій (рис.5.8). Значення рН вимірюють за допомогою рН-метрів типу рН-220, що випускаються серійно.

Електричну провідність, обумовлену загальним солемістом, вимірюють за допомогою кондуктометрів. До їх числа відносяться кондуктометри типу АКК-01 і АКК-02, а також спеціалізовані багатограничні кондуктометричні аналізатори з автоматичними перемиканням діапазонів типу АУМ-201, призначеними для вимірювання питомої електричної провідності стічних вод, забруднених кислотами, лугами і солями.



1 – щільовий витратомір; 2 – дифманометр; 3 – диференціатор; 4 – ізодромний регулятор; 5 – автоматичний потенціометр з функціональним вторинним датчиком; 6 – змішувач-реактор; 7 – високоомний перетворювач; 8 - датчик рН-метра; 9 – дозатор реагента; 10 – виконавчий механізм; 11 – магнітний пускач

Рисунок 5.8 – Схема САР процесу нейтралізації по значенню рН і витраті стоків

Концентрацію розчинених забруднюючих домішок у стічних водах вимірюють з використанням потенціометричних, фотометричних, амперометричних і кондуктометричних методів контролю.

Для контролю ціанідів та шестивалентного хрому існують сигналізатори наявності або відсутності їх у стічних водах – СЦ-2 і СХ-2. Ці прилади забезпечені пристроєм електрохімічного очищення електродних систем, що дозволяє виключити вплив домішок заліза, СПАР і нафтопродуктів, що заважають вимірюванню. Для визначення концентрації шестивалентного хрому існує автоматичний фотоколориметричний Концентратометр АХСВ-201, що має два діапазони: 0-0,5 мг / л – для очищ. води і 0-100 мг / л - для забрудненої.

Для контролю і регулювання концентрації іонів натрію, кальцію, хлоридів, нітратів та ціанідів використовують іоноселективні електроди в комплекті з перетворювачами типу П-215 або П-210. Для визначення каламутності стічної води застосовують фотометричні прилади.

При застосуванні САУ процесів **флотаційного очищення** стічних вод враховують тип флотації (напірна, електрична, хімічна), склад стічних вод, статична і динамічна характеристики процесів флотації. Основним регульованим параметром є каламутність очищеної води.

Основними завданнями систем автоматичного управління процесів **іонообмінного очищення** стічних вод є управління послідовністю і тривалістю операцій; визначення моменту виснаження кожного з іонообмінних фільтрів і перехід у режим регенерації; переключення потоку оброблюваної води на отрегенерований фільтр; управління процесом регенерації шляхом підтримання сталості концентрації регенераційних розчинів і відключення його

після досягнення необхідного ступеня регенерації; управління процесом відмивання фільтрів від регенераційних розчинів шляхом відключення подачі отмивочної води по закінченні процесу відмивання.

Крім того, в схемі управління процесом іонообмінного очищення має бути передбачено переключення потоку вихідної стічної води при підвищенні солемісту до концентрації, що виключає її подачу на іонообмінну очистку, на установку реагентної очистки елюатів.

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Як здійснюють автоматичне регулювання витрати води на зрошення газу?
2. Як здійснюють автоматичне регулювання рівня шламової води?
3. Які елементи містить схема автоматичного регулювання гідравлічного опору скрубера Вентурі?
4. Що відноситься до статичних і динамічних характеристик роботи електрофільтра?
5. Автоматична система регулювання електричного режиму електрофільтра.
6. Як здійснюють автоматичне управління режимом роботи рукавного фільтра?
7. Загальна схема автоматизації завантаження, розчинення та дозування коагулянтів.
8. Основні вузли схеми САР процесу нейтралізації по значенню рН і витраті стоків.

РОЗДІЛ 6 ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ

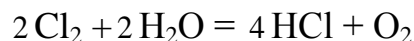
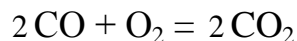
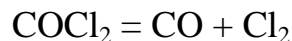
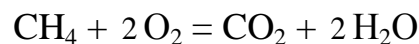
6.1 Лабораторна робота № 1. Визначення вмісту гідроген хлориду у промислових газах

Мета роботи: Опанувати методику визначення концентрації гідроген хлориду у промислових газах.

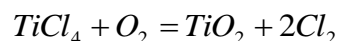
Загальні відомості

У газових викидах ряду виробництв міститься шкідливий газуватий компонент гідроген хлорид *HCl*.

Наприклад, відхідні гази переділу хлорування титанових шлаків являють собою багатокомпонентну систему, що містить *Cl₂*, *HCl*, *COCl₂*, *CO*, *CO₂*, *TiCl₄*, *SiCl₄* та ін. Звичайно гази заздалегідь поступають у піч спалювання, обладнану пальниками для спалювання природного газу. У печі відбувається повний розклад фосгену та одночасно окислення *CO* і утворення *HCl*:



У зоні високих температур хлориди металів (*TiCl₄*, *SiCl₄* та ін.) окислюються до оксидів відповідних металів, наприклад:



а хлор, що виділився, взаємодіє з парами води з утворенням *HCl*. Після печі спалювання гази мають температуру близько 1000°C та містять тільки одну шкідливу домішку – гідроген хлорид. Вони направляються на мокре очищення після попереднього розведення повітрям. Вміст гідроген хлориду у поступаючих на мокре очищення газах у межах 15...20 г/м³, температура 200...300°C. Очищення здійснюється в порожнистих форсунокових скруберах за двохступінчастою схемою при протиточному русі газу та зрошувальної рідини. На першому ступені для зрошування застосовують воду, на другій – вапняне молоко.

При аналізі газів на вміст хлористого водню суміш пропускають послідовно через поглинальні посудини Дрекселя з дистильованою водою.

Концентрація HCl у поглиначах та, отже, вміст його в газі визначається методом нейтралізації.

Метод заснований на реакції нейтралізації між гідроген хлоридом та лугом:

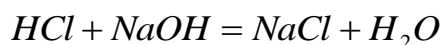
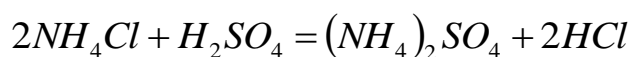


Схема та опис експериментальної установки

Схематично лабораторна установка показана на рисунку 6.1. Вона містить компресор 1, реактор-змішувач газів 3 з воронкою 5, буферний змішувач 6, дві поглинальні посудини (склянки Дрекслея) 7 та 8, термометр 9, рідинний манометр 10 та прилад для визначення витрати газу 11.

Гідроген хлорид одержують дією технічної сульфатної кислоти на амоній хлорид за реакцією



З цією метою амоній хлорид насипають в реактор-змішувач газів. При зачиненому крані 4 у воронку наливають сульфатну кислоту. Відкриваючи кран 4 на воронці, кислоту тонким струмочком вливають у реактор, після чого кран закривають. Вмикають процесор при повністю відкритому крані 2. Повільно закриваючи кран 2, подають повітря в реактор-змішувач та далі через буферний змішувач у поглинальні посудини з дистильованою водою. Витрату газової суміші, що подається в лабораторну установку, визначають реометром. Об'ємну швидкість газу через поглиначі слід підтримувати рівною 0,5 л/хв. Температуру та тиск газової суміші заміряють за допомогою термометра та рідинного манометра.

