

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

# ТЕХНОЛОГІЧНІ ВИМІРЮВАННЯ І ПРИЛАДИ ВИМІРЮВАННЯ РІВНЯ ТА ВИТРАТ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
як навчальний посібник для студентів,  
які навчаються за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-  
інтегровані технології»*

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2020

Технологічні вимірювання і прилади. Вимірювання рівня та витрат [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: С. Г. Бондаренко, Д. М. Складанний, А. О. Абрамова. – Електронні текстові данні (1 файл: 2 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 117 с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 10 від 18.06.2020 р.)  
за поданням Вченої ради хіміко-технологічного факультету (протокол № 4 від 25.05.2020 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

# ТЕХНОЛОГІЧНІ ВИМІРЮВАННЯ І ПРИЛАДИ

## ВИМІРЮВАННЯ РІВНЯ ТА ВИТРАТ

Укладачі: Бондаренко Сергій Григорович, канд. техн. наук, доцент  
Складанний Денис Миколайович, канд. техн. наук, доцент  
Абрамова Алла Олександрівна, канд. техн. наук, доцент

Відповідальний редактор: Бондаренко С. Г. канд. техн. наук, доцент.

Рецензенти: Толстопалова Наталія Михайлівна, канд. техн. наук, доцент,  
в.о. зав. кафедри ТНР, В та ЗХТ ХТФ КПІ ім. Ігоря Сікорського

Навчальний посібник розроблено відповідно до програми підготовки бакалаврів за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології».

У навчальному посібнику наведено основні дані про прилади для вимірювання рівня та витрат, чутливі елементи, схеми підключення приладів. Наведено конструкції основних приладів, описано принцип їх дії та особливості застосування.

Подана будова лабораторних стендів, що використовується для вимірювання рівня та витрат, наведені характеристики встановлених приладів, описано методика проведення лабораторних досліджень та оброблення їх результатів.

Видання забезпечує засвоєння студентами теоретичного матеріалу, підготовку до виконання лабораторних робіт та буде корисним для самостійної роботи.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020

## Зміст

<b>Передмова</b> .....	4
<b>Лабораторна робота № 5 Вимірювання рівня</b> .....	6
5.1 Основні теоретичні відомості.....	6
5.2 Опис лабораторних засобів та обладнання.....	33
5.3 Заходи безпеки під час виконання лабораторної роботи .....	35
5.4 Послідовність виконання роботи .....	35
5.5 Оброблення та аналізування результатів. Оформлення звіту.....	36
Контрольні запитання .....	36
<b>Лабораторна робота № 6 Вимірювання витрати</b> .....	38
6.1 Основні теоретичні відомості.....	38
6.2 Опис лабораторних засобів та обладнання.....	110
6.3 Заходи безпеки під час виконання лабораторної роботи .....	112
6.4 Послідовність виконання роботи .....	112
6.5 Оброблення та аналізування результатів. Оформлення звіту.....	114
Контрольні запитання .....	114
<b>Список рекомендованої літератури</b> .....	116
Основна література .....	116
Додаткова література. Вимірювання рівня.....	116
Додаткова література. Вимірювання витрат.....	116

## Передмова

Розвиток науки і промисловості потребує від сучасного фахівця з автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій професійної підготовки з питань метрології, технологічних вимірювань та вимірювальної техніки. Посібник розроблено відповідно до програми підготовки бакалаврів за напрямом «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» і є складовою частиною дисципліни «Технологічні вимірювання і прилади». Ця дисципліна є базовою у підготовці бакалаврів вказаного напрямку.

Відповідно до робочого навчального плану підготовки бакалаврів за вказаним напрямом, у першому кредитному модулі передбачено 36 годин лекцій та 36 годин лабораторних занять. Значна частина годин виноситься на самостійну роботу (78 годин), у рамках якої студенти повинні підготуватися до лабораторних занять та виконання розрахункової роботи. Даний посібник є третьою частиною методичних матеріалів, що призначені для опанування студентами необхідного матеріалу дисципліни «Технологічні вимірювання і прилади».

У посібнику наведено теоретичні відомості, необхідні для набуття умінь та досвіду роботи з приладами для вимірювання рівня та витрат. У першій частині було подано теоретичні відомості, необхідні для визначення метрологічних характеристик приладів для вимірювання тиску, перепаду тисків та розрідження. У другій частині було подано теоретичні відомості, необхідних для визначення метрологічних характеристик приладів вимірювання температури та вторинних приладів, що працюють з термопарами та термометрами опору. А четверту частину заплановано присвятити питанням вимірювання складу та властивостей речовин.

У посібнику наведені мета та завдання для лабораторних робіт, викладений необхідний теоретичний матеріал та зазначено літературу для поглибленого вивчення розділу, подано описи експериментальних установок для виконання лабораторних робіт, надано порядок виконання робіт та

обробки результатів експериментів, перелічено вимоги до оформлення звітів, сформульовано контрольні питання для самопідготовки студентів та визначені засоби безпеки, яких слід дотримуватися при виконанні робіт.

Представлений лабораторний практикум має на меті закріплення на практиці знань та досвіду, отриманих в процесі вивчення дисципліни «Технологічні вимірювання і прилади», а також сприятиме засвоєнню матеріалу курсу.

## **ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5**

### **ВИМІРЮВАННЯ РІВНЯ**

**Мета та основні завдання роботи:** дослідити особливості застосування чутливих елементів різних типів, які здійснюють вимірювання рівня. Ознайомитися з принципом дії та конструкцією основних приладів вимірювання рівня. Набути умінь визначати основні метрологічні характеристики технічних засобів та обробляти результати вимірювань рівня.

**Вивчити та стисло описати у протоколі лабораторної роботи:**

- принцип дії та конструкцію основних приладів вимірювання рівня;
- метрологічні характеристики чутливих елементів рівня;
- склад лабораторної установки;
- методику проведення досліджень;
- форми для запису результатів вимірювань.

#### **5.1 Основні теоретичні відомості**

Вимірювання рівня рідких і сипких речовин відіграє важливу роль в хімічному, нафтохімічному й нафтопереробному виробництвах, у харчовій промисловості, у виробництві будівельних матеріалів, у системах екологічного моніторингу. Вимірювання рівня рідких речовин є однією з ключових задач хімічних виробництв.

Рівнем називають висоту рідини (сипкого матеріалу) в технологічному апараті. Рівень вимірюють в одиницях довжини. Технічні засоби, що використовуються для вимірювання рівня рідини (сипкого матеріалу) називаються рівнемірами. Прилади, призначені для сигналізації граничних рівнів, називаються сигналізаторами рівня.

#### **Класифікація рівнемірів**

Промисловість виробляє ряд різноманітних технічних засобів, що дозволяють вирішувати завдання вимірювання й контролювання рівня. Засоби вимірювання рівня реалізують методи, засновані на різних фізичних

властивостях середовища. Найбільшого поширення набули наступні пристрої для вимірювання рівня рідини:

- візуальні;
- поплавкові – для вимірювання рівня використовується поплавок або інше тіло, що знаходиться на поверхні рідини;
- буйкові – для вимірювання рівня використовується масивне тіло (буйок), частково занурюване в рідину;
- гідростатичні – засновані на вимірюванні гідростатичного тиску стовпа рідини;
- електричні – величини електричних параметрів залежать від рівня рідини;
- ультразвукові – засновані на принципі відбиття від поверхні звукових хвиль;
- радарні і хвилеводні – засновані на принципі відбиття від поверхні сигналу високої частоти (СВЧ);
- радіоізотопні, засновані на використанні інтенсивності потоку ядерних випромінювань, залежних від рівня рідини.

З розвитком вимірювальної техніки кожний з методів здобуває характерний набір своїх технічних реалізацій.

### **Візуальні рівнеміри**

Візуальні рівнеміри є найпростішими вимірювачами рівня рідини. До них належать вимірювальні лінійки та рейки, а також водомірні стекла.

Водомірне скло (рис.5.1) призначено для безпосереднього спостереження за рівнем рідини.

Вказівне скло з'єднують з посудиною нижнім кінцем (для відкритих посудин), як показано на рис.5.2.а,



*Рисунок 5.1 – Водомірне скло*

або обома кінцями (для посудин з надлишковим тиском або розрідженням) – рис.5.2.б.

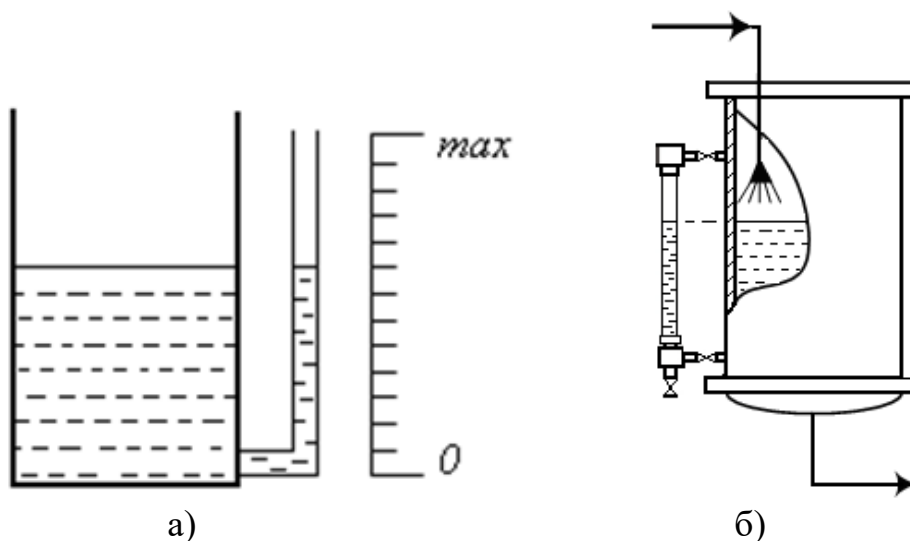


Рисунок 5.2 – Схеми під'єднання водомірного скла

Рівнеміри цього типу працюють за принципом сполучених посудин. Спостерігаючи за положенням рівня рідини в скляній трубці, можна судити про зміну рівня в посудині. Скло комплектують вентилями або кранами для відключення їх від посудини і продування системи.

### Поплавкові рівнеміри

Простими приладами для вимірювання рівня рідини є поплавкові рівнеміри. Це прилади з постійним значенням виштовхуючої сили та глибиною занурення поплавка, в основу роботи яких покладено закон Архімеда. Поплавкові рівнеміри широкого діапазону (рис. 5.3.а) представляють собою поплавок 1, зв'язаний з противагою 2 за допомогою троса, перекинутого через ролики. В нижній частині противаги закріплено стрілку, яка показує на шкалі значення рівня в резервуарі.

Поплавки зазвичай представляють собою порожисте тіло кулеподібної або циліндричної форми діаметром 80 – 200 мм. Вага поплавка, що зменшена архімедовою силою, врівноважується противагою і силою тертя в роликах.

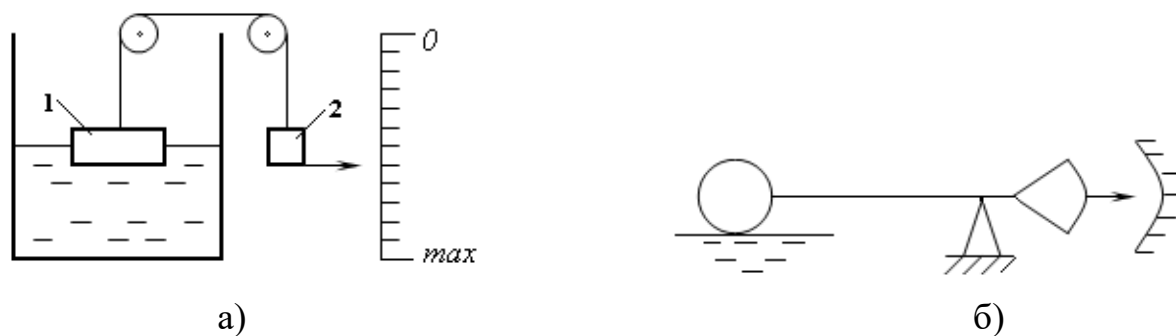


Рисунок 5.3 – Схеми поплавкових рівнемірів широкого діапазону (а): 1 – поплавок; 2 – тягар (противага); і вузького діапазону (б)

Якщо знехтувати силою тяжіння троса і тертям в роликах, стан рівноваги системи «поплавок-противага» для поплавка циліндричної форми описується рівнянням:

$$G_{\Gamma} = G_{\Pi} + Sh_{\Pi}\rho_p g, \quad (5.1)$$

де  $G_{\Gamma}$ ,  $G_{\Pi}$  – сили тяжіння противаги і поплавка;  $S$  – площа поперечного перерізу поплавка;  $h_{\Pi}$  – глибина занурення поплавка;  $\rho_p$  – густина рідини;  $g$  – прискорення вільного падіння.

Зусилля, що примушують переміщатися поплавок, формуються за рахунок занурення поплавка. Вагу поплавка розраховують за формулою:

$$G = V_{\Pi}\rho_{\Pi}g, \quad (5.2)$$

де  $V_{\Pi}$  – об'єм поплавка;  $\rho_{\Pi}$  – щільність матеріалу поплавка;  $g$  – прискорення вільного падіння.

Підвищення рівня рідини змінює глибину занурення поплавка і на нього діє додаткова виштовхувальна сила. В результаті рівновага системи, що описується рівнянням (5.1), порушується і противага опускається вниз доти, доки глибина занурення поплавка не стане рівною  $h_{\Pi}$ . У випадку зниження рівня діюча на поплавок виштовхувальна сила зменшується і поплавок починає опускатися вниз доти, доки глибина занурення не стане рівною  $h_{\Pi}$ . Часто поплавкові рівнеміри використовують з редукторами, що дозволяє змінити довжину шкали за рахунок зміни передавального співвідношення редуктора. До недоліків вказаного рівнеміра можна віднести зворотну шкалу,

труднощі відліку для високих резервуарів і похибку від зміни глибини занурення поплавка. Хвилювання поверхні рідини також істотно впливає на вимірювання рівня. Для зменшення цього впливу поплавки поміщають в спеціальні виносні камери.

Поплавкові рівнеміри вузького діапазону (рис. 5.3.б) зазвичай являють собою пристрої з кулеподібним поплавком діаметром  $80 \div 100$  мм, виконаним з нержавіючої сталі. Поплавок плаває на поверхні рідини і через штангу і спеціальні сальникові ущільнення з'єднується зі стрілкою вимірювального пристрою, або з перетворювачем кутових переміщень в уніфікований електричний або пневматичний сигнал. За таким принципом будуються регулятори прямої і непрямої дії.

Наприклад, поплавок рівнемір РУПТ-АМ (рис. 5.4) застосовуються на об'єктах для безперервного перетворення рівня у стандартний електричний сигнал.

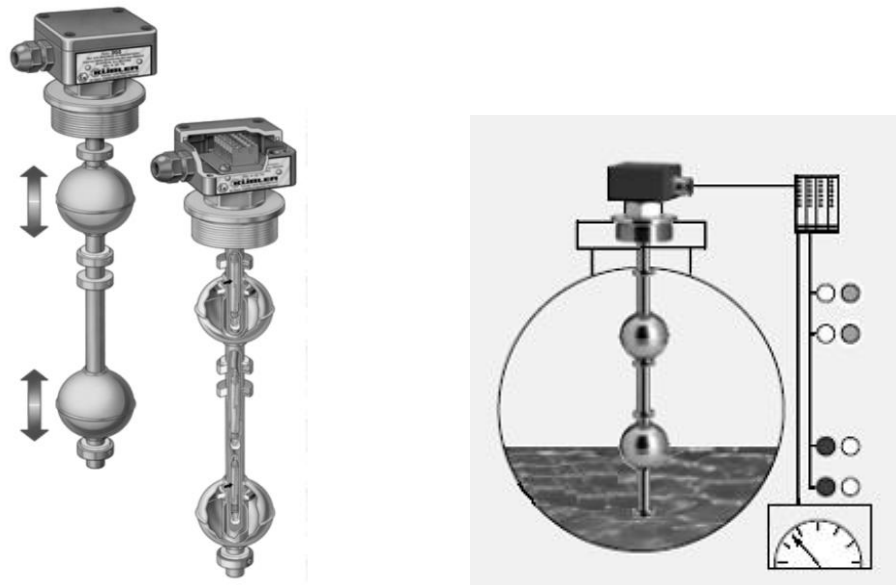
Поплавкові датчики широко застосовуються і для сигналізації рівня. Одним з прикладів такого датчика є поплавок, що пересувається по вертикальному штоку. У середині поплавок встановлено постійний магніт, а в штоку, що являє собою порожню трубку, розміщено один або декілька (не більше 5) герконів. Геркони (**герметичний контакт**) – електромеханічний пристрій, що є парою феромагнітних контактів, запаяних в герметичну скляну колбу. При піднесенні до геркону постійного магніту або включенні електромагніту, його контакти замикаються. Геркони використовуються як безконтактні вимикачі, датчики близькості тощо). У випадку зміни рівня поплавка із постійним магнітом переміщається разом з рівнем рідини по трубці, в якій розташовані магнітні контакти (геркони). При досягненні контрольованого рівня розімкнений



Рисунок 5.4 –  
Поплавковий рівнемір

геркон потрапляє в поле постійного магніту поплавка і замикається (герконовий контакт спрацьовує при наближенні магніту), передаючи сигнал на вторинний прилад. Таким чином, процес перемикання відбувається безконтактно.

Рівнемір може мати один чи два поплавки, які призначені для формування електричного дискретного сигналу про рівень рідини або рівень двох рідин, які не змішується, в апаратах чи резервуарах. На рис. 5.5 наведено один і варіантів виконання такого рівнеміра.



*Рисунок 5.5 – Поплавкові магнітні давачі*

Широке застосування знайшли поплавкові вимикачі. Поплавкові вимикачі використовуються для сигналізації про граничні значення рівня рідин. Вони мають необхідну плавучість, що дозволяє їм у незакріпленому стані перебувати на поверхні рідини в строго горизонтальному положенні. Процес перемикання запускається, коли давач відхиляється від горизонтального положення в будь-якому напрямку, як це представлено на рис. 5.6.

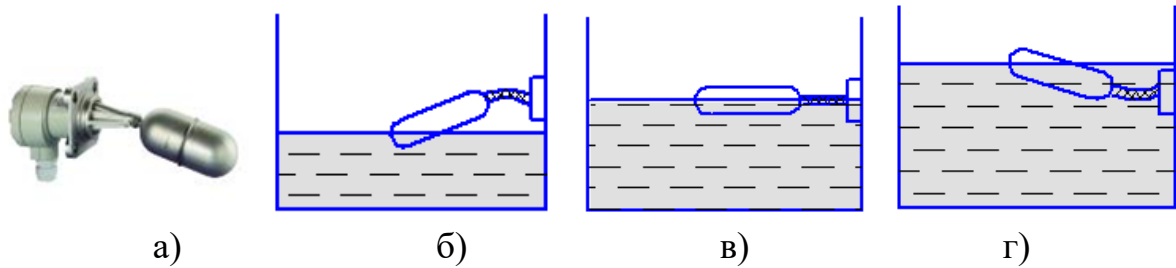


Рисунок 5.6 – Поплавковий сигналізатор: а – зовнішній вид; б – контакт мікровимикача розімкнений; в – контакт мікровимикача в довільному стані; г – контакт мікровимикача замкнений.

Поплавковий вимикач складається з корпусу поплавка із вбудованим мікровимикачем і приєднувальним кабелем. Сучасні поплавкові давачі використовують три різновиди комутаційних пристроїв: кульковий мікровимикач з визначеним положенням (рис. 5.7.а); кульовий кінцевий мікровимикач (рис. 5.7.б); мікровимикач зі сплавом галінстан (Galinstan – рідкий металевий сплав з галію, індію і олова, який зберігає рідкий стан при температурах вище  $-19^{\circ}\text{C}$ ) (рис. 5.7.в).