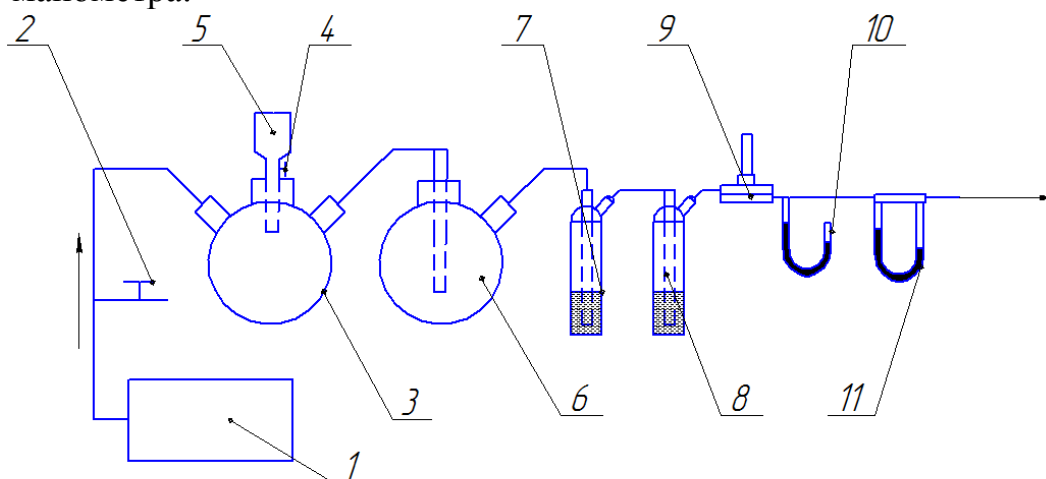


Рисунок 6.1 – схема експериментальної установки для визначення вмісту гідроген хлориду у промислових газах

Хід роботи

У дві поглинальні посудини заливають по 20 мл дистильованої води, додають по дві краплі індикатора метилоранжу та пропускають через них

газову суміш з об'ємною швидкістю 0,5 л/хв до початку зміни забарвлення розчину в другій (по ходу газу) поглинальній посудині. Потім компресор вимикають. Тривалість пробовідбору фіксують за допомогою секундоміра. Заміряють та записують температуру і тиск газової суміші в умовах експерименту, а також барометричний тиск.

Після закінчення відбору проб газу вміст двох поглинальних посудин кількісно переводять у колбу для титрування та титрують 0,1н розчином натрій гідроксиду до переходу червоного забарвлення (кисле середовище) у жовте (нейтральне та лужне середовище).

За результатами титрування розраховують вміст гідроген хлориду в газовій суміші.

Обробка результатів експерименту

Розраховують об'єм газової суміші, пропущеної через поглинальні посудини, л:

$$V = Qr, \quad (6.1)$$

де Q – об'ємна витрата газової суміші, л/хв;
 r – тривалість відбору проб газу, хв.

Об'єм газової суміші, пропущеної через поглиначі, приводять до нормальних умов, л:

$$V_0 = V \frac{273 \cdot (B \pm P_r)}{(273 + t_r) \cdot P_0}, \quad (6.2)$$

де t_r – температура газової суміші, °С;
 B – барометричний тиск, кПа;
 P_r – тиск (розрідження) газової суміші, кПа;
 P_0 – атмосферний тиск при нормальних фізичних умовах;
 $P_0 = 101,3$ кПа.

Концентрацію гідроген хлориду в газовій суміші розраховують за наступною формулою, г/м³:

$$C_{HCl} = \frac{a \cdot T_{NaOH/HCl}}{V_0} \cdot 10^3, \quad (6.3)$$

де a – об'єм 0,1N розчину натрій гідроксиду, якій пішов на титрування, мл;
 $T_{NaOH/HCl}$ – титр 0,1N розчину натрій гідроксиду за гідроген хлоридом, г/мл.

Контрольні питання

1 Опишіть лабораторну установку. Поясніть принцип її роботи.

2 Напишіть хімічну реакцію синтезу гідроген хлориду.

3 На якому методі засновано визначення вмісту гідроген хлориду в газовій суміші?

4 Як проводять обробку результатів експерименту?

5 Як слід розуміти титр розчину натрій гідроксиду? Знайти титр 0,05М розчину натрій гідроксиду за гідроген хлоридом?

Зміст звіту до лабораторної роботи

- Мета роботи

- Письмові відповіді на контрольні запитання.

- Привести формули математичної обробки результатів експерименту та розрахунок.

- Висновки

6.2 Лабораторна робота №2. Визначення вмісту сульфур діоксиду в газах методом йодометрії

Мета роботи: Вивчити та опанувати методику визначення концентрації сульфур діоксиду у промислових газах.

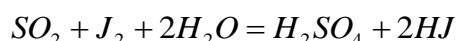
Загальні відомості

Ангідрид сульфїтної кислоти є одним з найбільш поширених забруднювачів повітряного басейну. Найбільшу кількість сульфур діоксиду викидають в атмосферу теплоелектростанції (48%) та підприємства кольорової металургії (16%).

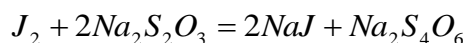
Значними є викиди сполук сульфуру також на підприємствах чорної металургії. Так, у технологічних газах агломашин при агломерації руд вміст ангїдриду сульфїтної кислоти сягає 0,5...1% об. Ця кількість складає приблизно 80% всього сульфур діоксиду, що міститься у відхідних газах підприємств чорної металургії. На ряді заводів на агломераційних фабриках передбачені установки по знешкодженню сульфур діоксиду в технологічних викидах агломашин.

Аналізуючи газ на вміст андїгриду сульфїтної кислоти, газову суміш пропускають послїдовно через поглинальнї посудини Дрекселя, що містять строго визначений об'єм розчину йоду заданої нормальної концентрації. Концентрація сульфур діоксиду в газовій суміші визначається методом йодометрії, зворотним титруванням.

Метод йодометрії ґрунтується на окисленні сульфур діоксиду йодом до сульфатної кислоти за реакцією:



Відбір проб газу ведуть до освітлення розчину йоду у першій (по ходу газу) поглинальній посудині. Надлишок розчину йоду відтитровують розчином натрій тіосульфату заданої концентрації:

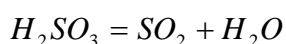
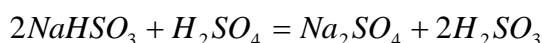
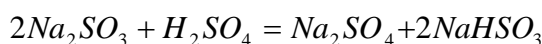


Даний хімічний процес – окисно-відновний. За реакцією йод відновлюється тіосульфатом до натрій йодиду, а натрій тіосульфат окислюється з утворенням складної сполуки – натрієвої солі тетрагідротіосульфатної кислоти.

Схема та опис експериментальної установки

Ця робота виконується на лабораторній установці, схематично показаній на рисунку 6.2. Установка містить компресор 1, реактор-змішувач газів 3 з воронкою 5, буферній змішувач 6, три поглинальні посудини (склянки Дрекселя) 7, 8 та 9, термометр 10, рідинний манометр 11 та прилад для визначення витрати газу 12.

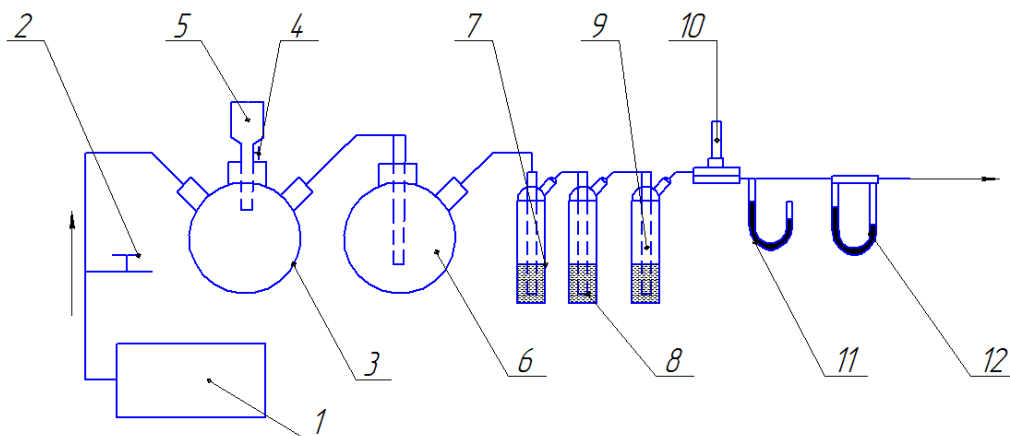
В основі отримання сульфур діоксиду лежить реакція взаємодії сульфатної кислоти з середніми або кислими сульфітами, наприклад:



З метою отримання SO_2 в реактор-змішувач газів насипають динатрій сульфід. При зачиненому крані 4 у воронку наливають технічну сульфатну кислоту. Відкриваючи кран 4 на воронці, кислоту тонким струмком виливають у реактор, після чого кран закривають. Вимикають компресор при повністю відкритому крані 2. Повільно закривають кран 2, подають повітря в реактор-змішувач та далі через буферний змішувач у поглинальні посудини з розчинами йоду та натрій тіосульфату. Витрату газової суміші, що пропускається через поглиначі, визначають реометром. Об'ємну швидкість газу слід підтримувати рівною 0,5 л/хв. Температуру та тиск газової суміші в умовах експерименту визначають за допомогою термометра та рідинного манометра.

Хід роботи

В дві поглинальні посудини заливають по 20 мл 0,1N розчину йоду, а у третю поглинач – 5 мл 0,1N розчину натрій тіосульфату, установлюють послідовно та пропускають через них газову суміш, що містить SO_2 , з об'ємною швидкістю 0,5 л/хв. Відбір проб газу ведуть до зміни забарвлення розчину в першому (по ходу газу) поглиначі на солом'яно-жовтий, після чого компресор вимикають. Час пробовідбору фіксують за допомогою секундоміра. Заміряють та записують температуру та тиск газової суміші в умовах експерименту, а також барометричний тиск.



1 – компресор; 2,4 – крани; 3 – реактор-змішувач; 5 – воронка; 6 – буферний змішувач; 7,8,9 – поглиначі Дрекслея; 10 – термометр; 11 – рідинний манометр; 12 – реометр

Рисунок 6.2 – Схема експериментальної установки для визначення вмісту сульфур діоксиду у промислових газах

Після закінчення відбору проб вміст всіх поглинальних посудин кількісно переводять в колбу для титрування та титрують надлишок йоду 0,1N розчином натрій тіосульфату до солом'яно-жовтого забарвлення. Потім додають дві краплі індикатора (водного розчину крохмалю), в результаті чого розчин у колбі набуває інтенсивного синього забарвлення, та обережно дотитровують його 0,1N розчином натрій тіосульфату до знебарвлення.

За результатами титрування розраховують вміст сульфур діоксиду в газовій суміші.

Обробка результатів експерименту

Розраховують об'єм газової суміші, пропущеної через поглинальні посудини, л:

$$V = Qr, \quad (6.4)$$

де Q – об'ємна витрата газової суміші, л/хв;
 r – тривалість відбору проб газу, хв.

Об'єм газової суміші, пропущеної через поглиначі, приводять до нормальних умов, л:

$$V_0 = V \frac{273 \cdot (B \pm P_r)}{(273 + t_r) \cdot P_0}, \quad (6.5)$$

де t_r – температура газової суміші, °С;
 B – барометричний тиск, кПа;
 P_r – тиск (розрідження) газової суміші, кПа;
 P_0 – атмосферний тиск при нормальних фізичних умовах;
 P_0 – 101,3 кПа.

Концентрацію сульфур діоксиду в газовій суміші розраховують за формулою, г/м³:

$$C_{SO_2} = \frac{(a-b-c) \cdot T_{Na_2S_2O_3/SO_2}}{V_0} \cdot 10^3, \quad (6.6)$$

де a – об'єм 0,1N розчину йоду, взятий для аналізу, мл;

b – об'єм 0,1N розчину натрій тіосульфату, який пішов на титрування мл;

c – об'єм 0,1N розчину натрій тіосульфату, залитого у поглинач; $c = 5$ мл;

$T_{Na_2S_2O_3/SO_2}$ - титр 0,1N розчину натрій гідроксиду за сульфур діоксидом, г/мл.

Контрольні питання

1 Напишіть окисно-відновну реакцію взаємодії SO₂ з J₂. Поясніть.

2 Напишіть окисно-відновну реакцію J₂ з Na₂S₂O₃. Поясніть.

3 Як визначити титр розчину заданої нормальної концентрації? Розрахуйте титр 0,1N розчину йоду; 0,1N розчину натрій тіосульфату.

4 Як слід розуміти “титр 0,1N розчину натрій тіосульфату за сульфур діоксидом”? Як розрахувати його? Одиниця вимірювання?

5 Поясніть суть зворотного титрування, яке має місце у цій лабораторній роботі.

Зміст звіту до лабораторної роботи

- Мета роботи.

- Письмові відповіді на контрольні запитання.

- Привести формули математичної обробки результатів експерименту та розрахунок.

- Висновки

6.3 Лабораторна робота №3. Визначення вмісту нітроген оксидів у промислових газах

Мета роботи: Вивчити та опанувати методику фотоколориметричного аналізу нітроген оксидів у відхідних газах.

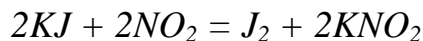
Загальні відомості

Одним з характерних компонентів газових викидів металургійних підприємств є нітроген оксиди – продукти високотемпературних технологічних процесів. Поряд з пилом та сульфур діоксидом значна кількість нітроген оксидів поступає у повітряний басейн з димовими газами ТЕС. Як доповнення до викидів промислових підприємств у атмосферу нітроген оксиди виділяє і транспорт.

Все це зумовлює істотне забруднення повітря великих промислових міст. Наприклад, в атмосфері такого великого індустріального центру як Запоріжжя

нітрогену та сульфуру оксиди складають 12% від суми шкідливих викидів промислових підприємств та міського транспорту.

Ця методика призначена для визначення вмісту суми нітроген оксиду та діоксиду у викидних газах, при концентрації від 10 до 1000 мг/м³. Метод ґрунтується на реакції нітроген діоксиду з калій йодидом:



Вміст нітроген діоксиду визначають фотоколориметрично за реакцією утворення азофарби з реактивом Грісса. У цьому випадку калій нітрит взаємодіє з сульфаніловою кислотою (амінобензолсульфо кислотою), утворюючи діазосполуку. Остання ж, реагуючи з І-нафтиламином, дає азофарбу. Азофарба надає розчину забарвлення від блідо-рожевого до червоно-фіолетового кольору. Інтенсивність забарвлення пропорційна концентрації нітритів, а отже, концентрації нітроген діоксиду в газовій суміші, що аналізується.

Фотометричні методи, в яких виміряється світлопоглинання забарвлених розчинів, іноді називають “колориметричними”. Проте ця назва, що відноситься до оцінки кольорності, справедлива тільки для візуальних визначень за інтенсивністю забарвлення розчинів. Колориметричний аналіз використовується порівняно рідко; точність колориметричного аналізу 10%.

Фотоколориметричні методи, що використовують порівняно нескладну оптичну апаратуру, забезпечують гарну точність ($\pm 1...2\%$) та широко застосовуються у кількісному аналізі.

Чутливість методу становить 2мг/м³ при гранично допустимій концентрації оксидів азоту у повітрі робочої зони 5 мг/м³. Метод специфічний. Визначенню заважає сульфуру діоксид. Небажаний вплив ангідриду сульфитної кислоти усувається окисненням його за допомогою окиснювальної суміші у сульфур триоксид. З цією метою перед поглиначами з поглинальним розчином установлюють U-подібну скляну трубку, заповнену скляним порошком, просоченим окиснювальною сумішшю.

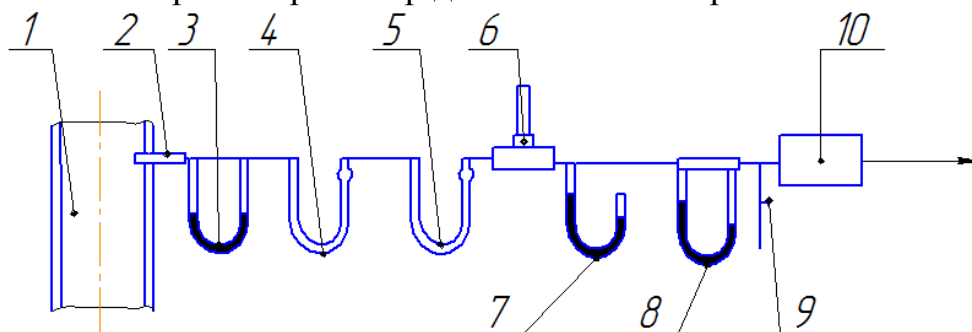
При відборі проб газову суміш пропускають спочатку через U-подібну трубку з окиснювальною сумішшю, де відбувається окиснення нітроген оксиду в діоксид, а потім через два поглиначі з губчастою перепонкою, які заповнено поглинальним розчином – розчином калій йодиду. Після закінчення пробовідбору розчини з поглиначів аналізують роздільно фотоколориметричним методом.