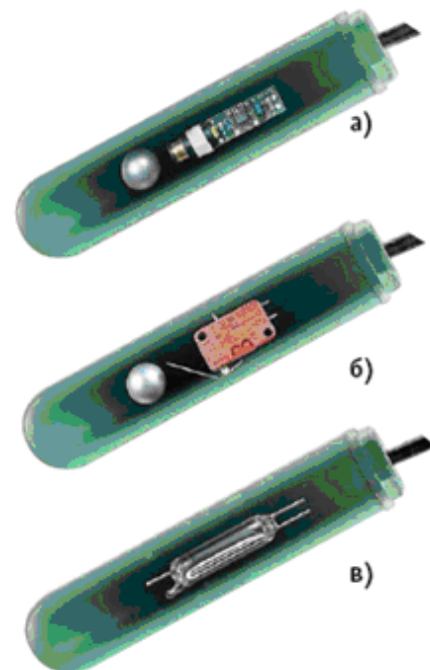


Рисунок 5.7 – Комутаційні пристрої поплавкових давачів

### Буйкові рівнеміри

Робота буйкових рівнемірів також базується на законі Архімеда. Чутливим елементом цих рівнемірів є циліндричний буйок, що виготовлений з матеріалу, питома вага якого значно більша за питому вагу рідини, рівень якої контролюється. Буйок, на відміну від поплавка, не плаває на поверхні

рідини, а занурений у рідину і переміщується у залежності від її рівня. Довжина буйка підбирається згідно зі значенням рівня, який вимірюють. Буйок може підвішуватись на пружині (рис. 5.8), або забезпечуватись іншим силокомпенсуючим пристроєм. Жорсткість пружини підбирають такою, щоб за відсутності рідини в посудині буйок ледь не торкався дна.

За відсутності рідини в посудині ( $h=0$ ) зусилля викликане вагою буйка 1 компенсується зусиллям розтягування пружини 2:

$$S_b l_b \rho_b g = l_{\Pi} c_{\Pi}, \quad (5.3)$$

де  $S_b$  – площа перерізу буйка;  $l_b$  – довжина буйка;  $l_{\Pi}$  – довжина пружини;  $c_{\Pi}$  – жорсткість пружини;  $\rho_b$  – щільність матеріалу буйка;  $g$  – прискорення вільного падіння.

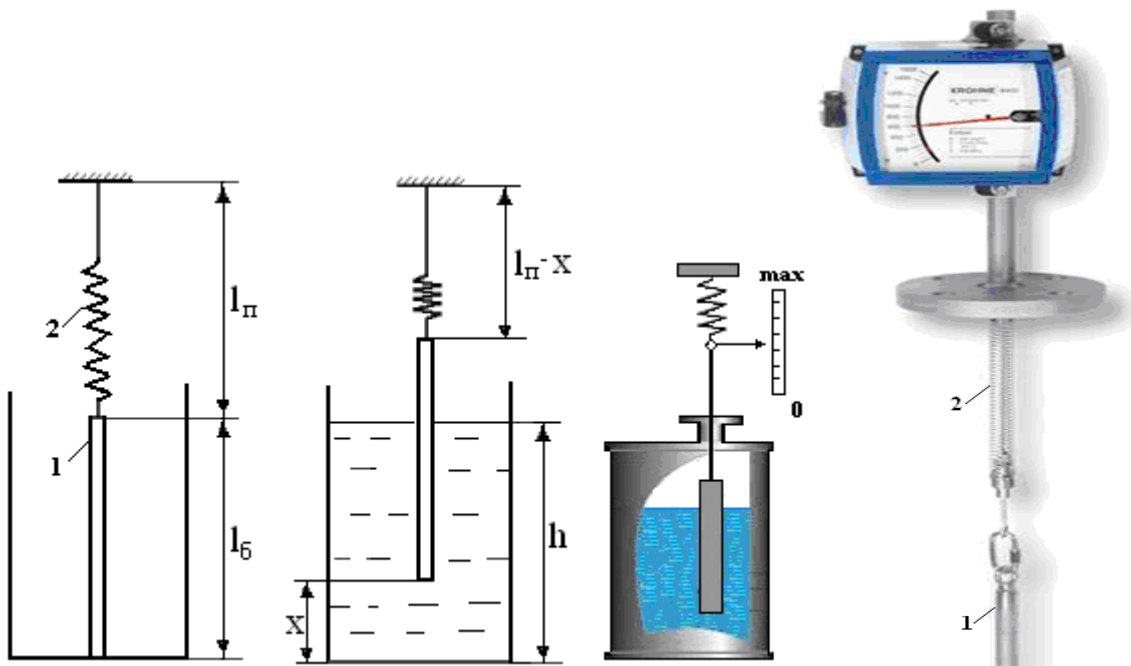


Рисунок 5.8 – Схема роботи буйкового рівнеміра та приклад виконання промислового механічного буйкового рівнеміра: 1 – буйок; 2 – пружина

При зміні рівня рідини ( $h>0$ ) умова рівноваги набуває вигляду:

$$S_b l_b \rho_b g - (h - x) \cdot S_b l_b \rho_b g = (l_{\Pi} - x) \cdot c_{\Pi}. \quad (5.4)$$

Віднімемо від рівняння (5.4) рівняння (5.3) і отримаємо:

$$-h \cdot S_b l_b \rho_b g + x \cdot S_b l_b \rho_b g = -x \cdot c_{\Pi}.$$

Звідси:

$$h = x \cdot \left( \frac{S_{\sigma} l_{\sigma} \rho_{\sigma} g + c_{\Pi}}{S_{\sigma} l_{\sigma} \rho_{\sigma} g} \right) = x \cdot \left( 1 + \frac{c_{\Pi}}{S_{\sigma} l_{\sigma} \rho_{\sigma} g} \right) = kx \quad (5.5)$$

де  $k = \left( 1 + \frac{c_{\Pi}}{S_{\sigma} l_{\sigma} \rho_{\sigma} g} \right)$  – коефіцієнт.

З рівняння (5.5) видно, що переміщення буйка (або деформація пружини) визначає рівень. Таким чином, буйкові рівнеміри відносять до приладів із змінним значенням сили Архімеда.

Якщо буйок механічно з'єднаний з чутливим елементом проміжного перетворювача (диференціально-трансформаторного, індуктивного, пневматичного типу тощо), то переміщення буйка можна перетворити в електричний або пневматичний сигнал. На рис. 5.9 наведена схема роботи буйкового рівнеміра з диференціально-трансформаторною (а) і пневматичною (б) передачею. Під час зміни рівня разом із буйком переміщується рухоме осереддя в диференціально-трансформаторному перетворювачі. Так формується вихідний електричний сигнал.

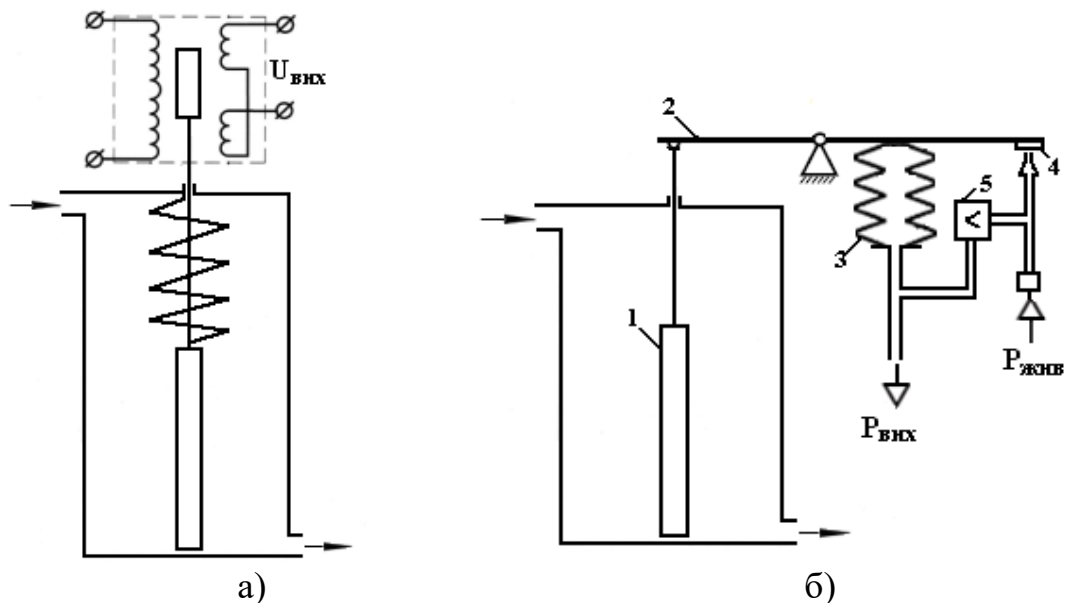
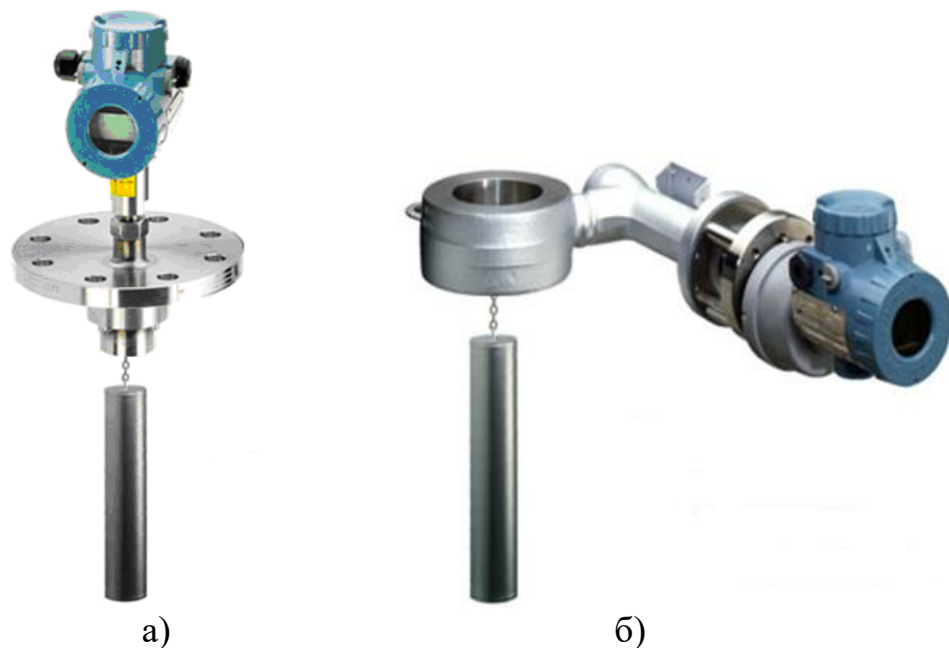


Рисунок 5.9 – Схема роботи буйкового рівнеміра з диференціально-трансформаторною (а) і пневматичною (б) передачею: 1 – буйок; 2 – важіль; 3 – зильфон зворотного зв'язку; 4 – перетворювач типу «сопло – заслінка»; 5 – пневмопідсилювач.

В рівнемірі з пневматичною передачею вихідний пневматичний сигнал в залежності від переміщення буйка 1 і зв'язаного з ним важеля 2 формується за допомогою сильфона зворотного зв'язку 3, перетворювача типу «сопло-заслінка» 4 і пневмопідсилювача 5. Приклади промислових буйкових рівнемірів з різними варіантами встановлення на апарат наведені на рис. 5.10.

Буйкові рівнеміри використовують для вимірювання рівня як у широкому, так і у вузькому діапазонах. Ці засоби вимірювань застосовують для вимірювання рівня однорідної рідини під високим тиском (до 32МПа), у широкому діапазоні температур (від  $-200$  до  $600$  °С). Рідина не повинна мати властивостей адгезії до буйків. Діапазон вимірювання рівня від 0,025 до 16 м.



*Рисунок 5.10* – Приклади промислових буйкових рівнемірів з різними варіантами встановлення на апарат: фланцевого типу (а) і типа «сандвіч» (б)

Буйкові рівнеміри дають можливість вимірювання рівня межі поділу фаз рідини, а також рівня агресивних рідин.



Рисунок 5.11 – Приклади розміщення промислових буйкових рівнемірів

Буйки, як і поплавки, можна розміщувати в самому резервуарі або у виносній камері (рис. 5.11).

Така камера виконує роль демпфера динамічних збурень у контрольованій рідині, викликаних роботою насосів.

### Гідростатичні рівнеміри

Такий метод вимірювання рівня базується на вимірюванні гідростатичного тиску рідини з постійною густиною на дно резервуара. Тому для вимірювання рівня гідростатичним способом застосовують прилади для вимірювання тиску або перепаду тисків.

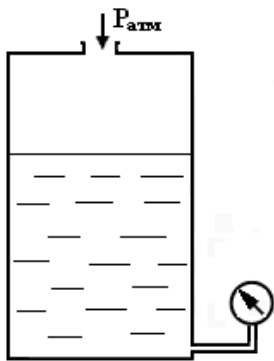


Рисунок 5.12 – Вимірювання рівня в резервуарі за допомогою манометра

Величина гідростатичного тиску стовпа рідини на дно резервуара  $P_z$  залежить від висоти стовпа рідини  $h$  і від густини рідини  $\rho_p$ :

$$P_z = \rho_p g h$$

Звідси рівень становитиме:

$$h = \frac{P_z}{\rho_p g} \quad (5.6)$$

Вимірювання гідростатичного тиску може здійснюватися датчиком надлишкового тиску (манометром), що підключається на висоті, яка відповідає нижньому граничному значенню рівня (рис. 5.12). Якщо посудина перебуває під надлишковим тиском, наведена вимірювальна схема

непридатна, тому що до гідростатичного тиску додається надлишковий тиск над поверхнею рідини, який в даній схемі не враховується. Тоді вимірювання здійснюється диференціальним манометром, що підключається до резервуара на висоті, що відповідає нижньому граничному значенню рівня, і до газового простору над рідиною або з'єднується з атмосферою – рис. 5.13. Наведена вимірювальна схема використовується, якщо дифманометр розташований на

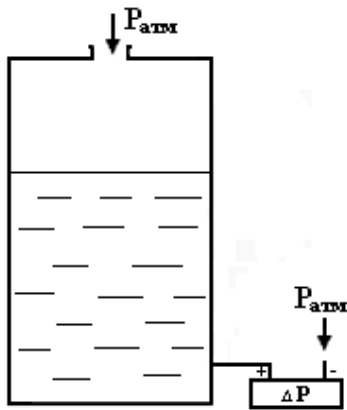


Рисунок 5.13 – Вимірювання рівня в резервуарі за допомогою дифманометра

одному рівні з дном резервуара. Такі рівнеміри називають дифманометричними гідростатичними рівнемірами.

Якщо немає необхідності в дистанційній передачі показань рівня, доцільно застосовувати дифманометри з відліковим пристроєм. Ці дифманометри можуть забезпечуватися контактними пристроями для сигналізації граничних значень рівня. Для дистанційного вимірювання рівня використовують

дифманометри або перетворювачі тиску на електричний або пневматичний сигнал в комплекті з відповідними вторинними приладами.

Зазвичай дифманометр встановлюють нижче дна резервуару (рис. 5.14). Для усунення впливу на показання дифманометра 1 стовпа рідини в сполучній трубці встановлюють зрівнювальну посудину 2, яку заповнюють тією ж рідиною, що і резервуар. Відлік рівня ведеться від поверхні конденсату в зрівняльній посудині. Для вимірювання рівня у відкритому резервуарі зрівняльну посудину встановлюють на відмітці мінімального рівня і сполучають у верхній частині з атмосферою, а для підтримки незмінності рівня рідини в зрівняльній посудині передбачають зливні лінії 3. При цьому дифманометр через імпульсну трубку плюсової камери з'єднаний з резервуаром у його нижній точці, а мінусова камера з'єднується з атмосферою через зрівняльну посудину. При контролі рівня рідини в

закритому резервуарі, що перебуває під тиском (або розрідженням), зрівняльну посудину встановлюють на відмітці максимального рівня і також з'єднують з резервуаром. Плюсову камеру дифманометра сполучають з простором над рідиною через зрівняльну посудину 2, а імпульсну трубку мінусової камери з'єднують з резервуаром.

Для вимірювання рівня агресивних рідин дифманометр захищають розділовими посудинами або мембранними роздільниками, що дозволяє заповнити його камери і трубки неагресивною рідиною. Для вимірювання рівня суспензій і шламів, осідання яких можуть забивати імпульсні трубки дифманометрів, їх безперервно продувають стислим повітрям.

Останнім часом набули поширення датчики гідростатичного тиску (рис. 5.15) у них, як і у дифманометрів, є дві вимірювальні камери, одна з яких виконана у вигляді відкритої мембрани, а друга у вигляді штуцера. Такий рівнемір завжди закріплюється безпосередньо в дно резервуара (або у бокову стінку біля днища), і тому не має імпульсних трубок, а отже, відсутня необхідність у компенсації висоти імпульсної трубки. Можливі варіанти схем з використанням гідростатичного датчика тиску представлені на рис. 5.16.

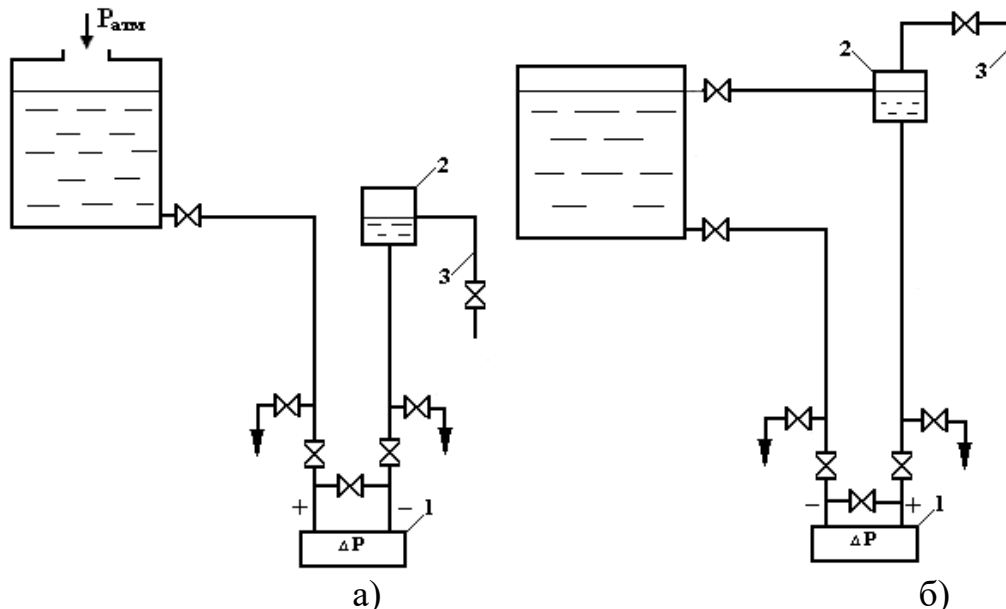


Рисунок 5.14 – Схеми вимірювання рівня зі зрівнювальною посудиною в відкритих (а) та закритих (б) резервуарах: 1 – дифманометр; 2 – зрівняльна посудина; 3 – зливні лінії.



Рисунок 5.15 – Давачі гідростатичного тиску

При вимірюванні рівня у відкритому резервуарі штуцер сполучений з атмосферою, в закритому резервуарі, що перебуває під тиском (або розрідженням), штуцер також з'єднують і з резервуаром.