Схема та опис експериментальної установки

Схематично установка для відбору проб газової суміші з газопроводу показана на рисунку 6.3.

Газову суміш, що містить нітроген оксиди, відбирають з газопроводу 1 через газозбірну трубку 2 за допомогою електроаспіратора 10. Газова суміш проходить через U-подібну трубку, заповнену окиснювальною сумішшю (твердим сорбентом, просоченим окиснювальною сумішшю). Потім газ

поступає у два послідовно встановлених поглиначі з губчатими перепонкам 4 та 5, заповнених строго визначеним об'ємом поглинального розчину – розчину калій йодиду, де й відбувається взаємодія нітроген діоксиду з поглинальним розчином. Витрату газової суміші, що пропускається через поглиначі, заміряють реометром 8. Об'ємну швидкість газу слід підтримувати рівною 0,3л/хв. Температуру та тиск газової суміші в умовах експерименту визначають за допомогою термометра 6 та рідинного манометра 7.



1 – газопровід; 2 – газозабірна трубка; 3 – трубка з окиснювальною сумішшю; 4,5 – поглиначі з пористою перегородкою; 6 – термометр; 7 – рідинний манометр; 8 – реометр; 9 – кран; 10 – електроаспіратор

Рисунок 6.3 – Схема експериментальної установки для визначення вмісту нітроген оксидів у промислових газах.

Хід роботи

Необхідні розчини:

Калій йодид KJ, 8%-ний розчин.

Натрій тіосульфат $Na_2S_2O_3 \cdot 7H_2O$, 0,01N розчин.

Енантова кислота CH_3COOH , 10%-ний розчин.

Реактив Грісса:

1) 0,5 г сульфанілової кислоти (х.ч.) розчиняють у 150 мл енантової кислоти;

2) 0,1 г α – нафтиламіна (х.ч.) розчиняють у колбі в 20 мл води та розчин нагрівають на киплячій водяній бані до утворення на дні колби лілової краплі, розчин декантують та розводять енантовою кислотою до 150 мл (краплю залишити).

3) розчини зберігають в склянках з пришліфованими пробками. Перед вживанням обидва розчини змішують у відношенні 1:1.

Стандартний розчин: 0,015 г натрій нітриту (х.ч.) розчиняють у мірній колбі на 100 мл водою. 1 мл розчину містить 0,1 мг NO_2 . Розчин зберігається протягом 6 міс. Розведенням розчину *KJ* готують розчини, еквівалентні вмісту NO_2 0,01 та 0,001 мг/мл. Розчини зберігаються протягом місяця.

Окислювальна суміш: 3%-ний розчин калій діхромату $K_2Cr_2O_7$ у 2,5%-ному розчині сульфатної кислоти.

Скляний порошок просочують окислювальною сумішшю. Абсорбентом заповнюють U-подібну скляну трубку. У кінці трубки вводять тампони з вати. Опір трубки має бути не менше 1,8 кПа. Трубка може використовуватись в роботі протягом 5...6 годин.

Відбір проб газу. Газову суміш, що відбирається з газопроводу, пропускають з об'ємною швидкістю 0,3 л/хв через два послідовно з'єднаних поглиначі, що містять по 10 мл розчину калій йодиду. Об'єм відібраної проби має бути 1...2 л. Тривалість пробовідбору фіксують за допомогою секундоміра. Заміряють та записують температуру та тиск газової суміші в умовах експерименту, а також барометричний тиск.

Проведення аналізу

Вміст поглинальних посудин аналізують роздільно. Відбирають по 5 мл розчину, що досліджується, в колориметричні пробірки та додають при струшуванні по 1 мл реактиву Грісса. Через 20 хв після внесення реактиву, безпосередньо перед колориметрируванням, у пробірки вносять по 0,5 мл 0,01N розчину натрій сульфїту і добре перемішують. Одночасно готують стандартну шкалу (таблиця 6.1).

Порівнюють інтенсивність забарвлення проб зі стандартною шкалою або виміряють оптичну густину відповідних розчинів на фотоколориметрі при довжині хвилі 520 нм у кюветі з товщиною шару 1 см у порівнянні з поглинальним розчином. В останньому випадку заздалегідь будують калібровочний графік, що характеризує залежність оптичної густини забарвленого розчину від вмісту нітроген діоксиду.

Таблиця 6.1 – Стандартна шкала

Реактив	Номер стандарту							
	0	1	2	3	4	5	6	7
Стандартний розчин, який вміщує 0,001 мг/мл NO_2 , мл	0	0,3	0,5	-	-	-	-	-
Стандартний розчин, який вміщує 0,01 мг/мл NO_2 , мл				0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Розчин KJ , мл	5	4,7	4,5	4,9	4,8	4,7	4,6	4,5
Розчин Грісса	У всі пробірки по 1 мл							
Розчин Na_2SO_3	У всі пробірки по 0,5 мл							
Вміст NO_2 , мкг	0	0,3	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0

Обробка результатів експерименту

Розраховують об'єм газової суміші, пропущений через поглинальні посудини, л:

$$V = Qr, \quad (6.7)$$

де Q – об'ємна витрата газової суміші, л/хв;
 r – тривалість відбору проб газу, хв.

Об'єм газової суміші, пропущений через поглиначі, приводять до нормальних умов, л:

$$V_0 = V \cdot \frac{273 \cdot (B \pm P_r)}{(273 + t_r) \cdot P_0}, \quad (6.8)$$

де t_r – температура газової суміші, °С;
 B – барометричний тиск, кПа;
 P_r – тиск газової суміші, кПа;
 P_0 – атмосферний тиск при нормальних фізичних умовах;
 P_0 – 101,3 кПа.

Концентрацію нітроген оксидів в газовій суміші розраховують за формулою, мг/м³:

$$C_{NO_2} = \frac{a \cdot b \cdot 1,17}{c \cdot V_0}, \quad (6.9)$$

де a – загальний об'єм розчину, що аналізується, мл;
 c – об'єм розчину, що аналізується, взятий для аналізу, мл;
 b – кількість нітроген діоксиду, знайдена в об'ємі, що аналізується, мкг;
 1,17 – коефіцієнт перерахунку з NO_2 на N_2O_5 .

Результати аналізу розчинів, відібраних з двох поглиначів, сумуються.

Контрольні питання

- 1 Опишіть установку для відбору проб газу. Поясніть принцип її роботи.
- 2 Поясніть суть фотоколориметричного визначення вмісту нітроген оксидів у газовій суміші.
- 3 Яким чином аналізують вміст поглиначів після відбору газової проби?
- 4 Як будують калібровочний графік?
- 5 Як проводять обробку результатів експерименту?

Зміст звіту до лабораторної роботи

- Мета роботи.
- Письмові відповіді на контрольні запитання.
- Привести формули математичної обробки результатів експерименту та розрахунок.
- Висновки.

6.4 Лабораторна робота № 4. Визначення дисперсного складу пилу ситовим способом

Мета роботи: Вивчити та засвоїти методику ситового аналізу промислового пилу

Загальні відомості

Ситовий аналіз відноситься до механічних методів визначення дисперсного складу пилу та заснований на просіванні проби пилу крізь сита з отворами різних розмірів. Просіваючи пробу крізь ряд сит з дедалі меншими розмірами отворів та зважуючи залишки пилу на кожному ситі, отримують уявлення про розподіл даної проби пилу по фракціям чи класам зернистості. Після самого дрібного сита встановлюють суцільне дно, на якому збирається найбільш тонка фракція пилу. Для ситового аналізу беруть наважку пилу 50 або 100 г.

Так як розмір отвору самого дрібного сита 50 мкм, ситовий аналіз застосовується лише для пилу, основна кількість частинок якого має розмір більший за 50 мкм.

При проведенні ситового аналізу слід враховувати, що дрібні частинки пилу (менші 10...20 мкм) у процесі просівання можуть злипатись у великі, достатньо міцні агломерати, що приводить до помилок при визначенні дисперсного складу пилу. Тому, коли пил вміщує значну кількість тонких фракцій (менш 20 мкм), ситовий аналіз застосовувати не слід.

Для попередньої оцінки дисперсності пилу доцільно провести мікроскопічний аналіз. Для аналізу тонких фракцій пилу, що лежать у “підситовій” області, тобто фракцій, розміри частинок яких менші 50 мкм, застосовують інші методи, наприклад, седиментометричні.