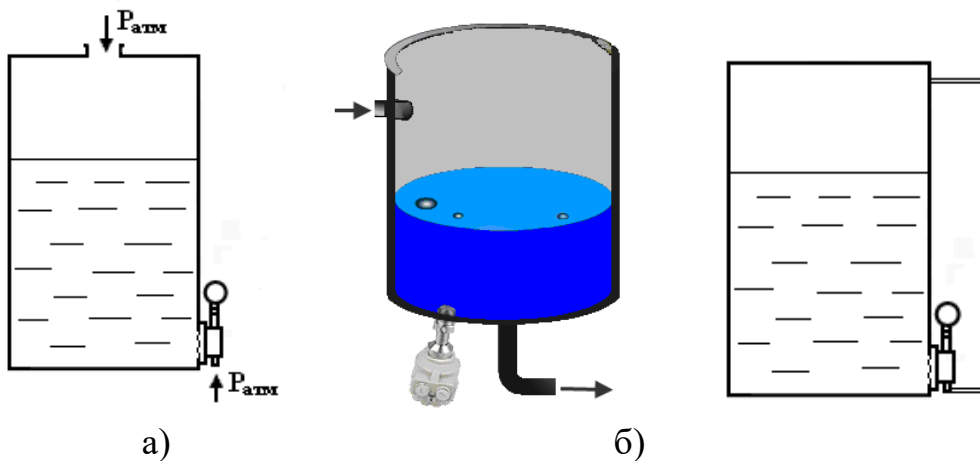


Рисунок 5.16 – Схеми використання датчиків гідростатичного тиску: а) для відкритих резервуарів; б) для закритих резервуарів

**Пневмометричний** метод вимірювання рівня заснований на вимірюванні тиску повітря (інертного газу), що врівноважує гідростатичний тиск стовпа рідини. Робота таких рівнемірів (рис. 5.17) базується на принципі гідравлічного затвору. Пневмометрична трубка 1 розміщується вертикально в апараті 5. Для вимірювання рівня використовують повітря або інертний газ під тиском, який продувають через шар рідини. Тиск повітря в джерелі живлення встановлюють приблизно на 20 кПа більше за сумарний тиск стовпа рідини  $P_{ст}$  і тиск в апараті над рідиною  $P_a$ . Таким чином, мінімальний абсолютний тиск повітря в напірній лінії повинен дорівнювати:

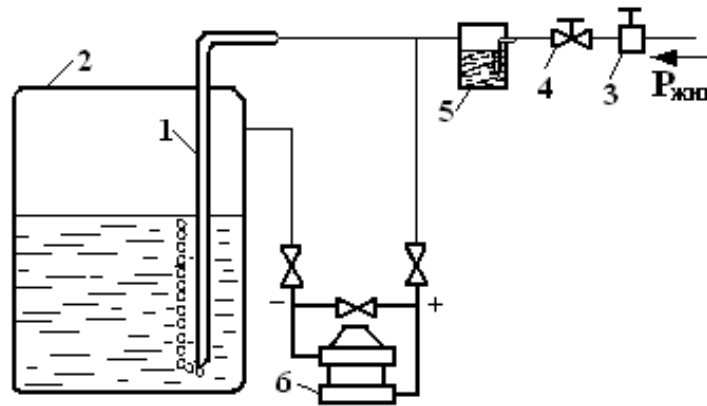


Рисунок 5.17 – Схема гідростатичного пневмометричного рівнеміра:

1 – пневмометрична (п'єзометрична) трубка; 2 – резервуар; 3 – редуктор; 4 – вентиль;

$$p = p_{ст} + p_a + 20 \quad (5.7)$$

Кількість газу регулюють редуктором 3. Тиск  $P$  газу вимірюється дифманометром 6. У цих приладах обов'язковий контроль витрат повітря, що подається. Якщо тиск і витрата газу будуть великими, прилад втрачає чутливість, і невелика зміна рівня не будуть зафіксована. Малий тиск не продує трубку. При подачі газу тиск у п'єзометричній трубці поступово підвищується доти, поки не стане рівним тиску стовпа рідини плюс тиск над рідиною  $P_{над}$  (якщо є). Коли тиск у трубці стане рівним сумі тисків стовпа рідини та над рідиною, з нижнього відкритого кінця трубки починає виходити газ. Витрату газу підбирають так, щоб газ виходив з трубки у вигляді окремих бульбашок, щоб з трубки в рідину виходило 1-2 бульбашки в секунду.

Пневмометричний метод вимірювання рівня може бути застосований для вимірювання рівня у посудинах, заповнених агресивними рідинами. Такі рівнеміри є досить точними, але при цьому потребують постійної подачі повітря (газу) в апарат.

Для відкритих резервуарів простішим типом гідростатичного рівнеміра є дзвоновий (рис. 5.18.а), що являє собою перевернутий дзвін 1, опущений на дно резервуару і з'єднаний тонкою трубкою з мембранним манометром 5.

Рідина в резервуарі стискає повітря, що заповнює дзвін і манометричну систему. Тиск, що показує манометр пропорційний висоті стовпа рідини. Для уникнення похибки, викликані розчиненням повітря в рідині, дзвін закривають мембраною.



Рисунок 5.18– Схема гідростатичного дзвонового рівнеміра (а), промисловий дзвоновий рівнемір УГЦ-1.1 з цифровим вторинним приладом (б) і його схематичне зображення (в): 1 – дзвін; 2 – вимірювальний прилад (манометр)

Первинний перетворювач дзвонового типу УГЦ-1.1 (рис. 5.18.б) складається з порожнистого металевого дзвону, перетворювача тиску, герметичної повітряної лінії зв'язку і фланця. До занурених давачів рівня відносять і гідростатичні глибинні зонди (рис. 5.19).

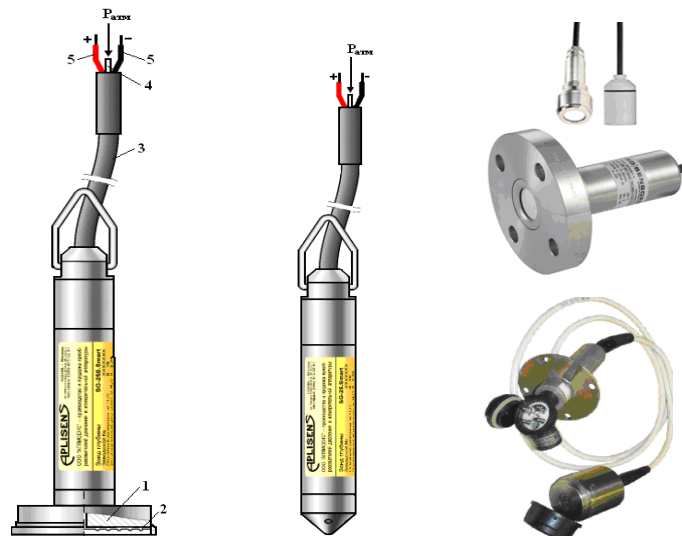


Рисунок 5.19– Промислові глибинні зонди: 1 – тензомодуль; 2 – мембрана; 3 – з'єднувальний кабель; 4 – капіляр; 5 – провідники

Зонди рівня є давачами гідростатичного тиску для вимірювання рівня води. Деякі моделі давачів випускаються з вбудованим термоперетворювачем опору і одночасно визначають рівень і температуру в місці встановлення. Діапазон вимірювань становить понад 200м, за температури робочого середовища від  $-30$  до  $+100^{\circ}\text{C}$ . Давачі призначені для використання в системах автоматичного контролю, регулювання і керування технологічними процесами в різних галузях промисловості.

Вимірювальним елементом є п'єзорезистивний кремнієвий тензомодуль 1, який вбудований в приймач тиску і відокремлений від середовища вимірювання розділовою мембраною 5. Вимірювання рівня за допомогою зонда здійснюється шляхом використання прямої залежності між висотою стовпа рідини і викликаним ним гідростатичним тиском. Вимірювання тиску здійснюється на рівні розділової мембрани зануреного зонда. Корпус зонда зазвичай виготовляють із полівінілхлориду або нержавіючої сталі.

Вплив атмосферного тиску на поверхню рідини, усувається за допомогою його підведення до задньої сторони керамічної діафрагми через спеціальну трубку (капіляр) 4, яка знаходиться в кабелі 3, який з'єднує вимірювальний елемент і електронну схему. Кабель, окрім трубки для подачі опорного атмосферного тиску містить в собі проводи 5 живлячих і сигнальних ліній. Суміщений з вимірювальним елементом електронний підсилювач, стандартизує сигнал. Опущений на заданий рівень зонд може вільно висіти на кабелі або лежати на дні резервуару. Чутливий елемент гідростатичного рівнеміра рідини, поміщений за мембраною, і електронна схема давачів фізично розділені. Сигнал від чутливого елементу йде безпосередньо на інтегральну схему, яка конвертує сигнал у стандартний.

У резервуарі, де наявна турбулентність (робота мішалок, турбулентна притока), зонд монтується в екранованій захисній трубці (наприклад, із полівінілхлориду), як показано на рис. 5.20. Для занурення зонда на глибину більше 100 м кабель із капіляром прикріплюють до сталевого троса.

Гідростатичні рівнеміри зазвичай застосовуються для однорідних рідин в резервуарах без суттєвого руху робочого середовища. Вони дозволяють проводити вимірювання в діапазоні до 250 КПа, що відповідає (для води) 25 метрам, з точністю до 0,1% при надлишковому тиску до 10 МПа і температурі робочого середовища:  $-40\dots+120^{\circ}\text{C}$ .

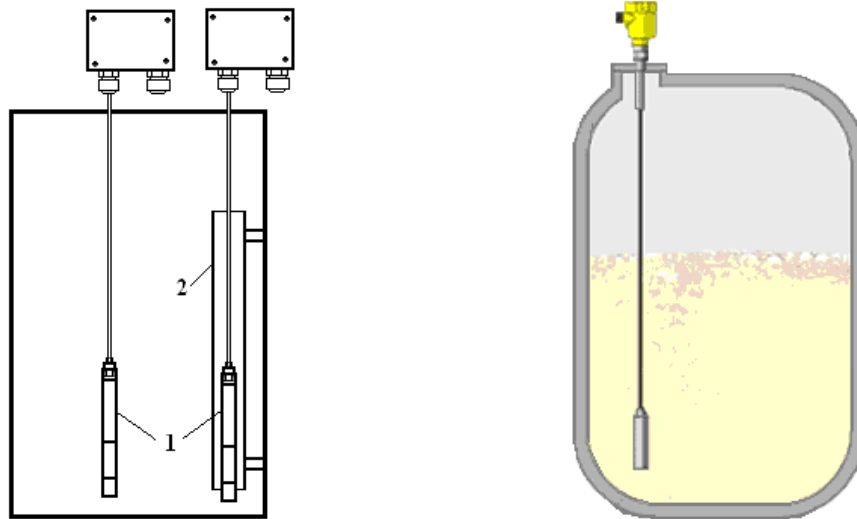


Рисунок 5.20 – Приклади встановлення глибоких зондів (без захисної труби і з трубою): 1 – глибокий зонд; 2 – захисна труба

### Електричні вимірювачі рівня

До електричних рівнемірів відносяться прилади вимірювання рівня, в яких рівень контрольованого середовища перетворюється на будь-який електричний сигнал. Залежно від того, який вихідний параметр (ємність, опір або індуктивність) первинного перетворювача «реагує» на зміну рівня, електричні рівнеміри підрозділяють на ємнісні, кондуктометричні і індуктивні. Найбільшого поширення набули ємнісні і кондуктометричні (омічні) рівнеміри.

Робота **ємнісних рівнемірів** заснована на тому, що діелектрична проникність багатьох речовин відмінна від діелектричної проникності повітря. Ємнісний датчик є електричним конденсатором, ємність якого змінюється залежно від рівня рідині. Конструктивно ємнісні чутливі елементи виконують у вигляді коаксіально розташованих циліндричних

електродів або паралельно розташованих плоских електродів. Як один з електродів може використовуватися металева стінка посудини.

Конструкція конденсаторних перетворювачів різна для електропровідних і не електропровідних рідин. Залежно від електричних характеристик, до не електропровідних відносять рідини, що мають питомий опір  $\rho > 10^7 \div 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  і відносну діелектричну проникність  $\varepsilon_p \leq 5 \div 6$ , а до електропровідних відносять до рідини, що мають питомий опір  $\rho \leq 10^5 \div 10^6 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  і  $\varepsilon_p \geq 7 \div 10$ . Відмінність перетворювачів полягає в тому, що один з електродів рівнемірив для електропровідних рідин покритий ізоляційним шаром, а електроди перетворювачів для не електропровідних рідин не ізольовані.

Ємність плоского конденсатора (рис. 5.21), що занурений у рідину в резервуарі, де контролюється рівень, дорівнює сумі ємностей двох ділянок – ділянки зануреної у рідину і ділянки, що знаходиться в газовому середовищі над рідиною:

$$C = C_h + C_{H-h}, \quad (5.8)$$

де  $C_h$  – ємність зануреної частини конденсатора;  $C_{H-h}$  – ємність незануреної частини конденсатора.

При зміні рівня рідини змінюється і ємність плоского конденсатора за рахунок перерозподілу діелектричних проникливостей рідини і газового середовища над нею (ця ємність дорівнює  $C = \varepsilon_\varepsilon \varepsilon_0 S/d = \varepsilon_a S/d$ , де  $S$  – площа пластин конденсатора;  $d$  – відстань між пластинами конденсатора;  $\varepsilon_\varepsilon$ ,  $\varepsilon_a$  – відносна і абсолютна діелектричні проникливості середовища між пластинами конденсатора, відповідно;  $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ ф} \cdot \text{м}^{-1}$  – діелектрична проникливість вакууму);  $C_h$  і  $C_{H-h}$  визначаються наступним чином:

$$C_h = \varepsilon_p hb/d \quad ; \quad C_{H-h} = \varepsilon_\Gamma (H - h)b/d, \quad (5.9)$$

де  $b$ ,  $H$  – ширина і висота пластин конденсатора;  $\varepsilon_p$ ,  $\varepsilon_r$  – абсолютні діелектричні проникності рідини і газового середовища над нею, відповідно;  $h$  – рівень рідини в резервуарі (висота зануреної частини конденсатора);  $d$  – відстань між пластинами конденсатора.

Для безповітряного простору відносна діелектрична проникність дорівнює 1, для повітря –  $\approx 1(1,0006)$ , для решти речовин більша за 1.

Після підстановки залежностей (5.9) в рівняння (5.8) і нескладних перетворень отримаємо формулу зміни ємності плоского конденсатора від рівня рідини, що контролюється:

$$C = \varepsilon_r H b / d + h(\varepsilon_p - \varepsilon_r) b / d = C_0 + C(h) \quad (5.10)$$

Електричну ємність здебільшого вимірюють з використанням резонансних і мостових схем. На даний час розроблений широкий спектр модифікацій ємнісних рівнемірів, що передбачають застосування в різних середовищах, зокрема агресивних, вибухонебезпечних, в різних температурних і кліматичних умовах, для різних фізичних станів контрольованого середовища. Існують модифікації, що працюють безперервно або дискретно.

До недоліків ємнісних рівнемірів відносять: високу чутливість до зміни електричних властивостей речовин, зумовлених зміною їх складу, температури тощо; утворення на елементах давача електропровідної або діелектричної плівки внаслідок хімічної активності рідини; конденсації парів, налипання самої рідини.

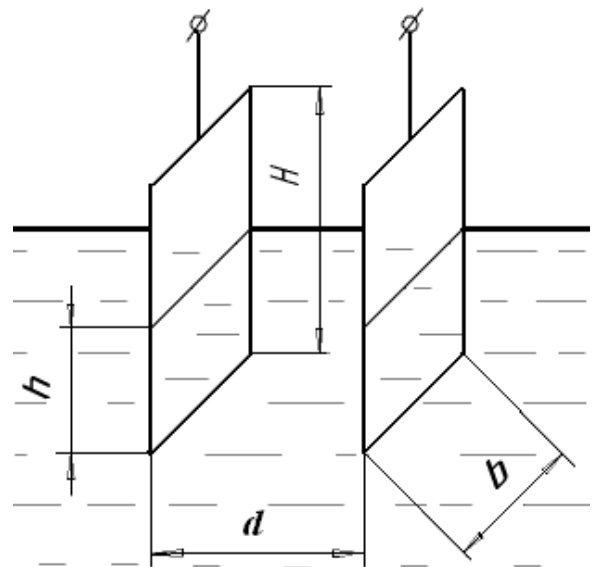


Рисунок 5.21 – Схема плоского ємнісного

**Кондуктометричні рівнеміри** (рівнеміри опору) застосовують для контролю одного або декількох граничних значень рівня електропровідної рідини (мінімальна провідність контрольованої речовини повинна бути більша за  $10^{-3}$  См/м). Принцип дії кондуктометричних датчиків рівня заснований на різниці в електричній провідності рідини (вода, кислоти, лугу) і повітря, яка фіксується стрижневим чутливим елементом – електродом. Кондуктометричні давачі рівня бувають як однострижневими (одноелектродними), які використовуються для контролю одного граничного значення рівня, так і багатострижневими (багатоелектродними), які використовуються для контролю декількох рівнів рідини.

Принцип дії **індуктивних рівнемірів** заснований на залежності індуктивності одиночної котушки або взаємної індуктивності двох котушок від глибини занурення їх в електропровідну рідину. Первинний перетворювач такого рівнеміра являє собою котушку індуктивності, що занурена в електропровідну рідину. Рідина грає роль шунта, що змінює кількість витків котушки. В цьому випадку використовують котушку із оголеними витками. При зміні рівня рідини, що має високу електропровідність, частина витків шунтується і відповідно змінюється індуктивність котушки.

### **Радіоізотопні рівнеміри**

Вимірювання рівня за допомогою радіоізотопних рівнемірів доцільно в тих випадках, коли застосування звичайних рівнемірів з тих або інших причин не бажане, а саме: високий тиск або розрідження, агресивне середовище тощо. Особливо доцільне використання таких рівнемірів для визначення рівня речовин з високою адгезійною здатністю, в резервуарах з вбудованими перемішувачами пристроями, високою температурою і агресивним середовищем, в металургії та інше. Принцип дії радіоізотопні рівнемірів заснований на явищі поглинання  $\gamma$  – променів при проходженні їх через шар речовини. Поглинання відбувається за експонентційним законом:

$$I_x = I_o e^{-\mu x},$$

де  $I_x$  – інтенсивність променів після проходження шару речовини товщиною  $x$ ;  $I_o$  – інтенсивність випромінювання на виході випромінювача (початкова);  $\mu$  – коефіцієнт ослаблення  $\gamma$  – променів, який залежить від природи речовини.

Рівнеміри з використанням радіоізотопних випромінювачів застосовують для неперервного вимірювання рівня (з слідкуючою системою) і для сигналізації відхилення рівня від заданого значення. Три принципові схеми радіоактивних рівнемірів зображені на рис.5.22.

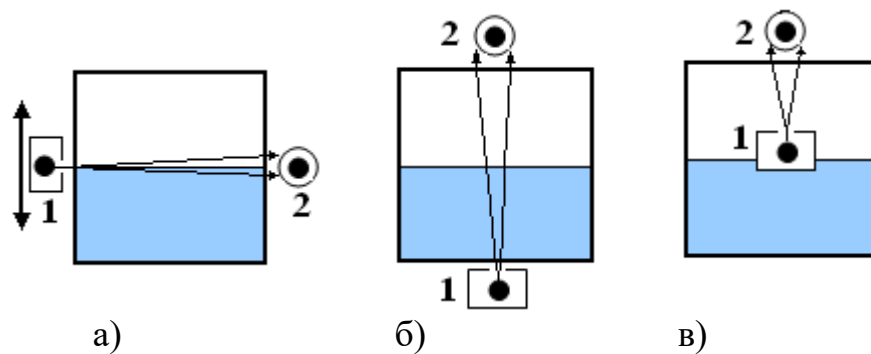


Рисунок 5.22 – Принципові схеми радіоізотопних рівнемірів: 1 – випромінювач; 2 – приймач випромінювання.