Схема і опис експериментальної установки

Для визначення дисперсного складу крупнозернистого промислового пилу застосовують прилад “Ротап” (рисунок 6.4). Подібні установки застосовуються в заводських лабораторіях, наприклад, у лабораторіях ливарних цехів.

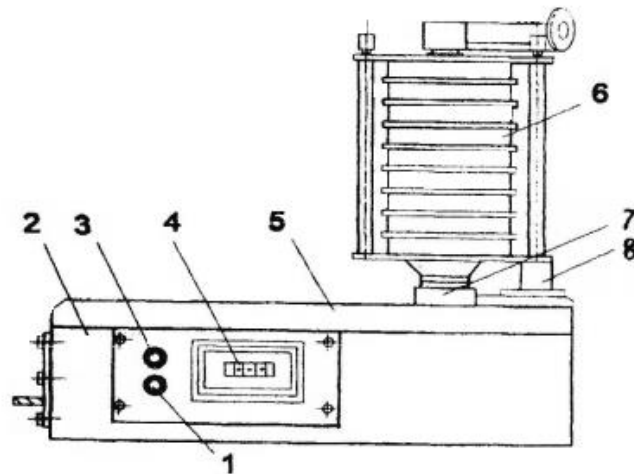
Основними частинами установки є станина 2 з кришкою 5, столик 7 з комплектом сит 6, куліса 8 та реле часу 4.

Монтаж вузлів установки виконується на станині коробчатої форми, кришка якої є частиною, що несе всі передавальні механізми. Столик з ситами приводиться до зворотно-поступального руху за допомогою ексцентрикового валу та куліси. Остання перетворює обертовий рух ексцентрикового валу в зворотно-поступальний рух куліси та передає його столику.

Увімкнення установки здійснюється кнопкою “пуск” 3. При цьому напруга подається на магнітний пускач та реле часу. По закінченні певного проміжку часу реле спрацьовує і магнітний пускач знеструмується.

Екстремне відключення лабораторної установки робиться кнопкою “стоп” 1, що розриває ланцюг живлення магнітного пускача.

До комплекту сит даної установки входять 11 сит з отворами різного розміру, суцільне дно і кришка. Сита являють собою циліндричні обичайки, закриті в нижній частині сітками. Сита стандартизовані. Характеристика комплекту сит установки “Ротап” наведена у таблиці 6.2



1 – кнопка екстреного відключення; 2 – станина; 3 – пускова кнопка;
4 – реле часу; 5 – кришка; 6 – комплект сит; 7 – столик; 8 – куліса

Рисунок 6.4 – Лабораторна установка “Ротап” для визначення дисперсного складу пилу

Таблиця 6.2 – Технічна характеристика приладу “Ротап”

Число сит, шт	11
Розмір отворів сит, мм	2,5; 1,6; 1,0; 0,63; 0,40; 0,315; 0,20; 0,16; 0,10; 0,063; 0,05
Діаметр обичайки сит, мм	200
Споживача потужність, Вт	50
Маса приладу, кг	90

Хід роботи

При просіюванні на ситах діаметром обичайки 200 мм рекомендується брати пробу об’ємом 50...100 см. Пробу пилу зважують на аналітичних терезах з точністю до 0,01 г. Наважку пилу кладуть на верхню сітку комплекту сит. Під нижнє сито встановлюють суцільне дно, верхнє сито закривають кришкою.

Зібрані стовпчиком сита з поміщеною в них наважкою пилу становлять на столик установки, накривають верхньою кришкою з пазами і закріплюють гайками.

Натиском кнопки “пуск” вмикають установку.

Просівання продовжують протягом 15 хв. Після автоматичного вимкнення установки сита звільняють і знімають зі столика. Залишки пилу на ситах і суцільному дні висипають окремо на глянцеий папір, ретельно очищаючи при цьому дно та стінки сит м’яким пензликом. Кожен із залишків зважують на аналітичних терезах з точністю до 0,01г.

Обробка результатів експерименту

Сумарна маса всіх фракцій не повинна відрізнятись від маси вхідної наважки більш ніж на 2%.

При обробці результатів експерименту сумарну масу всіх фракцій приймають за 100%. Процентний вміст кожної фракції визначають із співвідношення, % (по масі):

$$C_1 = \left(\frac{\Delta m_1}{\sum_1^{12} m_1} \right) \cdot 100, \quad (6.10)$$

де Δm_1 – маса залишку пилу на і-тому ситі або на суцільному дні, г.

За остаточний результат приймають середнє арифметичне двох паралельних визначень. При цьому розходження між результатами двох паралельних визначень, по відповідним фракціям, не повинно перевищувати 1% від маси вхідної наважки пилу.

Приклад розрахунку

Для визначення дисперсного складу кварцового піску беремо наважку масою 50г. Фракційний склад зерен піску розрахований за масою залишків на відповідних ситах і суцільному дні наданий в таблиці 6.3.

Таблиця 6.3 – Дисперсний склад кварцового піску

Розмір комірки сита, мм	Розмір частинок фракції, мкм	Маса залишку на ситі, г	Вміст фракції % (по масі)
2,5	>2500	—	—
1,6	2500-1600	—	—
1,0	1600-1000	—	—
0,63	1000-630	0,02	0,04
0,4	630-400	2,05	4,10
0,315	400-315	10,02	20,12
0,2	315-200	11,59	23,26
0,16	200-160	25,02	50,20
0,1	160-100	1,10	2,20
0,63	100-63	0,04	0,08
0,05	63-50	—	—
Суцільне дно	<50	—	—
Всього		49,84	100

У випадку необхідності середній розмір частинок окремих фракцій може бути визначений за допомогою приладу Товарова.

Контрольні питання

1 У чому полягає сутність аналізу дисперсного складу пилу ситовим методом?

2 Прилад лабораторної установки для визначення дисперсного складу пилу ситовим методом.

3 Як проводиться обробка результатів експерименту?

4.Який пил підлягає аналізу ситовим методом?

РОЗДІЛ 7 ПРАКТИЧНІ РОБОТИ

7.1 Обчислення похибки вимірювань

Завдання 1

Обчислити середню та середньоквадратичну похибку вимірювання запиленості газового потоку, а також записати результати вимірювання з урахуванням довірчого інтервалу при довірчій вірогідності 68,3% і 95,0% [4]:

- 1) визначити середнє арифметичне \bar{x} ;
- 2) визначити середню квадратичну похибку S ;
- 3) в залежності від кількості вимірювань n визначити $\frac{t}{\sqrt{n}}$;
- 4) визначити довірчий інтервал $\frac{t}{\sqrt{n}} \times S$;
- 5) визначити верхню межу результату вимірювань з урахуванням довірчого інтервалу $\bar{x} + \frac{t}{\sqrt{n}}$;

№ варіанту	Результати вимірювань, мг/м ³
1	5000,5100,5098,5041,5076,4993,4895,4906,5228,4870
2	1500,1120,1235,1344,1473,1210,1294,1288,1382,1127
3	100,101,95,80,77,82,93,90,97,94,95,88,103,102,96,98,104,94
4	70,77,69,81,83,79,74,82,72,67,84,73,75,80,76,69,68,78,84
5	2001,2345,2662,1890,2243,1978,1925,2155,1986,1922
6	1789,1802,1744,1867,1894,1755,1792,1803,1794,1826
7	1123,1096,1254,1178,1217,1198,1276,1203,1258,1194
8	789,801,756,723,799,823,844,785,769,826,768,770,814,832,765
9	3346,3678,3126,3900,3876,3765,3210,3688,3570,3289
10	56,60,64,67,58,61,66,64,63,57,62,65,68,69,59,58,72,51,53
11	1678,1600,1645,1599,1590,1612,1625,1674,1645,1580
12	1455,1490,1382,1400,1437,1478,1435,1488,1402,1432

- б) визначити нижню межу результату вимірювань з урахуванням довірчого інтервалу $\bar{x} - \frac{t}{\sqrt{n}}$

Завдання 2

Обчислити абсолютну похибку приладу для вимірювання запиленості газу, взявши \bar{x} із завдання 1 [4].