Схеми наведені на рис. 5.22.а, б використовують, коли немає доступу в резервуар. Схема на рис. 5.22.а застосовується як сигналізатор рівня (нерухомий випромінювач 1 і приймачі випромінювання 2, або для вимірювання рівня (в комплекті зі слідкуючою системою). В разі невеликого стовпа рідини (до 1 м для легких рідин) можна застосовувати схему рис. 5.22.б. Для вимірювання рівня в широкому діапазоні і в апараті з товстими стінками необхідне досить сильне джерело випромінювання, що може бути небезпечно для обслуговуючого персоналу. Схему, наведену на рис. 5.22.в, доцільно застосовувати у тих випадках, коли в посудину можна помістити поплавки з вбудованим випромінювачем.

Діапазон вимірювань радіоізотопних рівнемірів становить 0 – 15 м. Прилади неможна застосовувати для контролю рівня рідин у виробництві ліків та продуктів харчування.

## Акустичні (ультразвукові) рівнеміри

Існують і застосовуються акустичні рівнеміри трьох основних типів – локаційні рівнеміри, рівнеміри поглинання і резонансні акустичні рівнеміри. Принцип побудови цих приладів полягає в реалізації фізичних явищ, що пов'язані із поширенням звуку в середовищі (газовому або рідинному).

**Локаційні рівнеміри** використовують явище відбивання звукових коливань від поверхні розділу середовищ рідина – газ. Відповідно до цього принципу вимірювання рівня здійснюють за часом проходження ультразвуковими коливаннями відстані від випромінювача В до межі розділу двох середовищ і назад до приймача випромінювання П (рис.5.23).

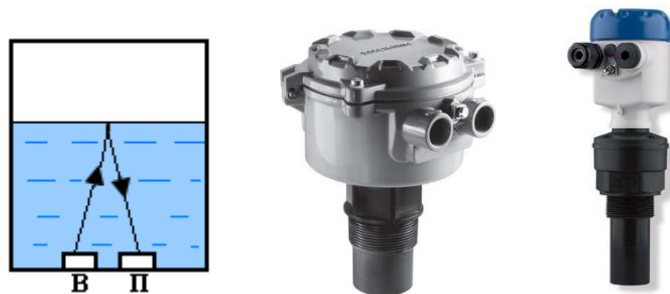


Рисунок 5.23 – Схема ультразвукового рівнеміра та приклади виконання ультразвукових датчиків

Вимірюючи час проходження сигналу  $t$  за допомогою електричної схеми і знаючи швидкість поширення ультразвукових коливань в рідині  $V_c$ , можна визначити висоту рівня  $h$  за формулою:  $h = 1/2 \cdot V_c \cdot t$ . Час  $t$  фіксується відповідною вимірювальною схемою і перетвориться у вихідний сигнал рівнеміра, пропорційний поточному значенню рівня  $h$ . Локація рівня може проводитись знизу і зверху. Якщо випромінювач розташований над рідиною, рівнемір називається акустичним; якщо всередині рідини – ультразвуковим. Хімічні і фізичні властивості середовища не впливають на результат вимірювання, отриманий методом ультразвукової локації, тому цим методом можна вимірювати рівень агресивних і забруднених рідин, абразивних, в'язких і клейких речовин.

Розглянуті рівнеміри забезпечують вимірювання без контакту з вимірюваним середовищем і не висувають високих вимог до зносостійкості і

міцності обладнання. До їх недоліків можна віднести: відбиття сигналу від нестационарних перешкод (наприклад, мішалок), які можуть призвести до похибок вимірювання, вплив на показання рівнемірів температури, тиску і складу газу, а також вплив на сигнал пилу, пари, газових сумішей і піни. Підвищену чутливість ультразвукових рівнемірів до включень у рідині усувають застосуванням двоканальних рівнемірів, що працюють по схемі порівняння. В цьому випадку випромінювання і прийом звукових коливань здійснюється одночасно двома датчиками. Якщо через перешкоди час проходження сигналу, що виміряний для кожного з датчиків, відрізняється, то система вимірювання часу не спрацьовує і виконується повторне вимірювання.

Принцип дії **рівнемірів поглинання** (дисипативних ультразвукових рівнемірів) ґрунтується на явищі розсіювання (поглинання) звукової енергії у речовині.

У **резонансних рівнемірах** вимірювання рівня проводиться за допомогою вимірювання частоти власних коливань стовпа газу над рівнем рідини, яка залежить від рівня рідини. Принцип дії резонансних рівнемірів полягає в збудженні коливань стовпа газу над рівнем рідини і у фіксації резонансної частоти, за якої спостерігається виникнення стоячої хвилі. Стояча хвиля виникає під впливом хвиль рівної частоти і інтенсивності, які рухаються в прямому і протилежному напрямках (хвилі, що посилаються випромінювачем і хвилі, що відбиті від поверхні розділу середовищ). Стояча хвиля має точки максимальної і мінімальної вібрації (вузли і антивузли, відповідно), які не рухаються. Взагалі акустичні рівнеміри можуть вимірювати рівень до 30м при температурі 10 – 50°C.

### **Радарні рівнеміри**

Радарні датчики рівня діють аналогічно акустичним рівнемірам. У основу вимірювань покладено відбиття електромагнітних хвиль від поверхні розділу середовищ, що дозволяє визначити рівень рідини в резервуарі. Визначення рівня засноване на різному ступені відбиття рідини і газу.

Радарні давачі рівня не контактують з вимірюваними рідинами, тому їх застосування виправдане за важких умов вимірювань. Високий тиск, високі температури, агресивність середовища або отруйні пари тощо не є перешкодою для застосування давачів цього типу. Радарні датчики рівня забезпечують високу точність вимірювання і можливість обробки отримуваних сигналів. Основою радарного рівнеміра (рис. 5.24) є радіолокатор з антеною, які встановлюються на кришці резервуара.

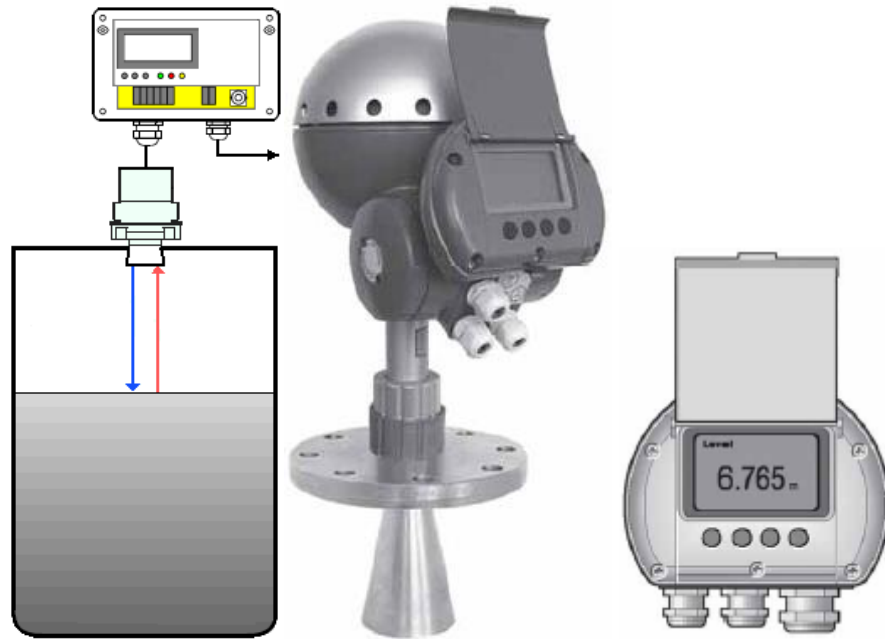


Рисунок 5.24 – Схема застосування радарного рівнеміра, радарний рівнемір Rosemount 5600 та його дисплей (вбудований індикатор)

Принцип вимірювання полягає в наступному. Сигнал радара випромінюється антенною, відбивається від поверхні продукту і приймається антенною знову через проміжок часу  $t$ . Потім сигнал певним чином обробляється в електронному блоці і це дозволяє визначити відстань до лінії розділу фаз. Рівень розраховується як різниця між висотою ємкості і дистанцією до лінії розділу фаз.

Сучасні радарні рівнеміри є «інтелектуальними» пристроями, що поєднують у собі блоки вимірювання і оброблення отриманого сигналу. Електронний блок радарного рівнеміра складає єдине ціле з антенною системою. Даний блок відповідає як за формування зондуючого сигналу, так

і за обробку прийнятого відбитого сигналу. Вимірювальна інформація може відображатися на вбудованому індикаторі блоку, або ж передаватися за допомогою різних аналогових і цифрових інтерфейсів.

Іншою важливою характеристикою, що впливає на формування сигналу є розмір і тип антени. Розрізняють наступні типи антен: рупорна (конічна), стрижньова, трубчаста, параболічна, планарна. Чим більше розмір антени, тим більше сильний і вузькоспрямований сигнал вона випромінює і, в той же час, тим кращий прийом відбитого сигналу.

### **Хвилеводні (рефлексні) рівнеміри**

На відміну від акустичних і радарних рівнемірів, як використовують звукові і радіоімпульси і відносяться до рівнемірів безконтактного типу, хвилеводні рівнеміри використовують мікрохвильові імпульси і відносяться до рівнемірів контактного типу. Хвилеводні рівнеміри також відомі як рефлекс тросові радари. У літературі використовується аббревіатура GWR (GuidedWaveRadar – хвилеводний радар). У основу принципу вимірювання хвилеводних радарів закладений метод прямого вимірювання, заснований на вимірюванні часу проходження мікрохвильовим імпульсом відстані від опорної поверхні до поверхні технологічного середовища.

Хвилеводні рівнеміри за принципом роботи подібні до радарних рівнемірів, але у них електромагнітний імпульс поширюється не в газовому середовищі, а по спеціальному зонду – хвилеводу (рис. 5.25). У якості зондів можуть виступати: стрижень, трос, група тросів, коаксіальний кабель. Мікрохвильові імпульси спрямовуються вниз по зонду, вміщеному в технологічне середовище, рівень якого необхідно визначити. Коли радіоімпульс досягає середовища з коефіцієнтом діелектричної проникності відмінної від проникності повітря то через різницю коефіцієнтів відбувається відбивання сигналу у протилежному напрямі.

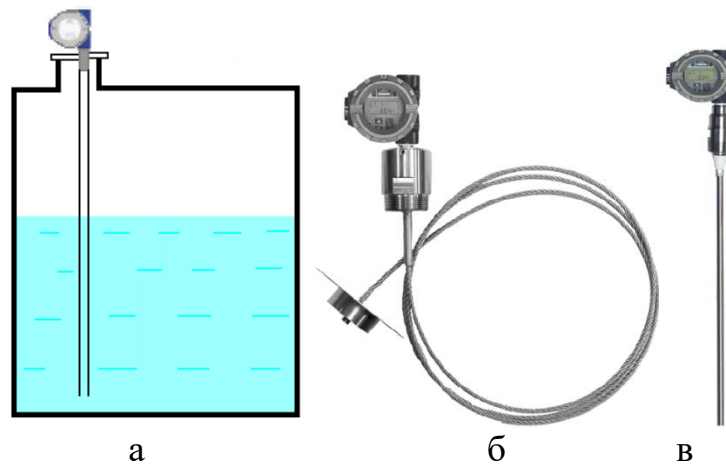


Рисунок 5.25 – Схема вимірювання рівня хвильоводним рівнеміром (а), приклади промислового виконання хвильоводних рівнемірів (б, в)

### Оптичні рівнеміри

Робота оптичних рівнемірів базується на явищах, які пов'язані з проходженням світла через середовища, що утворюють поверхню розділу. Це – відбиття або заломлення світла на поверхні розділу, ослаблення його інтенсивності в поглинаючому середовищі, переривання променя світла тощо. Лазерні оптичні рівнеміри використовуються для вимірювання рівня у складних умовах, в довгих чи високих ємностях з внутрішніми конструкціями. Принцип роботи лазерного рівнеміра ґрунтується на вимірюванні часу поширення інфрачервоного променя від датчика до поверхні матеріалу і назад. Оскільки швидкість світла – величина постійна, то за часом проходження променя можна розрахувати відстань до об'єкту вимірювання (поверхня поділу фаз).

### Вагові рівнеміри

Ваговий метод базується на вимірюванні тиску, який створюється вагою матеріалу в бункері і передається на одну із його опор. Цей тиск є функцією наповнення бункера матеріалом. У вагових рівнемірах, які застосовуються для вимірювання рівня рідких і сипких матеріалів, як первинні перетворювачі використовують гідравлічні месдозы, дифманометри і магнітопружні перетворювачі, які забезпечують досить високу точність вимірювання. Вимірювання рівня з використанням таких первинних

перетворювачів зручно застосовувати для вимірюванні рівня агресивних матеріалів, за встановлених в апараті додаткових пристроїв (наприклад, мішалок). Метод з використанням дифманометрів зручно застосовувати, коли підвішування резервуара або встановлення його на дифманометр не пов'язані з труднощами.

## 5.2 Опис лабораторних засобів та обладнання

Лабораторна установка (рис. 5.26) складається з ємності для рідини, пристроїв для вимірювання рівня рідини у ємності та пристроїв керування. До складу установки також входить резервуар для зберігання рідини, який з'єднано з установкою гнучкими шлангами (на схемі не показаний). Установка призначена для ознайомлення із методами і приладами вимірювання рівня.

Живлення установки забезпечується увімкненням пакетного вимикача *I*. Перекачування рідини з резервуару та заповнення ємності 4 на установці забезпечує вихровий насос, який знаходиться усередині установки і вмикається вимикачем *VI* або кнопкою *V* на передній панелі. Вентиль *II* призначений для зливання рідини з ємності. За допомогою перемикача *IV* здійснюється зміна режиму роботи установки з ручного на автоматичний. Вимикач *III* вмикає автоматичний режим підтримання рівня рідини у ємності.

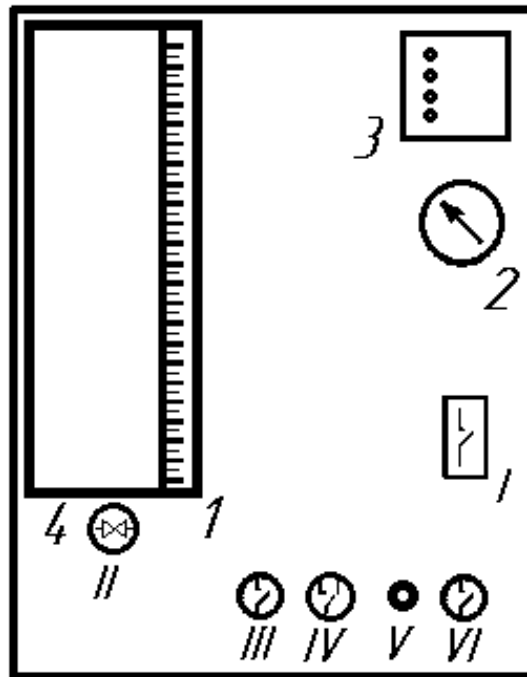


Рисунок 5.26 – Схема лабораторної установки

Мірна лінійка 1 призначена для візуального контролю рівня в резервуарі, прилад 2 – напоромір МТ-2Н зі шкалою 10 кПа, який вимірює тиск стовпа рідини у ємності (гідростатичний рівнемір). Рівень рідини в установці також контролюється приладом ЕСПУ-4 (3), який працює в комплекті з чотирма ємнісними датчиками рівня.

Установка забезпечує подвійний захист від переливання. В момент досягання рідиною верхньої межі рівня за ємнісним датчиком, прилад 3 автоматично вимикає насос. Крім того, ємність обладнана пристроєм переливання.

В ручному режимі роботи дослідник самостійно встановлює рівень рідини за лінійкою 1. В автоматичному режимі рівень рідини підтримується так, щоб не допускати як переливання, так і повного спорожнення ємності. Цей режим забезпечується двопозиційним релейним регулятором, який працює в комплекті з двома магнітно-поплашковими датчиками рівня.

### 5.3 Заходи безпеки під час виконання лабораторної роботи

Під час виконання роботи «Вимірювання рівня» слід враховувати що рідина в установці в установці пройшла хімічне оброблення та не може використовуватися для пиття та побутових цілей.

Під час виконання лабораторних робіт категорично **забороняється**:

- доступ студентам до монтажної частини лабораторної установки;
- виконувати на установці операції, які не передбачені ходом роботи;
- працювати на установці за наявності у ній будь-яких несправностей, проводити самостійне усунення несправностей установки;
- від'єднувати або переміщувати шланги, які з'єднують установку та резервуар з рідиною;
- проводити будь-які роботи на установці без дозволу викладача або відповідального інженерного працівника у лабораторії.

### 5.4 Послідовність виконання роботи

1. Ознайомитися з лабораторною установкою.
2. Подати електричне живлення на стенд пакетними вимикачем *I* (при цьому загоряється контрольна зелена лампа на приладі ЕССУ-4).
3. Увімкнути насос за допомогою перемикача *VI* та встановити в установці заданий рівень рідини за мірною лінійкою 1. За необхідності злити частину рідини за допомогою вентиля *II* або докочати рідину за допомогою кнопки *V*. Занести до таблиці встановлений рівень, тиск стовпа рідини за приладом 2 та індикацію спрацювання ємнісних датчиків рівня за приладом 3.
4. Пункт 3 виконати для 4-5 заданих значень рівня за лінійкою 1 (до 600 мм). Занести до таблиці встановлений рівень, тиск стовпа рідини за приладом 2 та індикацію спрацювання ємнісних датчиків рівня за приладом 3.
5. Після проведеного досліду ввімкнути насос та дочекатися автоматичного спрацювання захисту. Вимкнути насос. Занести до таблиці рівень

спрацювання захисту, тиск стовпа рідини за приладом 2 та індикацію спрацювання ємнісних датчиків рівня за приладом 3.

6. Вимикачем *VI* перевести установку в автоматичний режим підтримання рівня. Відкрити вентиль зливання рідини *II*.
7. Відстежити за мірною лінійкою 1 верхню та нижню межу підтримання рівня в автоматичному режимі. За необхідності дослід повторити.
8. Після закінчення роботи перевести вимикач *VI* у середнє положення, дочекатися повного зливання рідини з ємності та вимкнути установку вимикачем *I*.

Таблиця 5.1

#### Результати дослідження приладів для вимірювання рівня

№ досліду	Вимірне значення рівня			Індикація сигналізатора рівня
	мірна лінійка	Манометр 2		
		прямий хід	зворотний хід	
1				
2				
...				

#### 5.5 Оброблення та аналізування результатів. Оформлення звіту

Звіт повинен містити схеми рівнемірів і установки, результати випробувань, побудовані статичні характеристики приладу 5.

#### Контрольні запитання

1. Як класифікуються прилади для вимірювання рівня за принципом дії?
2. На якому принципі заснована робота візуальних рівнемірів?
3. Чи вплине надлишковий тиск у ємності на покази буйкового рівнеміру?
4. Чи вплине хвилювання поверхні рідини на покази поплавкового рівнеміру?
5. На чому засновано вимірювання рівня радіоізотопним рівнеміром?

6. Які властивості вимірюваної рідини впливають на результат виміру поплавкового рівнеміра? Буйкового рівнеміра? Радіоізотопного рівнеміра?
7. Які прилади можуть бути використані для виміру рівня гідростатичним способом і чому?
8. Яке призначення зрівняльної посудини при гідростатичному способі виміру рівня?
9. На чому заснована дія п'єзометричного рівнеміра?
10. Які принципи покладені в основу роботи оптичних рівнемірів?
11. Які існують типи локаційних рівнемірів?
12. В чому полягає принцип дії радарних рівнемірів?
13. Принцип дії хвилевидного рівнеміра.
14. Які фактори впливають на точність роботи акустичних рівнемірів?
15. В чому полягає принцип дії вагових рівнемірів.
16. За допомогою яких приладів можна виміряти рівень сипких матеріалів?
17. З якою метою деякі рівнеміри розміщують не в резервуарах, а у виносних камерах?
18. Які складності виникають при вимірюванні рівня сипких матеріалів?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

### ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ

**Мета та основні завдання:** Вивчити загальні поняття про методи вимірювання витрат та кількостей речовин. Набути умінь визначати основні метрологічні характеристики засобів для вимірювання витрати та обробляти результати технологічних вимірювань.

**Вивчити та стисло описати у протоколі лабораторної роботи:**

- принцип дії та будову основних приладів вимірювання витрат та кількостей речовин;
- склад лабораторної установки;
- методику проведення досліджень;
- форми для запису результатів вимірювань.

#### 6.1 Основні теоретичні відомості

Для побудови систем автоматизації технологічних процесів завжди доводиться визначати витрати або кількостей речовин, що необхідні для отримання заданого продукту. Вимірювання витрат складають до 15% від загального числа вимірювань в промисловості. Інформація про витрату широко використовується при управлінні технологічними процесами для оптимізації їх режимів. **Кількість речовини** визначають її масою або об'ємом і вимірюють в одиницях маси (кг) або в одиницях об'єму ( $\text{м}^3$ ). Засоби вимірювання кількості речовини за деякий проміжок часу називають лічильниками. Кількість речовини  $V$  в одиницях об'єму, що пройшла через лічильник за вибраний проміжок часу  $\Delta t = t_2 - t_1$ , визначається як різниця показань лічильника  $N_2$  і  $N_1$ , що визначені в моменти часу  $t_2$  і  $t_1$ :

$$V = q_v (N_2 - N_1), \quad (6.1)$$

де  $q_v$  – постійна лічильника, яка визначає кількість речовини, що припадає на одиницю показання лічильника.

**Витратою** називають кількість речовини (маса або об'єм), що протікає через поперечний переріз трубопроводу за одиницю часу. Розрізняють об'ємну витрату ( $Q$ ), що вимірюється у  $\text{м}^3/\text{с}$ ,  $\text{м}^3/\text{год}$ ,  $\text{л}/\text{хв}$  тощо, і масову ( $G$ ) витрату, що вимірюється у  $\text{кг}/\text{с}$ ,  $\text{кг}/\text{год}$ ,  $\text{т}/\text{год}$  тощо. Масова і об'ємна витрати пов'язані між собою залежністю:

$$G = \rho \cdot Q, \quad (6.2)$$

де  $\rho$  – густина.

Витрата рідини з рівним ступенем точності може бути виміряна як об'ємним так і ваговим способом. Проте слід враховувати зміну об'єму (чи густини) рідини при зміні температури (властивість рідини збільшувати свій об'єм в процесі нагрівання). Об'єм рідини після збільшення її температури на величину  $\Delta T = T_2 - T_1$  за постійного тиску буде становити:

$$V_T = V_0(1 + \beta_T \cdot \Delta T), \quad (0.3)$$

де  $V_T$ ,  $V_0$  – об'єм за температур  $T_2$  та  $T_1$ , К;  $\beta_T$  – коефіцієнт об'ємного теплового розширення, який являє собою відносну зміну об'єму рідини при зміні температури на один градус за постійного тиску,  $\text{К}^{-1}$ .

Зміна густини або питомої ваги рідини від температури описується формулами:

$$\rho_T = \frac{\rho_0}{1 + \beta_T \cdot \Delta T}, \quad (0.4)$$

$$\gamma_T = \frac{\gamma_0}{1 + \beta_T \cdot \Delta T}, \quad (0.5)$$

де  $\rho_T$ ,  $\gamma_T$ ,  $\rho_0$ ,  $\gamma_0$  – густина, питома вага при температурах  $T_2$  та  $T_1$ .

Для твердих тіл користуються поняттям насипної густини, яка суттєво залежить від гранулометричного складу речовини. Тому витрата твердих тіл вимірюється ваговим способом. Витрату газів на практиці вимірюють об'ємним методом. Для порівняння результатів декількох вимірювань, що отримані за різних умов, об'єм газу необхідно привести до стандартних або нормальних умов. Об'ємні витрати можна визначити через середню

швидкість потоку  $V_{\text{сеп}}$  та площу поперечного перерізу трубопроводу (рис. 6.1):

$$Q = V_{\text{сеп}} \cdot F, \quad (6.6)$$

де  $F$  – площа поперечного перерізу трубопроводу.

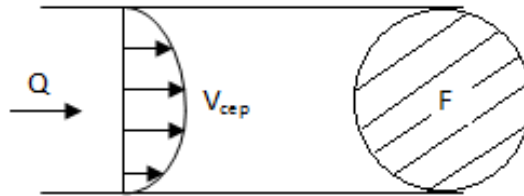


Рисунок 6.1– До визначення витрат

Вимірювання витрати зазвичай здійснюється із двома цілями: необхідність контролювати витрату з метою керування технологічними процесами та необхідність обліку всіх матеріальних і енергетичних потоків. Прилади для вимірювання витрати або кількості речовини можна розділити на 2 класи:

- **лічильники** – прилади для вимірювання кількості речовини, що пройшла через лічильник за деякий проміжок часу. Кількість речовини визначається як різниця показань лічильника. Лічильники, як правило є приладами прямого виміру й відлік по їхній шкалі дає значення вимірюваної величини без усяких додаткових обчислень.
- **витратоміри** – прилади, що вимірюють витрату. Витратомірами рідини (газу) називають вимірювальні прилади або сукупність приладів, призначених для вимірювання витрати рідини (газу).

Необхідно розрізнити поняття «середня витрата» і «миттєва витрата».

Наприклад, середня об'ємна витрата дорівнює:

$$Q_{\text{сеп}} = \frac{V}{t_2 - t_1}, \quad (6.7)$$

де  $V$  – об'єм речовини, виміряний лічильником за час  $t_2 - t_1$ .

Істинною або миттєвою витратою називають похідну від кількості (об'єму  $V$  або маси  $m$ ) за часом  $t$ . Так, для об'ємної і масової миттєвої витрат

відповідно маємо:  $Q = \frac{dV}{dt}$  та  $G = \frac{dm}{dt}$ . Таким чином витратоміри міряють

миттєву витрату. Інтегруючи сигнал витратоміра за часом, можна визначити кількість речовини, що пройшла через витратомір за інтервал часу  $t_2 - t_1$ :

$$V = \int_{t_1}^{t_2} Q dt, \quad (6.8)$$

$$m = \int_{t_1}^{t_2} G dt. \quad (6.9)$$

Витратоміри з інтегруючими пристроями дозволяють вимірювати кількість речовини за будь-який проміжок часу. Прилад вимірювань витрати рідини (газу), призначений для вироблення сигналу вимірювальної інформації у формі, зручній для передачі, подальшого перетворення, обробки і (або) зберігання, але який не піддається безпосередньому сприйняттю спостерігачем називають перетворювачем витрати (чутливим елементом).

### **Класифікація засобів вимірювань витрати та кількості речовин**

Витратоміри і лічильники поділяють на чотири групи.

Група А: Прилади, засновані на гідродинамічних методах:

- 1) змінного перепаду тиску;
- 2) змінного рівня;
- 3) обтікання;
- 4) вихрові;
- 5) парціальні.

Група Б: Прилади з безперервно рухомим тілом:

- 6) тахометричні;
- 7) силові (в тому числі вібраційні).

Група В: Прилади, засновані на різних фізичних явищах:

- 8) теплові;
- 9) електромагнітні;
- 10) акустичні;
- 11) оптичні;
- 12) іонізаційні;

13) ядерно-магнітні.

Група Г: Прилади, засновані на особливих методах:

14) кореляційні;

15) міткові;

16) концентраційні;

17) з тілом, що автоколивається;

18) з рухомою ділянкою трубопроводу;

19) струменеві.

### **Прилади, робота яких заснована на гідродинамічних методах**

Серед приладів цієї групи широке застосування отримали витратоміри зі звужувальними пристроями, що відносяться до приладів змінного перепаду тиску. Для вимірювання малих витрат рідин і газів застосовують ротаметри й поплавкові прилади, які відносяться до витратомірів обтікання (інша назва витратоміри постійного перепаду тиску). Дуже перспективні є і вихрові витратоміри.

**Витратоміри змінного перепаду тиску** – це витратоміри рідини або газу, в яких витрата визначається за перепадом тиску, що утворюється нерухомим пристроєм, який встановлюється у трубопроводі, або є елементом трубопроводу. Найбільшого поширення набули витратоміри зі звужувальними пристроями (або з пристроями звуження потоку).

Принцип дії **витратомірів із звужувальними пристроями** заснований на тому, що при проходженні рідини через місцеве звуження каналу середня швидкість потоку в ньому збільшується, а тиск падає, тобто частина потенціальної енергії потоку перетворюється в кінетичну. Перепад тисків, що при цьому утворюється, залежить від витрати рідини, що протікає через трубопровід, та може бути виміряна диференціальними манометрами.

Вимірювальний комплект витратоміру змінного перепаду тиску (рис.6.2) складається із звужувального пристрою 1, який встановлюється в потік рідини або газу, та дифманометра 2 відградуйованого в одиницях витрати, який вимірює перепад тисків, що створюється на звужувальному пристрої. За

допомогою дифманометра можна отримати стандартний електричний чи пневматичний сигнал і передати його на відстань. Лініями зв'язку між звужувальним пристроєм та дифманометром є з'єднувальні (імпульсні) трубки зі спеціальними пристроями на них.

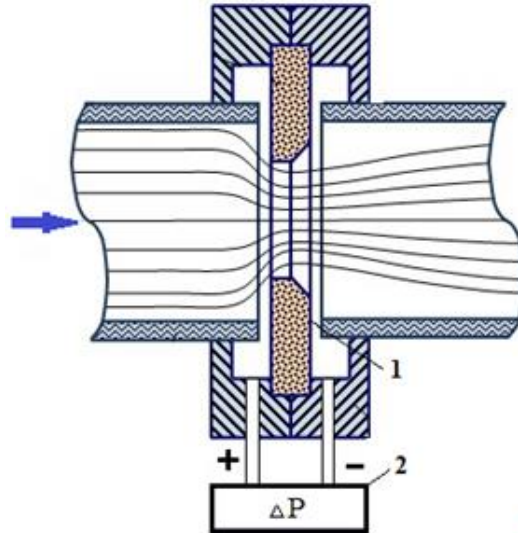


Рисунок 6.2 – Вимірювальний комплект витратоміру змінного перепаду тиску: 1 – звужувальний пристрій (діафрагма); 2 – дифманометр.

Для вимірювання витрат рідини дифманометр встановлюють нижче від звужувального пристрою. Це робиться щоб уникнути впливу газових бульбашок на результати вимірювання. Для вимірювання витрат газів дифманометр розміщують над звужувальним пристроєм, щоб уникнути похибок від потрапляння рідини в прилад. Для вимірювання витрати пари з'єднувальні трубки потрібно заповнити конденсатом і використати зрівняльні посудини.

**Звужувальні пристрої** поділяють на стандартні та нестандартні. Для вимірювання витрат найбільш широко застосовуються нормалізовані (стандартні) звужувальні пристрої: діафрагми (ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2007 (ISO 5167-2:2003)); сопла та сопла Вентурі (ДСТУ ГОСТ 8.586.3-2005 (ISO 5167-3:2003)), труби Вентурі (ДСТУ ГОСТ 8.586.4-2005 (ISO 5167-4:2003)) та ряд інших. Виконання звужувальних пристроїв у суворій відповідності зі стандартами дозволяє використовувати їх без індивідуальних градувань.

Стандартні **діафрагми** є основним типом звужувальних пристроїв. Діафрагма являє собою тонкий диск з круглим отвором (рис.6.3), що має з боку входу потоку гостру прямокутну кромку. Отвір є фасонним: спочатку циліндричним, потім конічним. Товщина діафрагми визначається діаметром трубопроводу, де вона встановлюється, і становить приблизно  $E \approx 0,05D$ , де  $D$  – діаметр трубопроводу. Діаметр отвору діафрагми  $d$  визначається в результаті розрахунку згідно з ГОСТ 8.586.1-2005.

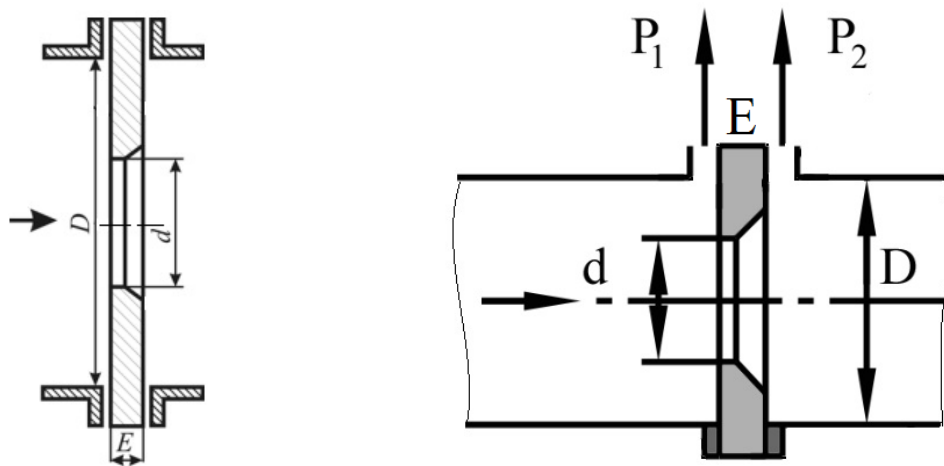


Рисунок 6.3 – Стандартна діафрагма

Діафрагми бувають двох основних типів: безкамерні (рис.6.4), які використовують для вимірювання витрат у трубопроводах з діаметром  $D = 300 \dots 1000 \text{ мм}$ , та камерні (рис. 6.5), які відрізняються наявністю кільцевих камер для відбору тиску і, які використовують для вимірювання витрат у трубопроводах з діаметром  $D = 50 \dots 500 \text{ мм}$ .

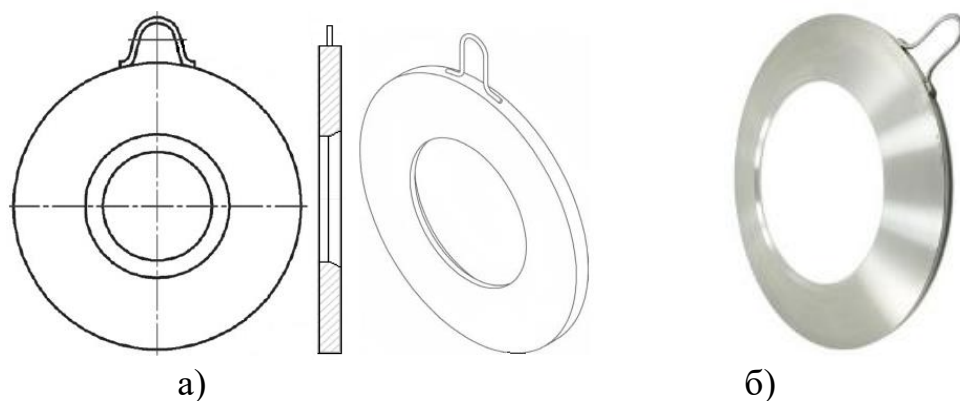


Рисунок 6.4 – Діафрагма безкамерна: а) схема; б) фотографія (діафрагма); 2 – камери; 3 – прокладка

Відбір тисків до і після діафрагми здійснюється за допомогою спеціальних камер і окремих отворів. На рис. 6.6. наведені діафрагми: безкамерна, камерна та камерні в збірці.

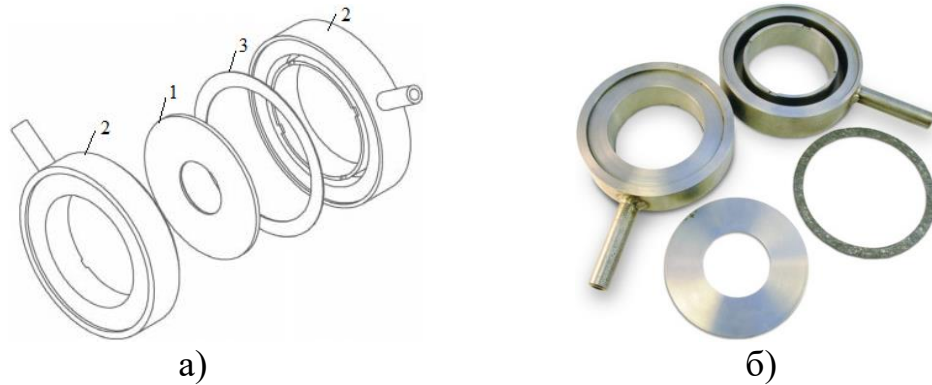


Рисунок 6.5 – Діафрагма камерна: а) схема, б) фотографія; 1 – диск



Рисунок 6.6 – Діафрагми безкамерна, камерна та камерні в збірці

**Сопла.** Сопло ISA 1932 – це сопло, у якого звужувальна частина на вході, утворена дугами двох радіусів, переходить в циліндричну частину на виході (рис.6.7).

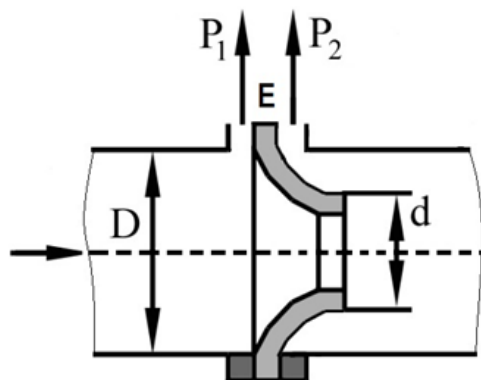


Рисунок 6.7– Сопло ISA 1932

Стандарт ISO 5167-3 визначає можливість використання сопла ISA 1932 для труб діаметром від 50 до 500 мм. Конструкція відбірних пристроїв тиску для діафрагм і сопел однакова.

Профіль **сопла Вентурі** наведено на рис. 6.8. Він складається з вхідних торцевої поверхні, перпендикулярної до осьової лінії сопла, звужувальної частини з заокругленим профілем, циліндричної частини (горловини) і вихідної конічної частини (дифузора). Вхідна торцева поверхня і звужувальна частина сопла Вентурі аналогічні торцевій поверхні і звужувальній частині сопла ІСА 1935. Сопло Вентурі може бути довгим або коротким. У довгого сопла найбільший діаметр вихідного конуса дорівнює діаметру трубопроводу, у короткого він менше діаметра трубопроводу. Сопло Вентурі встановлюють на трубопроводах діаметром від 65 до 500 мм.

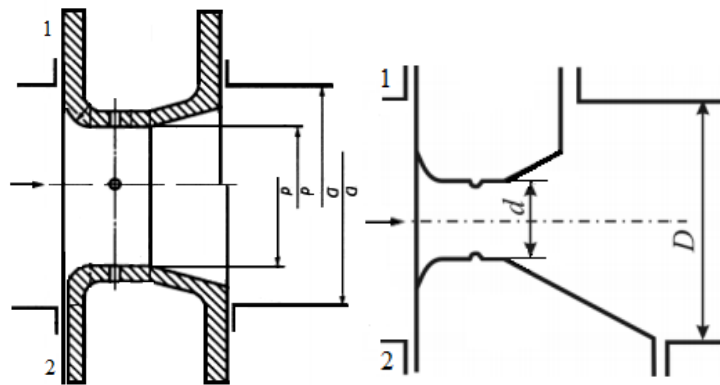


Рисунок 6.8 – Сопло Вентурі: 1 - укорочене сопло Вентурі; 2 - неукорочене сопло Вентурі

Відбір тиску для сопла Вентурі виконують аналогічно з соплами ІСА 1935. Відбір тиску в горловині проводять через окремі отвори, з'єднані за схемою або за допомогою кільцевої камери усереднення (або п'єзометричного кільця).