№ варіанту	Клас точності приладу	Максимальне значення шкали приладу, мг/м ³
1	0,5	1000
2	1,0	2000
3	1,10	3000
4	1,25	4000
5	1,20	5000
6	1,30	1500
7	1,40	2500
8	1,35	3500
9	1,45	4000
10	1,50	6000
11	1,15	5500
12	1,5	4500

Завдання 3

Визначити найбільші абсолютні та відносні похибки результату вимірювання напруги двома вольтметрами класів точності 0,5 та 2,5 з однаковою верхньою границею вимірювання 150 В, якщо кожен з приладів вимірює напругу 120 В [6].

Завдання 4

Якій клас точності повинен мати магнітоелектричний міліамперметр з кінцевим значенням шкали 5 мА для вимірювання струму (1 ... 5) мА з відносною похибкою не більш як 1 % ? [6].

Завдання 5

Визначити найбільші абсолютну, та відносну похибки вимірювання струму 10 мА електромагнітним міліамперметром класу 1,0 на трьох границях вимірювання: 10, 20, 30 мА [6].

Завдання 6

В установці необхідно виміряти струм, значення якого приблизно дорівнює 9 А. Є три амперметри з границями вимірювання 10, 15 та 20 А і класами точності відповідно 2,5; 1,5; 1,0. З'ясувати, який з амперметрів забезпечить найбільшу точність вимірювання [6].

Завдання 7

Амперметр класу точності 1,5 має верхню границю вимірювання 5 А. Визначити найбільшу припустиму абсолютну похибку приладу і відносну похибку вимірювання у разі відліку за цим приладом 0,5; 2; 4 та 5 А [6].

Завдання 8

Проведено вимірювання за допомогою вольтметра з U_k , клас точності c/d отримано показ U . Вимірювання здійснено при температурі навколишнього середовища Θ , магнітному полі напруженістю $H=300$ А/м, напруга живлення приладу $U_{ж}$. Температурна похибка не перевищує основну на кожних 10 °С

відхилення температури від нормальної області (20 ± 2) °С, магнітна – половини від основної при напруженості зовнішнього поля до 400 А/м, при відхиленні напруги живлення за межі $220 \text{ В} \pm 4\%$ до значень від 187 до 240 В додаткова похибка не перевищує половини основної. Записати результат вимірювання. Значення U_k ; c/d ; U ; Θ ; $U_{ж}$ дивись в таблиці відповідно до варіанта [7].

Варіант	U_k , В	c/d	U , В	Θ , °С	$U_{ж}$, В
1	500	0,3/0,02	220,4	4	203
2	1000	0,1/0,01	500,6	3	204
3	800	0,2/0,02	300,8	4	202
4	100	0,1/0,05	50,6	6	204
5	650	0,2/0,03	300,5	5	202
6	250	0,1/0,03	200,6	7	203
7	630	0,3/0,03	400,6	5	201
8	700	0,1/0,02	500,1	6	202
9	800	0,3/0,02	400,3	4	205
10	500	0,5/0,03	200,2	5	204

Завдання 9

Вивести вирази абсолютної та відносної похибок опосередкованого вимірювання величини $y=f(X_1, X_2, X_3)$. Записати вирази похибок при заданих значення X_1, X_2, X_3 (вихідні дані надає викладач) відповідно до варіанта [7].

7.2 Розрахунок діафрагми і витрати газів та води

Завдання 10

Визначити годинну кількість вентиляційних газів за допомогою плоскої сталевий діафрагми. Розрідження у газопроводі 60 мм вод.ст. Склад вентиляційних газів практично не відрізняється від складу атмосферного повітря [4].

Варіант	V , мм рт.ст.	t_r , °С	D газопроводу, см	d діафрагми, мм
1	745	50	100	56
2	750	54	200	124
3	755	56	300	223
4	745	54	400	378
5	745	56	500	403
6	745	50	600	324
7	750	54	700	433
8	755	56	800	599
9	745	54	900	677
10	760	100	1000	794
11	750	120	1100	741
12	745	56	1200	690

Завдання 11

Визначити масову витрату води, яка тече по трубопроводу, в якому встановлено діафрагму. Вихідні дані з характеристиками системи виміру витрати і результати вимірювань наведені у таблиці.

Найменування параметри, одиниці виміру	Позначення	Величина
Діаметр трубопроводу при 20 °С, мм	D_{20}	150
Діаметр отвору діафрагми при 20 °С, мм	d_{20}	100
Тиск води попереду діафрагми (абсолютний), МПа	p	1,6
Температура води, °С	t	45
Перепад тиску на діафрагмі, кПа	Δp	24
Тип діафрагми		З трьохрадіусним відбором
Матеріал трубопроводу		Сталь 30
Стан внутрішньої поверхні трубопроводу		Новий
Міжповітряний інтервал діафрагми, рік	$r_{п.п}$	2
Матеріал діафрагми		20Х23Н13
Місцевий опір попереду діафрагми		Засувка
Довжина прямолінійної ділянки трубопроводу попереду діафрагми, м	l_1	2,0
Зміщення осі діафрагми відносно осі трубопроводу, мм	e_x	1,1
Товщина диску діафрагми, мм	E_d	5,0
Висота уступу на ділянці трубопроводу попереду діафрагми (складений трубопровід), мм	h	3

Завдання 12

Визначити витрату доменного газу, який протікає по трубопроводу з встановленою діафрагмою. Вихідні дані з характеристикою системи наведені в таблиці.

Найменування параметри, одиниці виміру	Позначення	Величина
1	2	3
Хімічний склад доменного газу	$CO -29\%$; $CO_2 -10\%$; $H_2 - 0,5\%$; $CH_4 - 0,9\%$; $N_2 - ост.$	
Діаметр трубопроводу при 20 °С, мм	D_{20}	450
Діаметр отвору діафрагми при 20 °С, мм	d_{20}	250
Тиск газу попереду діафрагми (абсолютний), кПа	p	98,6
Температура газу, °С	t	100
Перепад тиску на діафрагмі, кПа	Δp	200
Тип діафрагми		З трьохрадіусним відбором

1	2	3
Матеріал трубопроводу		Сталь 30
Стан внутрішньої поверхні трубопроводу		Новий
Міжповірочний інтервал діафрагми, рік	$r_{п.п}$	3
Матеріал діафрагми		36X18H25C2
Місцевий опір попереду діафрагми		Засувка
Довжина прямолінійної ділянки трубопроводу попереду діафрагми, м	l_1	9,5
Зміщення осі діафрагми відносно осі трубопроводу, мм	e_x	3,0
Товщина диску діафрагми, мм	Ед	6,0
Висота уступу на ділянці трубопроводу попереду діафрагми (складений трубопровід), мм	h	3

7.3 Вибір закону регулювання і налаштування регулятора

Завдання 13

Вибрати закон регулювання та налаштування регулятора стабілізації температури у томильній зоні нагрівальної печі. Максимальне значення за навантаженням на регулятор складає $u_b=25\%$.

№ варіанту	Динамічні параметри об'єкта регулювання			Показники якості регулювання			
	τ, c	T, c	$K_{об.}$	X_1	σ	$X_2/X_1, \%$	t_p, c
1	40	200	2,8	20	10	20	500
2	20	150	2,0	15	9	19	400
3	50	100	1,0	10	8	18	300
4	30	180	2,2	12	7	17	200
5	25	220	2,3	25	6	16	450
6	45	250	2,4	30	5	15	350
7	50	230	2,5	35	12	14	600
8	60	325	2,6	40	15	22	550
9	35	365	2,7	45	18	25	650
10	55	270	3,0	18	17	26	420

7.4 Визначення динамічних параметрів об'єкта регулювання за кривою розгону

Завдання 14

За кривою розгону, яка характеризує об'єкт регулювання, графічними побудовами і розрахунком визначити динамічні параметри об'єкта. Дати

загальну характеристику умов регулювання процесу. Збурення на вході об'єкта складає 1% вхідної величини.

Крива розгону – це крива, що описує зміну в часі вихідної величини в перехідному процесі, викликаному стрибкоподібним збуренням вхідної величини об'єкта регулювання.

Динамічні параметри:

- 1) час затримки τ ;
- 2) постійна часу T ;
- 3) коефіцієнт передачі $k_{об}$;
- 4) відношення τ/T – визначає тип регулятора.

Для статичних об'єктів: $k_{об} = (x_{\infty} - x_0) / \Delta x_{вх}$,

x_{∞} – значення вихідної величини в початковому сталому стані;

x_0 – значення вихідної величини в кінцевому сталому стані

$\Delta x_{вх}$ – величина внесеного збурення (за умовою, збурення на вході об'єкта складає 1% вхідної величини).

Для астатичних об'єктів:

$$k_{об} = x_{\infty} / \Delta x_{вх}, \quad (7.1)$$

де $k_{об} = 1/T$;

T – тангенс кута нахилу дотичної до осі абсцис

Якщо на статичному об'єкті в доду дослідження не було досягнуто нового сталого стану і зареєстрована лише початкова частина кривої розгону, то вона може бути екстрапольована. З цією метою на кривій вибирають дві точки і для однакових відрізків часу Δt визначають відповідні відрізки Δx_1 і Δx_2 . Через точки C і C' проводять пряму AB до перетину з EE' . Відрізок BE нове стале значення вихідної величини об'єкта регулювання, що дозволяє знайти затримку, постійну часу і коефіцієнт передачі.

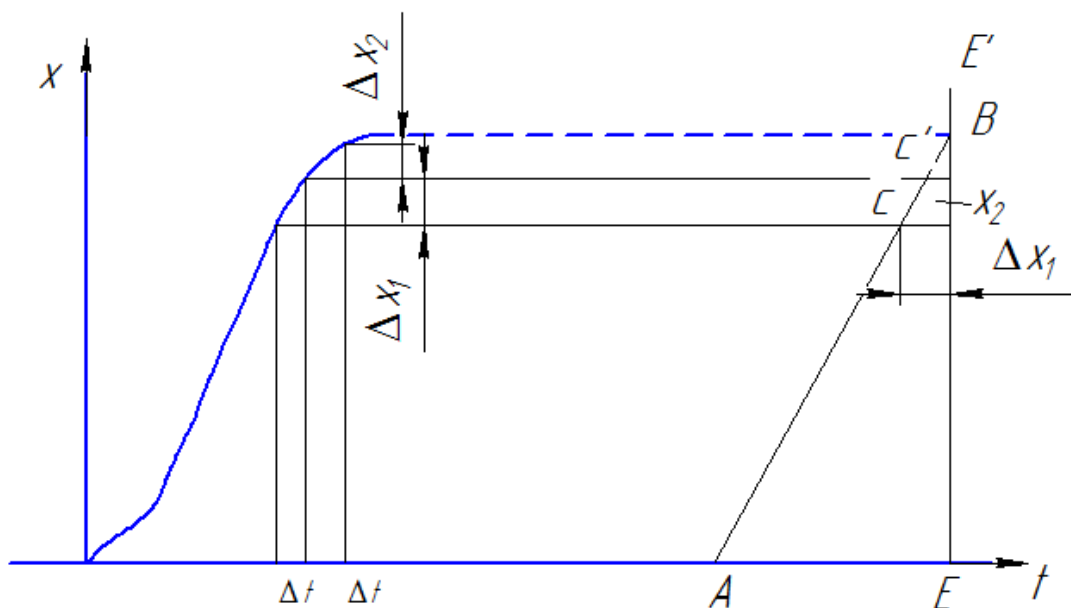


Рисунок 7.1 – Екстраполяція кривої розгону

7.5 Розрахунок гравітаційного осадження часток пилу

Осідання частинок у навколишньому середовищі відбувається за законами падіння тіл у середовищі, що чинить опір їхньому рухові. Частинки, що осідають, на початковому відрізку (на вході в апарат) рухаються прискорено, але через деякий проміжок часу, коли відбудеться врівноважування діючих сил, швидкість осідання набуває сталої величини і отримала назву швидкості рівномірного (автомодельного) осідання.

При вільному гравітаційному осіданні одиночної сферичної частинки в нерухомій рідині зі сталою швидкістю на частинку діють три види сил:

- сила тяжіння (гравітаційна), яка дорівнює вазі частинки;
- сила піднімальна (Архімедова) - виштовхувальна сила середовища, що дорівнює вазі рідини, витиснутої частинкою;
- сила опору середовища, що виявляє свій вплив при русі частинки в потоці.

Завдання 15

Дисперсний склад крупного агломераційного пилу визначено методом повітряної сепарації за наступними фракціями: 0-9; 9-18; 18-38; 38-58; більше ніж 58 мкм.

Розрахунком визначити умови сепарації мартенівського пилу, якщо діаметр труби сепаратору 230 и 115 мм, щільність часток пилу 3400 кг/м^3 , густина повітря $1,250 \text{ кг/м}^3$, динамічний коефіцієнт в'язкості повітря $18 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$. Мінімальна витрата повітря крізь трубку сепаратору 1,5 л/хв.

Завдання 16

Дисперсний склад тонкого мартенівського пилу визначено методом повітряної сепарації за наступними фракціями: 0-1; 1-2,5; 2,5-6; 6-15; 15-22; 22-50, більше ніж 50 мкм.

Розрахунком визначити умови сепарації мартенівського пилу, якщо діаметр труби сепаратору 230 и 115 мм, щільність часток пилу 4100 кг/м^3 , густина повітря $1,380 \text{ кг/м}^3$, динамічний коефіцієнт в'язкості повітря $18 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$. Мінімальна витрата повітря крізь трубку сепаратору 1,5 л/хв.

Завдання 17

Дисперсний склад мартенівського пилу визначено методом повітряної сепарації за наступними фракціями: 0-0,5; 0,5-1; 1-2; 2-5; 5-10; 10-40 більше ніж 40 мкм.

Розрахунком визначити умови сепарації мартенівського пилу, якщо діаметр труби сепаратору 140 и 58 мм, щільність часток пилу 4000 кг/м^3 , густина повітря $1,180 \text{ кг/м}^3$, динамічний коефіцієнт в'язкості повітря $18 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$. Мінімальна витрата повітря крізь трубку сепаратору 1,5 л/хв.

Завдання 18

Дисперсний склад пилу, що міститься у газах електросталеплавильного виробництва, визначено методом повітряної сепарації за наступними фракціями: 0-0,7; 0,7-7; 7-80; більше ніж 80 мкм.

Розрахунком визначити умови сепарації мартенівського пилу, якщо діаметр труби сепаратору 230 и 58 мм, щільність часток пилу 3720 кг/м^3 , густина повітря $0,998 \text{ кг/м}^3$, динамічний коефіцієнт в'язкості повітря $18 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$. Мінімальна витрата повітря крізь трубку сепаратору 1,5 л/хв.

Завдання 19

Дисперсний склад пилу, що міститься у газах конвертерного виробництва, визначено методом повітряної сепарації за наступними фракціями: 0-2,5; 2,5-4; 4-6,3; 6,3-10; 10-16; 16-25; 25-40 мкм.

Розрахунком визначити умови сепарації мартенівського пилу, якщо діаметр труби сепаратору 140 и 115 мм, щільність часток пилу 3500 кг/м^3 , густина повітря $1,237 \text{ кг/м}^3$, динамічний коефіцієнт в'язкості повітря $18 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$. Мінімальна витрата повітря крізь трубку сепаратору 1,5 л/хв.

Завдання 20

Дисперсний склад пилу, що міститься у газах конвертерного виробництва визначено методом повітряної сепарації за наступними фракціями: 0-5; 5-10; 10-25; 25-50; 50-70.

Розрахунком визначити умови сепарації мартенівського пилу, якщо діаметр труби сепаратору 140 и 230 мм, щільність часток пилу 3630 кг/м^3 , густина повітря $1,117 \text{ кг/м}^3$, динамічний коефіцієнт в'язкості повітря $18 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$. Мінімальна витрата повітря крізь трубку сепаратору 1,5 л/хв.