**Труба Вентурі** (рис.6.9) складається з циліндричного вхідного патрубку 1, вхідного конуса 4, горловини (циліндрична частина) 5 і дифузора (вихідний конус) 6. У вхідному конусі і горловині виконані кільцеві камери 2, що призначені для усереднення тиску. Вони сполучаються з внутрішніми порожнинами вхідного конуса і горловини за допомогою декількох отворів 3.

Труба Вентурі називається довгою, якщо найбільший діаметр вихідного конуса дорівнює діаметру трубопроводу, або короткою, якщо зазначений діаметр менше діаметра трубопроводу. Труба Вентурі встановлюється на трубопроводах діаметром від 50 до 1400 мм.

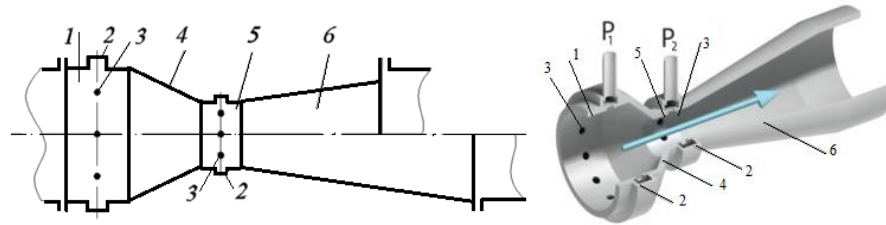


Рисунок 6.9 – Труба Вентурі: 1 – циліндричний вхідний патрубок; 2 – кільцеві камери; 3 – отвори; 4 – вхідний конус; 5 – горловина (циліндрична частина); 6 – дифузор (вихідний конус)

При виборі пристрою звуження необхідно враховувати наступне. Характер потоку й розподіл тиску однаковий у всіх типах звужувальних пристроїв. Втрати тиску у звужувальних пристроях збільшується в такій послідовності: труба Вентурі, довге сопло Вентурі, коротке сопло Вентурі, сопло, діафрагма. Сопла Вентурі дозволяють вимірювати витрати з малими втратами, оскільки за формою вони нагадують стислий струмінь і зон завихрення на них практично не створюється. На практиці найчастіше застосовується дросельна шайба, оскільки має невисоку вартість і проста у виготовленні. При встановленні звужувальних пристроїв необхідно дотримуватися ряду умов, що впливають на похибку вимірювань. Звуження потоку в трубопроводі має відбуватися перпендикулярно осі трубопроводу. Ось звужувального пристрою повинна збігатися з віссю трубопроводу. Важливою умовою є необхідність забезпечення сталого плинного потоку перед входом в звуження потоку і після нього. Такий потік забезпечується наявністю прямих ділянок трубопроводу певної довжини до і після звужуючого пристрою.

**Витратоміри з напірними пристроями (витратоміри швидкісного напору)** базуються на залежності витрати від перепаду тисків, що виникає в

результаті переходу кінетичної енергії частини потоку в потенціальну, і який вимірюють пневмометричними трубками в комплекті з дифманометрами. Відповідно до рівняння Бернуллі різниця між повним і статичним тисками дорівнює динамічному тиску ( $P_n = P_c + P_g$ ):

$$P_n - P_c = \frac{\gamma W^2}{2g}, \quad (6.10)$$

де  $P_g$  – динамічний тиск,  $P_c$  – статичний тиск,  $P_n$  – повний тиск;  $W$  – швидкість руху середовища;  $\gamma$  – питома вага вимірюваного середовища.

Звідки швидкість  $W$ :

$$W = \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (P_n - P_c)} = \sqrt{\frac{2g}{\gamma} P_g}, \quad (6.11)$$

Динамічний напір вимірюють пневмометричними трубками в комплекті з дифманометрами (рис.6.10). За допомогою пневмометричної трубки 1 вимірюють статичний тиск, а пневмометричної трубки 2 (трубки Піто) – повний тиск. Трубка 2 має Г-подібну форму і направлена назустріч потоку. Дифманометр 3, що з'єднує обидві трубки, показує різницю між повним і статичним тиском, тобто динамічний тиск  $P_g$ . За його значенням визначають швидкість потоку  $W$  та витрату вимірюваного середовища.

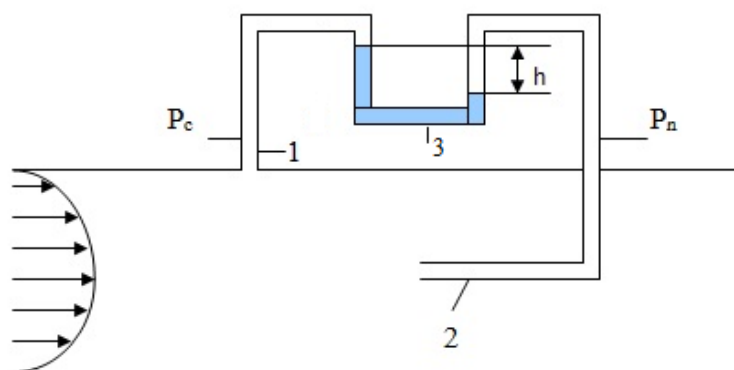


Рисунок 6.10 – Витратомір швидкісного напору: 1, 2 – пневмометричні трубки; 3 – стандартний дифманометр

Для практичного використання в формулу (6.12) вводять поправочний коефіцієнт  $\xi$ , який враховує конструктивні особливості трубок та реальні

властивості потоку, що рухається. Коефіцієнт  $\xi$  для різних конструкцій трубок визначається дослідним шляхом. Тоді:

$$W = \xi \sqrt{\frac{2g}{\gamma} P_g} . \quad (6.12)$$

Витратомір включає в себе диференціальну трубку, яка складається з вимірювального циліндру, що має центральний отвір для сприйняття повного тиску. На вимірювальному циліндрі є отвори для відбору статичного тиску. Найчастіше використовують диференціальну трубку Піто (комбіновану), як показано на рисунку 6.11.

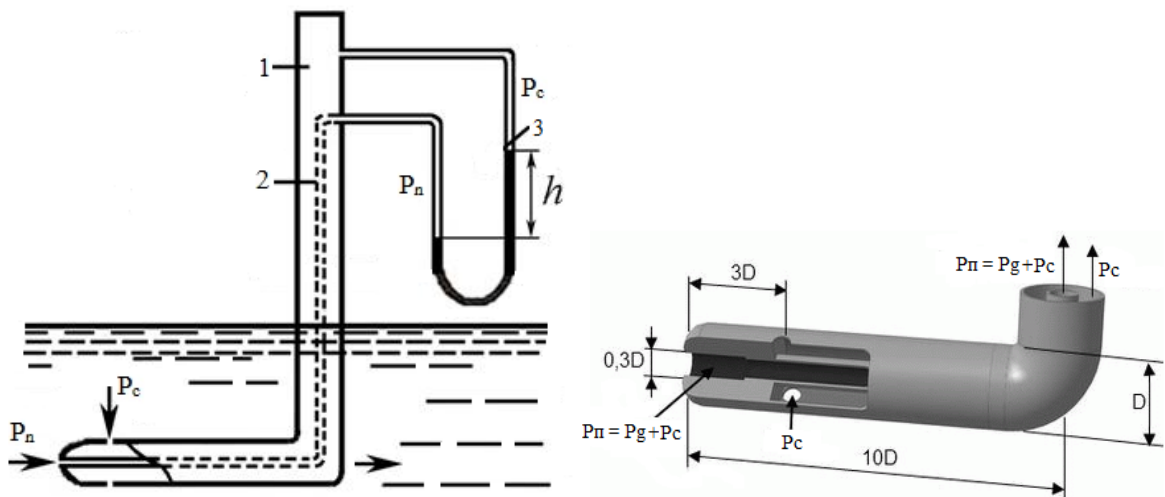


Рисунок 6.11 – Витратомір швидкісного напору з диференціальною трубкою Піто та фрагмент такої трубки: 1, 2– пневмометричні трубки для відбору статичного тиску та повного тиску, відповідно; 3 – стандартний дифманометр

Метод швидкісного напору має ряд переваг, до яких належать: простота виготовлення та застосування; простота реалізації вихідного сигналу за допомогою дифманометра; трубка практично не спотворює потоку і втрати напору малі; можливість вимірювання витрати в трубопроводах некруглого перерізу. До недоліків відносять: незначну величину динамічного напору; чутливість до орієнтації трубки в потоці рідини, яка повинна встановлюватись всередині трубопроводу паралельно потоку. Ці витратоміри застосовуються переважно при експериментальних роботах для вимірювання

витрати рідини й газів трубопроводах великих діаметрів і при великих швидкостях потоку, а також у трубопроводах некруглого перерізу.

**Витратоміри змінного рівня.** Робота витратомірів змінного рівня базується на залежності між витратами і висотою рівня рідини в посудині, в яку безперервно надходить рідина і з якої вона витікає через отвір у дні або в боковій стінці посудини. Для вимірювання рівня в посудині застосовують будь-які стандартні рівнеміри.

Посудина може бути відкритою, якщо рідина витікає з труби в відкриту ємність, або закритою, якщо ємність, в яку витікає рідина, знаходиться під тиском. Витратоміри можуть бути з повністю або частково затопленим отвором для витікання. У першому випадку отвір, як правило, круглий і розташовується в дні посудини (іноді отвір може перебувати внизу бокової стінки). У другому випадку отвір для витікання розташований в боковій стінці посудини і має форму щілини. Саме тому ці витратоміри ще називають щілинними витратомірами. Посудина з отвором для витікання може бути нерухомою, як це буває у більшості витратомірів цього типу, або рухомою. В останньому випадку обов'язково вимірюють вагу посудини, оскільки вона зв'язана з висотою посудини, а значить з витратою рідини.

Витратоміри змінного рівня зазвичай застосовують для неперервного вимірювання витрати агресивних рідин, суспензій, стічних вод і забруднених рідин, сумішей рідин і газів (нафтогазові суміші).

**Витратоміри з затопленим отвором для витікання.** Цей різновид можна розглядати, як частинний випадок витратомірів змінного перепаду тисків. Як отвори для витікання зазвичай використовують діафрагми. Схема витратоміра змінного рівня з діафрагмою, що встановлена в дні посудини наведена на рисунку 6.12.

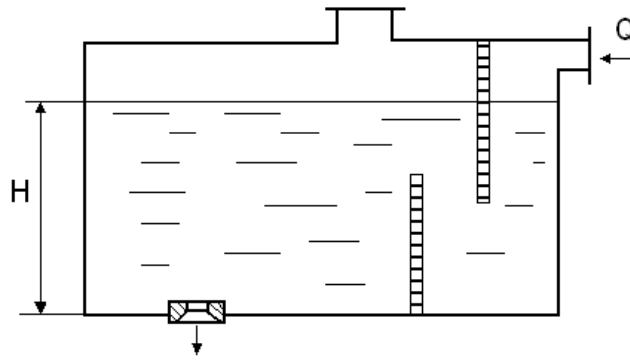


Рисунок 6.12 – Схема витратоміра змінного рівня з діафрагмою, що встановлена в дні посудини

Рідина безперервно надходить в посудину по трубі, проходить через систему перегородок і стікає через отвір діафрагми, що розташований в дні посудини. Перегородки служать для того, щоб зменшити вплив динамічного тиску рідини на характер витікання рідини з діафрагми, а також відіграють роль фільтра, що запобігає засміченню діафрагми. Щоб найближча бокова стінка не впливала на напрям струменів, які притікають до діафрагми, відстань від її осі до бічної стінки не повинна бути менше трьох діаметрів отвору діафрагми. Витрату рідини, що протікає через діафрагму визначають за формулою:

$$Q_v = \alpha F_0 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}, \quad (6.13)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт витрати діафрагми;  $F_0$  – площа отвору діафрагми;  $\Delta P$  – перепад тисків, який дорівнює  $\Delta P = \rho g H$ ;  $\rho$  – густина рідини;  $H$  – рівень рідини в посудині.

Після підстановки  $\Delta P$  в формулу визначення витрати отримаємо:

$$Q_v = \alpha F_0 \sqrt{2gH}. \quad (6.14)$$

Звідки витікає, що витрата рідини визначається її рівнем в посудині та не залежить від густини. Це рівняння буде справедливим, якщо діафрагма буде встановлена в боковій стінці посудини ( $H$  – рівень рідини в посудині від осі отвору діафрагми).

Такі витратоміри застосовують для вимірювання невеликих витрат рідини, бо для вимірювання великих витрат треба застосовувати вимірювальні посудини великої висоти.

**Щілинні витратоміри.** Найбільшого поширення набули прилади з отворами щілинної форми, що розташовані в боковій стінці. Спеціальний профіль щілини забезпечує пропорційність між витратою і висотою рівня в посудині. Існує багато видів отворів для щілинних витратомірів (рис.6.13). Від форми отвору залежить шкала витратоміра. Найпростішим є отвір прямокутної форми. Однак шкала приладу з таким отвором нерівномірна і в цьому його істотний недолік. Більш рівномірна шкала при отворі в формі симетричної трапеції, яка звужується до верху. Лінійну шкалу (в межах від 10 до 100%) можна отримати при отворі, яке називається профілем Сутро. На практиці часто застосовують несиметричний профіль Сутро з однією криволінійною кромкою, бо такі отвори легше виготовляти.

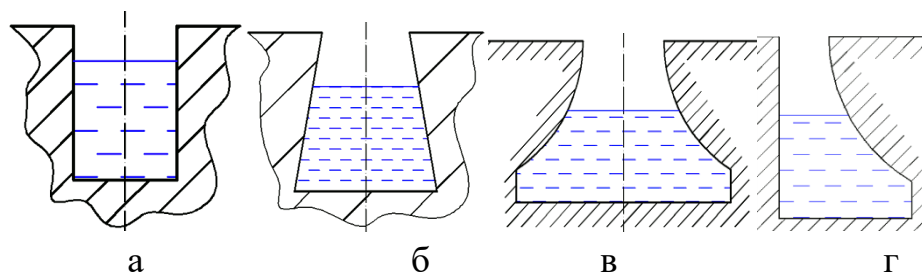


Рисунок 6.13– Отвори для щілинних витратомірів: а– отвір прямокутної форми; б– отвір форми симетричної трапеції; в – профіль Сутро;г – несиметричний профіль Сутро

Схема щілинного витратоміра наведена на рисунку 6.14.В посудині зі щілинним витратоміром витрату визначають за висотою рівня рідини над нижньою кромкою отвору для витікання. Рівень рідини в посудині не повинен бути вищим за верхній край щілинного отвору.

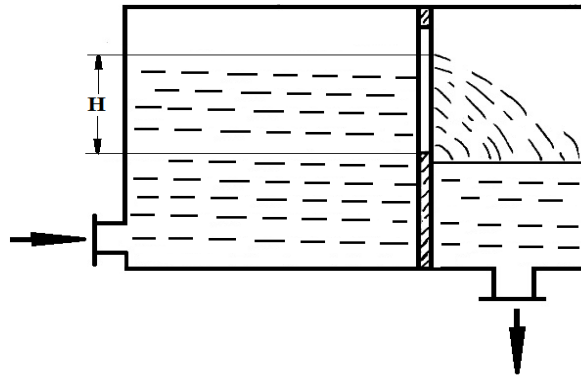


Рисунок 6.14 – Схема щілинного витратоміра

За значенням рівня  $H$ , що визначений за допомогою будь-якого стандартного рівнеміра, отримують значення витрати. Для приладів з лінійною шкалою витрата буде пропорційна виміряному рівню:  $Q = KH$ , де  $K$  – коефіцієнт пропорційності. Коефіцієнти пропорційності щілинного отвору для витікання залежать від декількох факторів: ширини і профілю отвору; висоти рівня рідини; в'язкості рідини; стану вхідної кромки отвору; та ін.

### Витратоміри обтікання

**Витратоміри постійного перепаду тиску.** Витратоміри постійного перепаду тиску є витратомірами дросельного типу. До цих витратомірів належать ротаметри, поплавкові й поршневі витратоміри. Принцип їх дії заснований на зміні перерізу вихідного отвору при підйомі поплавка або поршня і на зрівноважуванні ваги поплавка або поршня зусиллям, що створене перепадом тисків на цих елементах. Оскільки вага поплавка є постійною величиною, то постійна й сила, що її врівноважує. Тому ці витратоміри називаються витратомірами постійного перепаду.

**Ротаметри** є найбільш поширеними приладами серед витратомірів постійного перепаду тиску. Ротаметр (рис.6.15) складається з прозорої конічної трубки (найчастіше скляної), що розходитьса вгору, всередині якої розташований поплавок. Потік рідини або газу, що проходить через ротаметр, переміщає поплавок всередині конусної трубки. Підйом поплавка виражає безпосередньо величину витрати. Піднявшись настільки, що сила тяжіння врівноважує підйомну силу з боку потоку, поплавок зупиняється. Таким чином, кожному положенню поплавка відповідає певна витрата.

Верхній зріз поплавка є показчиком приладу – по ньому проводиться відлік по шкалі ротаметра при знятті результатів вимірювань. Шкала приладу наноситься на зовнішній стороні трубки (зазвичай  $0 \div 100\%$ ), яка потім градується. У верхній частині поплавка (рис.6.15) виконуються косі прорізи, завдяки чому він обертається навколо своєї осі. Для монтажу пристрою на трубопровід призначені спеціальні штуцери.

Поплавок буде нерухомо висіти в потоці рідини або газу, якщо сили, що діють на нього зверху і знизу, будуть рівними між собою:

$$p_1 - p_2 = \frac{(G - W - N)}{f} \quad (6.15)$$

де  $p_1 - p_2$  – різниця статичних тисків перед поплавком та після нього;  $G$  – сила тяжіння, що діє на поплавок;  $W$  – динамічний тиск потоку;  $N$  – сила тертя потоку об поверхню поплавка;  $f$  – площа максимального поперечного перерізу поплавка.

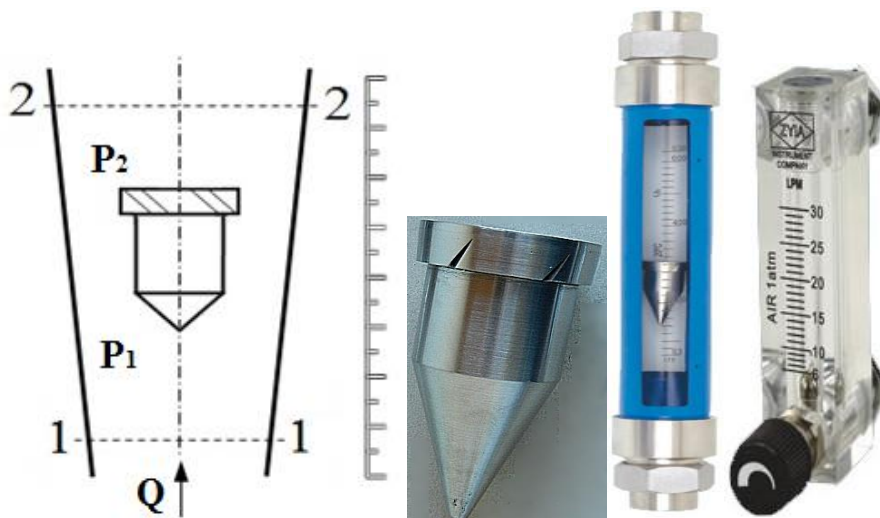


Рисунок 6.15 – Схема ротаметра, поплавок та приклади промислових ротаметрів

Якщо знехтувати силами  $W$  і  $N$ , то отримаємо:

$$p_1 - p_2 = \frac{G}{f} = const \quad (6.16)$$

Таким чином, перепад тиску на поплавку виявляється незалежним від витрати. Для вхідної витрати  $Q$  поплавок займає положення, яке характеризується площею кільцевого зазору  $f_{к1}$ . В цей момент на поплавок діє

перепад ( $p_1-p_2$ ), за якого і виконується рівняння 6.16. При збільшенні витрати в перший момент положення поплавка і площа кільцевого зазору  $f_{к1}$  будуть незмінні, в силу чого перепад ( $p_1-p_2$ ) почне збільшуватися. Рівновага порушується, створюється виштовхуюча сила і поплавок почне рухатися вгору. При цьому буде збільшуватися площа кільцевого зазору між поплавком і стінкою ротаметру, що в свою чергу приводить до вирівнювання перепаду тисків на поплавок. Чим вище поплавок, тим більше площа навколо нього, через яку рухається потік. Підйом поплавка буде здійснюватися до нового положення рівноваги. Будь-якій витраті відповідає певна площа кільцевого зазору, тобто певне положення поплавка.