РОЗДІЛ 8 САМОСТІЙНА РОБОТА

Під час самостійної роботи студенти проводять опрацювання теоретичного матеріалу, який було надано на лекційних заняттях. Для самостійного контролю рівня своїх знань студентам рекомендується відповісти на наступні питання:

1. Поясніть будову та принцип дії об'ємних хімічних газовизначників.
2. Принцип роботи та призначення фізичних газо визначників.
3. Переваги, принцип дії та застосування фізико-хімічних газо визначників – хроматографії.
4. Поясніть принцип дії приладів для вимірювання температури газів контактним способом (термометри розширення, манометричні термометри, термоелектричні перетворювачі опору, термопари).
5. Які переваги термопар у порівнянні з термометрами опору?
6. Поясніть будову та принцип дії рідинних приладів для вимірювання статичного тиску газів.
7. Поясніть вимірювання швидкості газового потоку пневмотрубками НДІОГазу і Прандтля.
8. Устаткування та принцип дії реометрів та ротаметрів.
9. Поясніть вимірювання витрати газів за допомогою плоскої діафрагми.
10. Поясніть класифікацію методів вивчення дисперсного складу пилу.
11. Назвіть механічні методи вивчення дисперсного складу пилу (ситовий аналіз та ін.).
12. Седиментометричні методи вивчення дисперсного складу пилу (метод відбору вагових проб та ін.).
13. Гідродинамічні методи вивчення дисперсного складу пилу (повітряна сепарація та ін.).
14. Поясніть принцип дії поплавкових та букових рівнемірів.
15. Принцип дії акустичних рівнемірів. Переваги цих приладів.
16. Поясніть принцип дії ємкісних рівнемірів, їх переваги та межі застосування.
17. Радіаційні рівнеміри. Їх переваги та межі застосування.
18. Як виконується замірювання запиленості промислових газів?
19. Поясніть терміни «метод зовнішньої» та «метод внутрішньої» фільтрації. Які межі застосування цих методів?
20. Як слід розуміти термін «об'єкт регулювання», «вхідні та вихідні величини об'єкту регулювання»?
21. Поясніть терміни «замкнута система автоматизованого регулювання» та «розімкнута система автоматизованого регулювання».
22. Показники якості регулювання (максимальне динамічне відхилення, перерегулювання, час регулювання).
23. Поясніть типові процеси регулювання (аперіодичний; з 20%-ним перерегулюванням; з мінімальною квадратичною площею відхилення).

24. Вибір та розрахунок регулятора для системи автоматизованого регулювання.

25. Вибір та розрахунок регулюючого органу для системи автоматизованого регулювання.

26. Вибір вимірювального обладнання для САР за його динамічною характеристикою.

27. Розробка системи автоматизованого контролю або регулювання температури газів (САК) для газоочисної установки

28. Розробка системи автоматизованого контролю тиску промислових газів (САК) у даному розрізі пилогазового потоку.

29. Розробка системи автоматизованого контролю або регулювання витрати промислових газів (САК) у даному розрізі пило газового потоку.

30. Розробка системи автоматизованого контролю (САК) рівня пилу чи рідини у бункері пиловловлювача.

31. Розробка системи автоматизованого регулювання (САР) рівня пилу чи рідини в бункері пиловловлювача.

32. Розробка системи контролю (САК) запиленості промислових газів до, перед та після пиловловлювача.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Гордон Г.М., Пейсахов И.Л. Контроль пылеулавливающих установок: учебное пособие для студентов вузов. Москва : Металлургия, 1983. 354с.
2. Демків Т.М., Конопельник О.І., Шопа, Я.І. Основи теорії похибок фізичних величин : методичні матеріали для загального фізичного практикуму. Львів: видавничий центр ЛНУ ім. І. Франка, 2008. 70 с.
3. Антоненко С.С., Колісніченко Е.В. Контроль та вимірювання параметрів рідин і газів: конспект лекцій з навчальної дисципліни. Суми : вид-во СумДУ, 2009. 199 с.
4. Кожемякін Г.Б., Ткаліч І.О. Контроль і автоматизація очисних споруд: навч.-метод. посібник для студ. ЗДІА напрямку 6.040106 "Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування". Запоріжжя : ЗДІА, 2015. 118 с.
5. Єрмілова Н.В. Основи метрології та електричних вимірювань: методичні вказівки і контрольні завдання з курсу для студентів спеціальності 7.092203 "Електромеханічні системи автоматизації та електропривод" денної та заочної форм навчання. Полтава : ПолтНТУ, 2007. 51с.
6. Лавренова Д.Л., Хлистов В.М. Основи метрології та електричних вимірювань: навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ», 2016. 123 с
7. Павленко Ю.П., Билюшов В.М., Овсяник В.Д. Лабораторный практикум по улавливанию и утилизации пылей и газов: учебное пособие для вузов. Москва : Металлургия, 1996. – 189с.
8. Глебов Ю.Д. Контроль и автоматическое управление газоочистными установками : учебное пособие для вузов. Москва : Металлургия, 1982. 208с.
9. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. Ленинград : Химия, 1987. 264с.
10. Промышленные приборы и средства автоматизации / под ред. В.В. Черенкова. Ленинград: Машиностроение, 1987. 847с.
11. Климовицкий М.Д., Копелович А.П. Автоматический контроль и регулирование в черной металлургии: справочник. Москва : Металлургия, 1987. 787с.

ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кожемякін Г.Б., Белоконь К.В. Теоретичні основи та техніка захисту повітряного басейну : метод. вказівки до виконання курсового проекту та лабораторних робіт для студ. ЗДІА напряму 6.040106 "Екологія, охорона навкол. середовища та збалансоване природокористування". Запоріжжя : ЗДІА, 2011. 115 с.
2. Бекетов В.Е., Євтухова Г.П., Коваленко Ю.Л. : конспект лекцій з розділу «Методи і прилади контролю концентрацій пило газових домішок в атмосфері і в промислових викидах» дисципліни «Методи і прилади контролю стану атмосферного повітря». Харків : ХНАМГ, 2011. 40 с.
3. Малишева, І.В. Контроль і автоматизація очисних споруд : метод. вказівки до виконання контрольної роботи для студ. ЗДІА спец. 6.040106 "Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування" ден. форми навчання. Запоріжжя : ЗДІА, 2011. 31 с.
4. Зінченко, В.Ю., Овчинникова І.А. Метрологія, технологічні вимірювання і прилади. Ч. 1 : навч.-метод. посібник для студ. ЗДІА спец. 7.092501 "АУТП". Запоріжжя : ЗДІА, 2011. 158 с.
5. Зінченко, В.Ю., Овчинникова І.А. Метрологія, технологічні вимірювання і прилади : навч.-метод. посібник для студентів ЗДІА спец. 7.092501 "АУТП". Запоріжжя : ЗДІА, 2012. 160 с.
6. Зінченко, Ю.М. Автоматизація технологічних процесів: конспект лекцій для студ. ЗДІА спец. 6.092501 "АУТП". Запоріжжя : ЗДІА, 2007. 80 с.
7. ДСТУ 3008-2015. Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. [Чинний від 2015-06-22]. Київ, 2016. 26 с. (Національний стандарт України).
8. ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. [Уведено вперше; чинний від 2016-07-01]. Київ, 2016. 17 с. (Інформація та документація).
9. Кожемякін Г.Б., Новокщона О.В, Манідіна Є.А. Проектування промислових очисних споруд : навч.-метод. посібник для студ. напряму 6.040601 "Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування". Запоріжжя : ЗДІА, 2012. 71 с.
10. Кожемякін Г.Б. Технологія обробки газів металургійних виробництв : методичні вказівки до практичних занять. Ч. 1. Очищення газів підприємств чорної металургії. Запоріжжя : ЗДІА, 2004. 41 с.
11. Мнухін А.Г., Мнухіна Н.О., Матяшева О.Б. Системи контролю небезпечних та шкідливих виробничих факторів : навч.-метод. посібник для студентів ЗДІА напряму 6.170202 "Охорона праці" спеціальності 263 "Цивільна безпека" всіх форм навчання. Запоріжжя : ЗДІА, 2017. 217 с.

Навчально-методичне видання
(українською мовою)

Манідіна Євгенія Анатоліївна

КОНТРОЛЬ І АВТОМАТИЗАЦІЯ ОЧИСНИХ СПОРУД

Навчально-методичний посібник

для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра
спеціальності “Технології захисту навколишнього середовища”
освітньо-професійної програми “Технології захисту навколишнього
середовища”

Рецензенти: *В.В. Осипенко, О.Г. Добровольська*
Відповідальний за випуск *Г.Б. Кожемякін*
Коректор *Є.А. Манідіна*