Межі вимірювання ротаметра змінюють змінивши вагу поплавка. Поплавки для ротаметрів виготовляють з різних матеріалів: іржостійкої сталі, титану, алюмінієвих сплавів, фторопласту-4 і різних пластмас в залежності від діапазону вимірювання та агресивності вимірюваного середовища. За необхідності поплавок роблять порожнистим для зменшення його ваги. Для ротаметрів малих витрат іноді використовують полавки у вигляді кулі.

Трубка ротаметра може бути і не конічною. В цьому випадку можна використовувати конічне тіло, що розміщено в циліндричній трубці, або конічний клапан у циліндричному сидлі. Межі застосування звичайних ротаметрів зі скляними трубками: по тиску  $0,5\div 0,6$  МПа; по температурі  $100\div 150$  °С.

Переваги ротаметрів: простота пристрою та його використання, мала вартість, рівномірність шкали витратоміра; можливість вимірювання малих витрат рідин і газів; малі втрати напору на поплавок. Ротаметри можна використовувати для вимірювання напору агресивних середовищ. Недоліки: мала механічна міцність; складно здійснювати запис інформації й її передачу на відстань.

Більшість недоліків можна усунути у випадку виготовлення трубки з металу і використанні дистанційної передачі. Але втрачається простота пристрою та наочність показань, різко зменшується хід поплавка.

Конструкція приладів суттєво змінюється і їх рекомендують називати не металевими ротаметрами, а поплавковими витратомірами.

**Поплавкові витратоміри.** На відмінність від скляних ротаметрів у поплавкових витратомірів трубка виготовляється з металу, хід поплавка невеликий і він має іншу форму. Такі витратоміри забезпечують перетворювальними пристроями з електричним або пневматичним вихідними сигналами. Принцип дії цих витратомірів такий самий як у ротаметрів. Поплавок в цих пристроях жорстко зв'язаний з осердям або магнітом для дистанційної передачі. Хід поплавка не перевищує  $40 \div 70$  мм. В цих приладах проточна частина може мати різну форму (рис. 6.16).

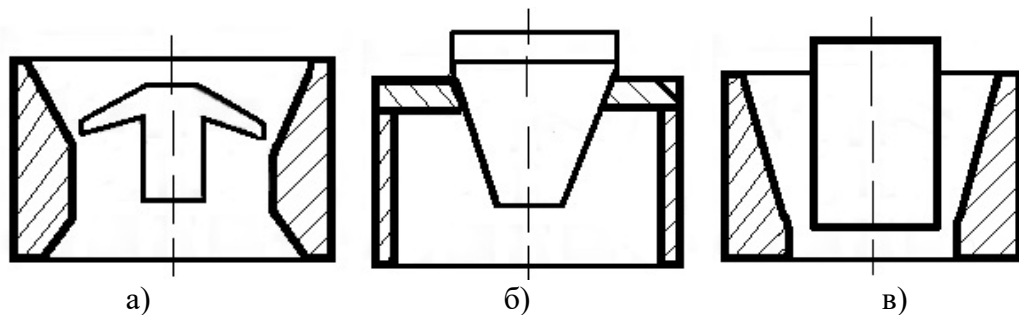


Рисунок 6.16 – Схема поплавкових пар у поплавкових витратомірів

Перша поплавок пара (рис. 6.16.а) складається з грибоподібного поплавка, який переміщається в конічній розточці. Ця пара застосовується для вимірювання малих витрат (для води  $0,025-0,4 \text{ м}^3/\text{год}$ ). Друга поплавок пара (рис. 6.16.б) складається з конічного поплавка, який переміщається в круглому отворі. Ця пара застосовується для вимірювання середніх витрат (для води  $0,063-16 \text{ м}^3/\text{год}$ ). Третя поплавок пара (рис. 6.16.в) складається з циліндричного поплавка, який переміщається в конічному отворі. Ця пара застосовується для вимірювання великих витрат (для води  $16-63 \text{ м}^3/\text{год}$ ). Схеми поплавкових витратомірів з конічним поплавком та з електричною дистанційною системою передачі показань наведені на рис. 6.17.

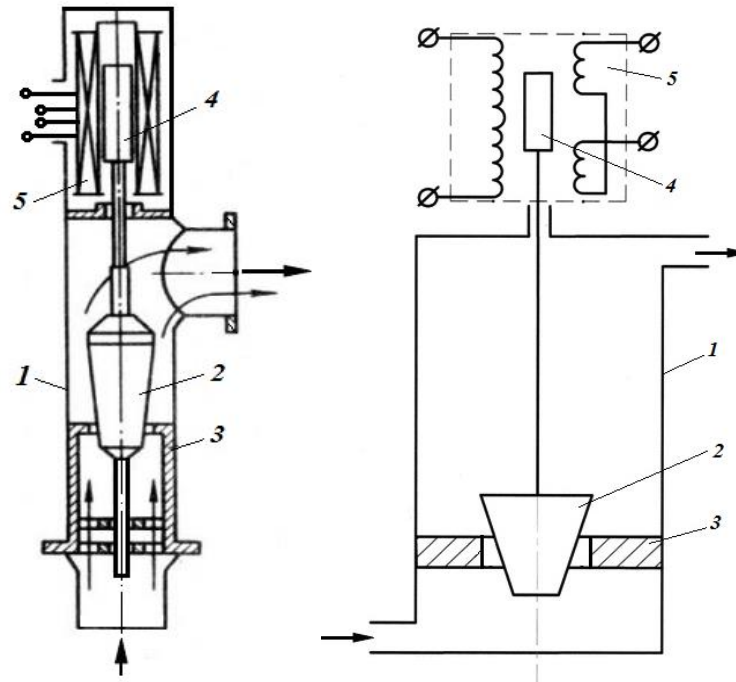


Рисунок 6.17– Схеми поплавкових витратомірів з конічним поплавком: 1 – металевий корпус; 2 – поплавок; 3 – діафрагма; 4 – осердя; 5 – диференціально-трансформаторний перетворювач

Поплавковий витратомір з конічним поплавком має металевий корпус 1, всередині якого розташовані конічний поплавок 2 з діафрагмою 3. При зміні витрати поплавок переміщується, змінюючи прохідний перетин діафрагми. Поплавок через тягу пов'язаний з осердям 4 диференціально-трансформаторного перетворювача 5, вихідний сигнал якого використовується в схемах контролю і управління. Поплавкові витратоміри зазвичай розраховані на робочій тиск 6,27 МПа. Основна допустима похибка цих приладів не перевищує 2,5-3% від верхньої межі вимірювань.

**Поршневі** або **золотникові витратоміри** – це різновид витратомірів постійного перепаду тиску, у яких замість поплавка використовують поршень, що переміщується у втулці з вікнами особливої форми. Вимірювана речовина надходить під поршень, піднімає його і виходить через вікно або проріз у втулці. Тиск над поршнем той же, що і в вихідному штуцері, а під поршнем такий, як і на вході у витратомір. Чим більше витрата, тим вище піднімається поршень, і відкриває все більшу частину отвору у втулці. Перепад тисків на поршні зберігається постійним.

Вибираючи належний профіль прорізу, можна отримати бажану залежність між витратою і переміщенням поршня. Схема поршневого витратоміра наведена на рисунку 6.18.

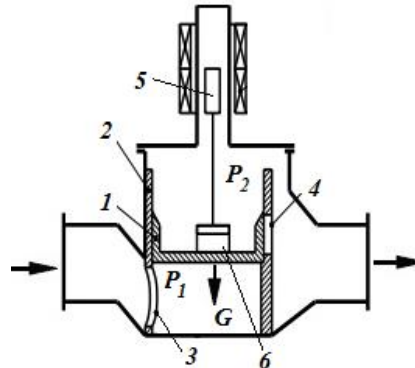


Рисунок 6.18 – Схеми поршневого витратоміра. 1 – поршень; 2 – втулка; 3 – круглий отвір; 4 – прямокутний отвір; 5 – осердя; 6 – тягарі

Поршень 1, що є чутливим елементом поршневого витратоміра, знаходиться всередині втулки 5. Втулка має круглий отвір 3 на вході та прямокутний – 4 на виході. Рідина, що поступає через круглий отвір на вході, надходить безпосередньо під поршень і піднімає його. При зміні витрати поршень переміщується, змінюючи прохідний перетин прямокутного отвору. Рідина, що пройшла через прямокутний отвір одночасно заповнює й простір над поршнем. Поршень через тягу пов'язаний з осердяем 5 системи передач. У поршковому витратомірі вага поршня  $G$  з тягарями 6 і вагою штока з осердяем 5 врівноважується перепадом тисків ( $P_1 - P_2$ ) до і після вихідного прямокутного отвору 4 в боковій стінці циліндра. Вага поршня регулюється тягарями 6, що дозволяє змінювати пропускну здатність витратоміра. Прямокутна форма отвору на виході забезпечує лінійну залежність між положенням поршня та витратами речовини.

Види дистанційних передач поршневих витратомірів такі ж, як і у поплавкових витратомірах. Поршневі витратоміри використовуються менше ніж ротаметри та поплавкові витратоміри. Ці витратоміри можна застосовувати для вимірювання витрати в'язких середовищ.

**Витратоміри обтікання з поворотною лопаттю.** Принцип роботи заснований на вимірюванні гідродинамічного тиску, що сприймається тілом, розміщеним у потоці. Конструкція витратоміра реалізується шляхом підвішування у трубопроводі лопаті, яка сприймає гідродинамічний тиск рідини чи газу, що протікає по трубопроводу. Витрата визначається за кутом повороту лопаті або за величиною сили протидії, що зрівноважує тиск потоку. Схеми витратомірів з поворотною лопаттю показано на рисунку 6.19.

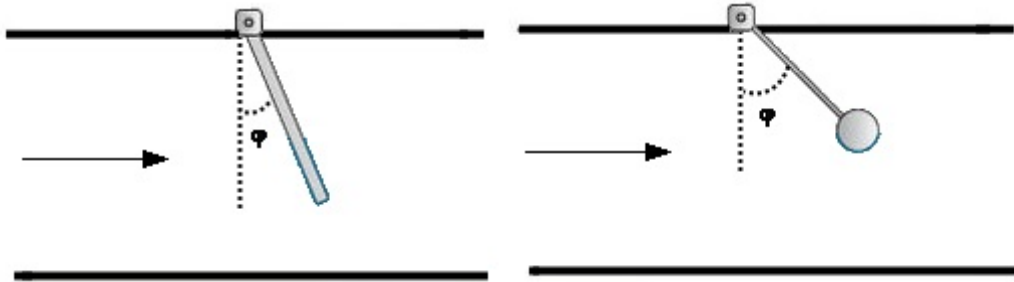


Рисунок 6.19 – Схеми витратоміра обтікання з поворотною лопаттю

Кут повороту лопаті для вимірювання витрат рідин не повинен перевищувати до  $70\div 80^\circ$ , а для газів –  $60^\circ$ . При великих кутах повороту різко знижується чутливість датчика та стає неприпустимо великою його вібрація. Для боротьби з вібраціями на лопаті роблять ряд невеликих отворів для вирівнювання тиску.

### Вихрові витратоміри

Принцип дії вихрових витратомірів ґрунтується на «ефекті Кармана» (на честь дослідника Теодора фон Кармана), згідно з яким при обтіканні нерухомого твердого тіла, що розміщено в потоці контрольованого середовища, за тілом утворюються вихрові доріжки, що складаються з вихорів, які по черзі зриваються з протилежних сторін тіла. На рисунку 6.20 показано обтікання циліндричного тіла потоком і утворення вихорів.

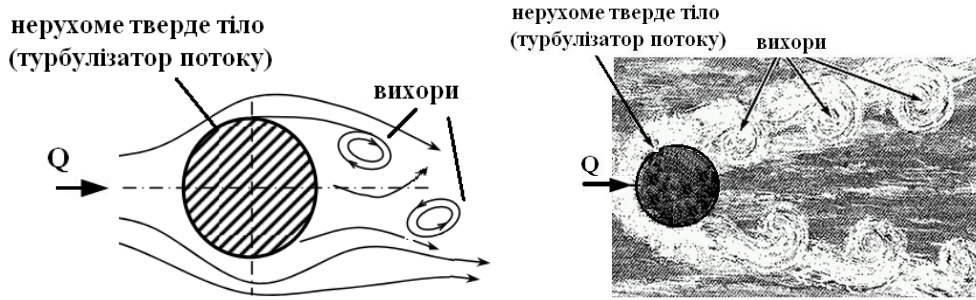


Рисунок 6.20 – Обтікання циліндричного тіла потоком з утворенням вихорів

Частота утворення і зриву вихорів за тілом пропорційна швидкості потоку та розмірам тіла обтікання. За постійного характерного розмірі тіла частота пропорційна швидкості, а значить і об'ємній витраті. Тіла обтікання можуть мати різну форму: трикутну, трапецієподібну, круглу, прямокутну тощо(рис.6.21).



Рисунок 6.21 – Форми тіл обтікання вихрових витратомірів

Для визначення характеристик вихрових витратомірів оперують поряд з числом Рейнольдса  $Re$  також числом Струхалія  $Sh$ . Число Струхалія (безрозмірна величина) є критерієм подібності нестационарних течій рідин і газів, що характеризує сталість протікання процесів в часі. Одна з формул, що описує число Струхалія:

$$S = f \cdot D / V, \quad (6.17)$$

де  $f$  – частота утворення вихорів;  $D$  – характерна довжина (наприклад, гідравлічний діаметр – діаметр трубопроводу);  $V$  – швидкість потоку.

Число Струхалія є функцією числа Рейнольдса  $Re$ , і в діапазоні  $200 < Re < 200\ 000$  діє емпіричний закон сталості числа Струхалія:  $Sh \approx 0,5$ . Оскільки число Струхалія має постійне значення, то частота утворення вихорів  $f$  буде пропорційною швидкості потоку  $V$ . Таким чином за виміряною частотою можна визначити швидкість потоку, а значить і об'ємну витрату. За

відомої площі перерізу витратоміра об'ємна витрата  $Q$  пов'язана з частотою залежністю:

$$f=k \cdot Q, \quad (6.18)$$

де  $k$  – коефіцієнт пропорційності вихрового витратоміра, який визначають градуванням приладу.

Залежно від способу детектування частоти вихорів розрізняють **вихрові** і **вихороакустичні** витратоміри.

У загальному вигляді, вихровий витратомір складається з двох частин: первинного перетворювача і вторинного перетворювача (електронного блоку обробки сигналу). Первинний перетворювач включає в себе вихороперетворювач (тіло обтікання) і пристрій детектування вихорів (сенсор). будова первинного перетворювача наведена на рисунку 6.22.

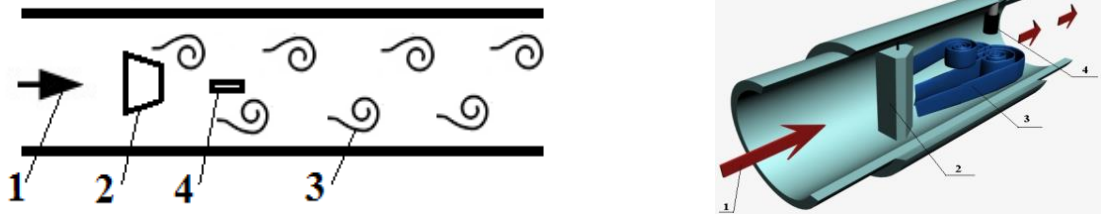


Рисунок 6.22 – Схема первинного перетворювача вихрового витратоміра: 1 – потік речовини; 2 – тіло обтікання; 3 – вихори; 4 – сенсор

Для детектування вихорів за тілом обтікання, або всередині нього, встановлюється сенсор. У таких витратомірах може використовуватися кілька варіантів перетворення коливань вихрового потоку на вихідний сигнал. У вихровому витратомірі, що показано на рисунку 6.23, визначення частота утворення вихорів проводиться за допомогою двох п'єзодавачів, які фіксують пульсації тиску в зоні утворення вихорів. У корпусі проточної частини давача розміщені первинні перетворювачі об'ємної витрати, надлишкового тиску і температури.



*Рисунок 6.23*– Схема вихрового витратоміра з п'єзоелектричними перетворювачами: 1 – тіло обтікання; 2 – перетворювач надлишкового тиску 3 – п'єзоелектричні перетворювачі пульсацій тиску; 4 – термоперетворювач опору; 5 – мікропроцесорний пристрій та приклад промислового витратоміра

На вході в проточну частину датчика встановлено тіло обтікання 1. Перетворювач надлишкового тиску 2 тензометричного принципу дії розміщений перед тілом обтікання поблизу його кріплення. За тілом обтікання симетрично розташовані два п'єзоелектричних перетворювача пульсацій тиску 3. Термоперетворювач опору 4 розміщений всередині тіла обтікання. Для забезпечення безпосереднього контакту вимірюваного середовища і термоперетворювача опору в тілі обтікання виконані спеціальні отвори. Мікропроцесорний пристрій оброблює сигналів перетворювачів пульсацій тиску, надлишкового тиску та температури. В процесі оброблення відбуваються фільтрація паразитних складових, зумовлених впливами вібрацій, флуктуації тиску й температури потоку, та формування вихідних сигналів витрати, тиску та температури.

До переваг вихрових витратомірів слід віднести то, що вони не мають рухомих елементів усередині трубопроводу, надають можливість вимірювання витрат забруднених та агресивних потоків рідини, пари та газу. Як недоліки цих витратомірів слід відзначити значні втрати тиску, та непридатність до вимірювання потоків, що рухаються з малою швидкістю.

Різні моделі вихрових витратомірів мають клас точності 1...5. Їх можна встановлювати на трубопроводах діаметрами 15...2000 мм для газів та

50...1200мм для рідин, забезпечуючи вимірювання витрати газів у діапазоні 9...2000000 м<sup>3</sup>/год, рідин – 1...25000 м<sup>3</sup>/год.

### Вихороакустичні витратоміри

У вихороакустичних витратомірах в якості тіла обтікання застосовується призма трапецієподібного перерізу, а детектування вихорів здійснюється за допомогою ультразвукових пристроїв. Тому їх також називають вихровими ультразвуковими витратомірами. Схема вихороакустичного витратоміра показана на рисунку 6.25

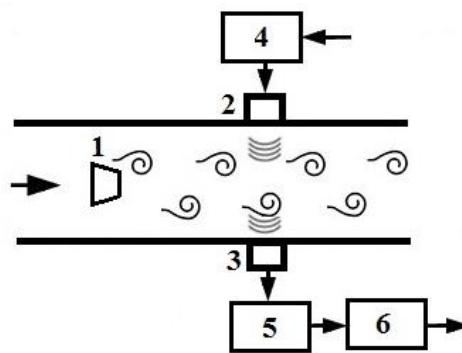


Рисунок 6.24 – Схема вихороакустичного витратоміра: 1 – тіло обтікання; 2 – п'єзовипромінювач; 3 – п'єзоприймач; 4 – генератор; 5 – фазовий детектор; 6 – електронний блок

Конструктивно прилад складається з корпусу проточної частини і електронного блоку. Тіло обтікання – призма трапецієподібного перерізу – 1 розташовано на вході проточної частини і при обтіканні за ним утворюються вихрові доріжки. Частота проходження цих вихорів буде пропорційна витратам. За тілом обтікання розташовані ультразвуковий п'єзовипромінювач 2 та діаметрально протилежно йому п'єзоприймач 3, які використовуються для детектування вихорів. На випромінювач від генератора 4 подається змінна напруга, яка перетворюється в ультразвукові коливання. Збурений тілом обтікання потік спотворює сигнал п'єзовипромінювача, в результаті чого ультразвукові коливання при проходженні через потік і взаємодії з вихорами буде модульованими по фазі, яка фіксується п'єзоприймачем

сигналу, перетворюється в електричний сигнал і направляються на фазовий детектор 5. Далі в електронному блоці 6 сигнал перетворюється в напругу, яка за частотою й амплітудою відповідає частоті утворення вихорів і відповідно об'ємній витраті.

Прилади відрізняються високою чутливістю, що дозволяє їх використовувати для вимірювань низьких витрат. Залежність точності вимірювань від температури середовища (особливо для газів) і вплив механічних і газових включень на процес вимірювань, обмежують їх область використання до чистих рідин і невеликого числа різновидів газів.

### **Парціальні витратоміри**

Вартість багатьох типів витратомірів значно зростає зі збільшенням діаметра трубопроводу, на якому їх встановлюють. Труби діаметром близько 1 м потребують дуже дорогих приладів, що обмежує можливість масового інструментального обліку води, наприклад на водозаборах. Виходом з цього положення може служити установка витратомірів по так званій парціальній схемі. Характерною особливістю парціальної схеми є наявність невеликої ділянки труби меншого діаметра, що підключена паралельно до основного трубопроводу – так званого обвідного шунта.

**Парціальні витратоміри** – вимірювальні прилади, в яких загальна витрата речовини визначається через деяку частку основного потоку, що протікає в меншій трубі, яка підключена паралельно до основного трубопроводу. Необхідність вимірювання витрат за допомогою парціальних витратомірів виникає не тільки тоді, коли вимірювання витрат треба проводити в трубопроводах великих діаметрів, а і тоді, коли установка чутливих елементів витратомірів в основному потоці з яких-небудь причин є небажаною (наприклад, велика втрата напору) або складне конструктивне виконання витратоміра для основного потоку. Схема парціального витратоміра показана на рис. 6.25.

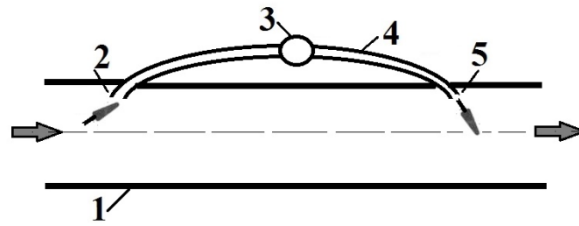


Рисунок 6.25 – Схема парціального витратоміра: 1 – трубопровід; 2 – прийомний отвір обводу; 3 – водомір; 4 – труба обводу; 5 – вихідний отвір обводу

Через трубопровід 1 протікає основний потік речовини, витрату якої необхідно визначити. В основний трубопровід врізана труба обводу 4 через яку проходить частина речовини. В трубі обводу встановлений витратомір 3 для визначення витрати речовини, що протікає по цій трубі. Між основною витратою речовини в трубопроводі і витратою, що протікає по обвідній трубі існує залежність за якою визначають основну витрату по величині часткової. Витрату речовини в обвідному шунті визначають стандартними витратомірами (діафрагма, ротаметр та інші).

Парціальні витратоміри можна поділити на три основні групи:

- витратоміри, у яких відгалужений потік повертається в основну трубу;
- витратоміри з відгалуженим потоком, що не повертається в основну трубу;
- витратоміри, парціальний потік яких утворюється допоміжною речовиною.

Для правильної роботи парціального витратоміра необхідно, щоб безпосередньо вимірювана витрата  $q$  (в обвідній трубці) була строго пропорційна основній витраті  $Q$  (в основному трубопроводі). Для цього, перш за все, потрібно щоб всі прохідні перерізи в обвідній трубці не змінювалися, не було забруднення обвідної трубки і гідравлічного опору, якщо він є, то щоб дотримувалося рівність або сталість відносини густин середовища в основний і обвідній трубах.

### Прилади з безперервно рухомим тілом

Серед приладів групи Б широке застосування знаходять різні різновиди тахометричних витратомірів: турбінні, кулькові і камерні (роторні, з овальними шестернями і інші). Останні використовують в якості лічильників газу, нафтопродуктів та інших рідин.

**Тахометричними** називаються витратоміри і лічильники, що мають рухливий елемент (зазвичай такий, що обертається), швидкість руху якого пропорційна об'ємній витраті. Тахометричні витратоміри поділяють на:

- швидкісні (турбінні);
- кулькові;
- роторно-кульові;
- камерні.

Принцип дії тахометричного витратоміра (лічильника) заснований на вимірюванні швидкості обертання або підрахунку обертів поміщеного в потік рухливого елемента. Якщо вимірювати швидкість руху рухливого елемента, то отримуємо тахометричний витратомір. Для створення тахометричного витратоміра швидкість руху елемента необхідно перетворити в сигнал, що пропорційний витраті та зручний для вимірювання. Якщо підраховувати (вимірювати) загальне число обертів (чи ходів) рухливого елемента – вертушки (крильчатки або турбінки), то отримуємо тахометричний лічильник кількості речовини (об'єм або маси).

Всі тахометричні витратоміри (лічильники) енергонезалежні. Ці прилади вимірювання є досить поширеними і мають клас точності в межах 0,2-0,5. Тахометричні витратоміри (лічильники) з крильчаткою або турбіною можуть виготовлятися для труб діаметру  $4 \div 750$  мм та тиску до 250 МПа. Тахометричні прилади зазвичай вимірюють об'ємні витрати в межах  $0,03 \div 1600 \text{ м}^3/\text{год}$ . За необхідності вимірювання масових витрат, вони повинні забезпечуватися або вимірювачами температури та тиску, або густиномірами і обчислювальними пристроями. Тахометричні витратоміри (лічильники) використовують для вимірювання витрати та кількості води, нафтопродуктів

та інших рідин. Вони знаходять використання і для вимірювання витрати та кількості газу.

**Швидкісні (крильчасті і турбінні) витратоміри (лічильники).**

Швидкісні витратоміри застосовують для вимірювання витрат рідин, крім дуже забруднених та з високою в'язкістю. Для вимірювання витрати газу їх використовують значно рідше внаслідок його малої густини. В якості рухливого елемента у цих витратомірах використовують крильчатки або турбінки, тому їх часто називають крильчасті та турбінні витратоміри (іноді просто турбінні витратоміри без вказівки на тип рухливого елемента). Різниця між крильчаткою (також називають тангенціальною турбінкою) та турбінкою (також називають аксіальною турбінкою) полягає в тому, що вісь обертання крильчатки розташована перпендикулярно, а турбіни – паралельно напрямку руху потоку речовини. Для лічильника необхідно з'єднати вал рухливого елемента з рахунковим механізмом. Схеми швидкісних витратомірів показані на рисунку 6.26:

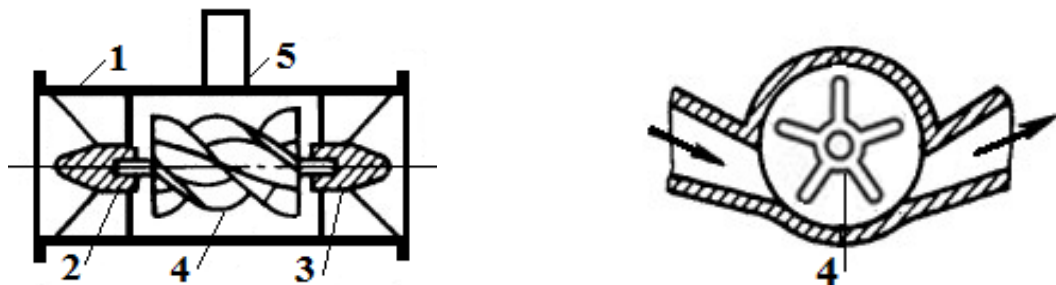


Рисунок 6.26 – Схеми швидкісних витратомірів: а) з турбінкою; б) з крильчаткою. 1 – трубопровід; 2, 3 – струменевипрямлячі; 4 – вертушка; 5 – пристрій формування вихідного сигналу (тахометричний перетворювач або лічильний пристрій)

Корпус 1 перетворювача являє собою відрізок труби з двома фланцями для приєднання його до трубопроводу. Усередині корпусу встановлено струменевипрямлячі 2 і 3, що з'єднані нерухомою віссю, на якій розташована вертушка 4 (на рис 6.26.а зображена турбінка з лопатями які вигнуті за гвинтовою лінією, вісь обертання якої паралельна напрямку руху потоку

речовини, нарис 6.26.б зображена крильчатка з прямими лопатями, вісь обертання якої перпендикулярна напрямку руху потоку речовини).

Частота обертання турбінки (крильчатки) пропорційна об'ємній витраті вимірюваного середовища. За допомогою тахометричного перетворювача 5 вона перетворюється в частоту вихідної напруги, а потім в аналоговий вихідний сигнал. В тахометричних лічильниках вимірявши кількість обертів турбінки (крильчатки) за допомогою лічильного механізму 5 (наприклад, тахометру) можна по ній визначити об'ємну витрата (кількість) речовини.

В тахометричних лічильниках про кількість рідини  $Q$ , що пройшла через витратомір судять по кількості обертів вертушки, що розташована на шляху потоку:  $n = k \cdot V_{\text{сер}}$ , де  $k$  – коефіцієнт пропорційності. Кількість рідини  $Q$  можна визначити через середню швидкість потоку  $V_{\text{сер}}$  та площу поперечного перерізу трубопроводу  $S$ :  $Q = V_{\text{сер}} \cdot S$ . На 6.28 наведені приклади зображення лічильників води.



Рисунок 6.27 – Лічильники води: а) з турбінкою; б) з крильчаткою.

У швидкісних витратомірах для можливості безконтактного вимірювання швидкості обертання вертушки її лопаті або виготовляються з феромагнітного матеріалу, або на ній встановлюються включення-відмітки з цього матеріалу. Серед безконтактних перетворювачів, що перетворюють швидкість обертання вертушки в електричний сигнал, найбільшого поширення набули перетворювачі магнітоіндукційного типу.

**Кульковими витратомірами** називають тахометричні витратоміри, в яких рухомим елементом є кулька, що здійснює неперервний рух по колу. Такий рух кульки забезпечується гвинтовим напрямним апаратом, який

закручує потік, чи тангенціальними підведенням вимірюваної речовини. Схеми кулькових перетворювачів для середніх і великих витрат представлені на рисунку 6.28.

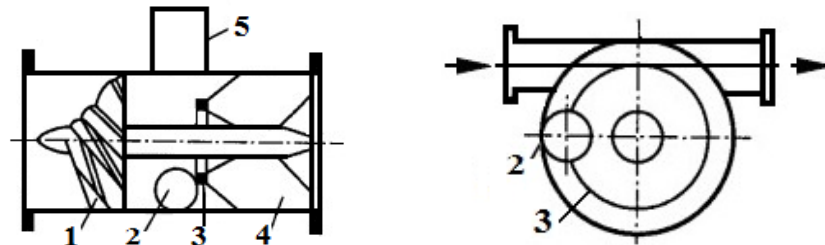


Рисунок 6.28 – Схеми кулькового перетворювача: а) – для великих витрат; б) – для малих витрат. 1 – формувач потоку; 2 – кулька; 3 – обмежувальне кільце; 4 – струменевипрямляч; 5 – тахометричний перетворювач

Потік рідини, що закручений формувачем 1 в гвинтовому напрямку, викликає рух кульки 2 по колу. Від переміщення кульки уздовж труби вона утримується обмежувальним кільцем 3, за яким розташовується струменевипрямляч 4, що служить для випрямлення закрученого потоку. Кулька під дією відцентрової сили притискається до внутрішньої поверхні труби, а під дією осьової складової швидкості потоку – до обмежувального кільця, тобто кулі, крім сил в'язкого тертя рідини, необхідно долати сили тертя об поверхню труби та обмежувального кільця. В результаті швидкість центру кулі відстає від відповідної кругової швидкості потоку речовини. Цю обставину слід враховувати для розрахунків витратоміра. На зовнішній стороні немагнітного корпусу перетворювача розташовується тахометричний перетворювач 5 для перетворення частоти обертання кульки в частотний електричний сигнал, за яким визначають витрату рідини.

Для невеликих витрат застосовується конструкція перетворювача, що представлена на рис. 6.29.б. Конструкція не має спеціального формувача для закручування потоку, а рух кульки по колу викликається тангенціальним підведенням вимірюваної рідини. За частотою обертання кульки по колу формують вихідний сигнал, що визначає витрату. В схемі також передбачено обмежувальне кільце, що не утримує кульку від переміщення уздовж труби.

Кулькові витратоміри, що випускаються промисловістю, використовуються для вимірювання витрати рідини від 0,025 до 600 м<sup>3</sup>/год, при температурі до 28 °С і тиску до 10 МПа. Втрата тиску не перевищує 50 кПа. Щільність середовища повинна знаходитися в межах 700÷1400 кг/м<sup>3</sup> і кінематична в'язкість в межах  $(0,3-12) \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с. Через відсутність опору рухомого елемента витратоміри можуть використовуватися на рідинах з твердими включеннями обмеженого розміру, а також агресивних.

**Камерними** називаються тахометричні витратоміри і лічильники, що мають один або кілька рухомих елементів, які при русі відмірюють певні об'єми рідини або газу. Зазвичай ці рухливі елементи рухаються безперервно зі швидкістю, пропорційною об'ємній витраті. Ці витратоміри і лічильники також називають об'ємними. Принцип дії об'ємних лічильників і витратомірів полягає в періодичному або безперервному відліку постійних об'ємних порцій вимірюваної речовини.

Існує велика кількість конструкцій, камерних витратомірів і лічильників рідин і газів. Для рідин застосовують лічильники з овальними шестернями, барабанні, лопатеві, поршневі, перекидні лічильники та інші. Для вимірювання великих кількостей газу в основному використовують ротаційні лічильники, а барабанні лічильники використовують для лабораторних вимірювань та вимірювань невеликих кількостей газу.

Лічильник з овальними шестірнями (рис. 6.29) складається з двох однакових овальних шестерень 1 та 2, що знаходяться в зачепленні і обертаються в протилежні сторони під дією перепаду тиску рідини, що протікає через його корпус 3. Обидві шестірні знаходяться в безперервному зачепленні і при обертанні шестірні обкатуються своїми бічними поверхнями.

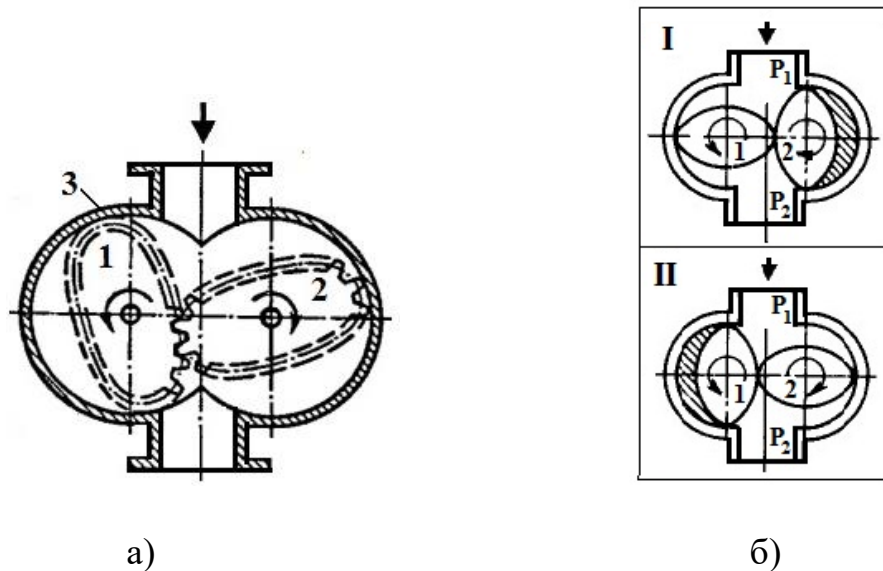


Рисунок 6.29 – Схема лічильника для рідин з овальними шестірнями

Зазори між вершинами зубців шестерень, а також між стінками камери і торцями шестерень повинні бути мінімальними, щоб вимірювана рідина напряду не проходила зі входу на вихід лічильника. В результаті перепаду тисків  $P_1 - P_2$  в трубопроводі ( $P_1$  – тиск рідини до лічильника, а  $P_2$  – тиск після лічильника) утворюється сила, що змушує шестерні обертатися.

При проходженні через лічильник потік рідини втрачає частину енергії на обертання овальних шестерень. Залежно від розташування шестерень щодо входу потоку рідини, кожна з них є по черзі то ведучою, то веденою. В положенні I (рис. 6.29.б) перепад тисків створює на овальній шестірні 2 крутний момент, що змушує цю шестірню обертатися за годинниковою стрілкою, причому вона буде обертати за рахунок зубчастого зчеплення (вести) шестірню 1 проти годинникової стрілки. В цьому положенні шестірня 2 відсікає визначений об'єм рідини. Далі крутний момент буде перерозподілятися і діяти на обидві шестірні. В положенні II вже шестірня 1 буде ведучою і буде обертати шестерню 2. Подальше обертання відбувається аналогічно. При обертанні овальних шестерень відбувається періодичне відсікання визначених об'ємів рідини, котрі обмежені овалом шестірні та стінкою корпусу вимірювальної камери (заштрихована область на рис. 6.30.б). За один оберт шестерень відсікається чотири визначених об'єми рідини, які в сумі дорівнюють об'єму вимірювальної камери. Вісь однієї з

шестерень може обертати рахунковий механізм, що розташований поза корпусом приладу. Якщо лічильник з овальними шестірнями забезпечити тахометричним перетворювачем, що вимірює частоту обертання шестерень, то разом з вимірюванням кількості рідини буде вимірюватись і витрата.

Серед камерних приладів, лічильники з овальними шестірнями найчастіше використовуються для вимірювання кількості рідин у широкому діапазоні параметрів. В'язкість вимірюваних рідин від  $0,55 \cdot 10^{-6}$  до  $300 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с, температура – від 40 до 120°C і тиску до 6,4 МПа. Втрата напору при встановленні лічильника складає до 0,02 МПа. Застосовуються для труб діаметром 15÷80 мм. Похибка показань не перевищує 0,5 %. Лічильник з овальними шестірнями широко застосовують при вимірюванні нафтопродуктів.

**Ротаційні лічильники газу.** З лічильників газу найбільшого поширення набули ротаційні лічильники. Їх робота аналогічна лічильникам з овальними шестернями для вимірювання кількості рідин. У якості перетворювального елемента застосовуються не овальні шестерні, а ротори, що мають восьмиподібну форму (іноді форму порівнюють з лемніскатою або гантеллю). Ротаційний газовий лічильник (рис. 6.30) складається з корпусу, всередині якого обертаються два однакових восьмиподібних ротора, а також передавального і лічильного механізмів, що пов'язані з одним з роторів (на схемі не показані).

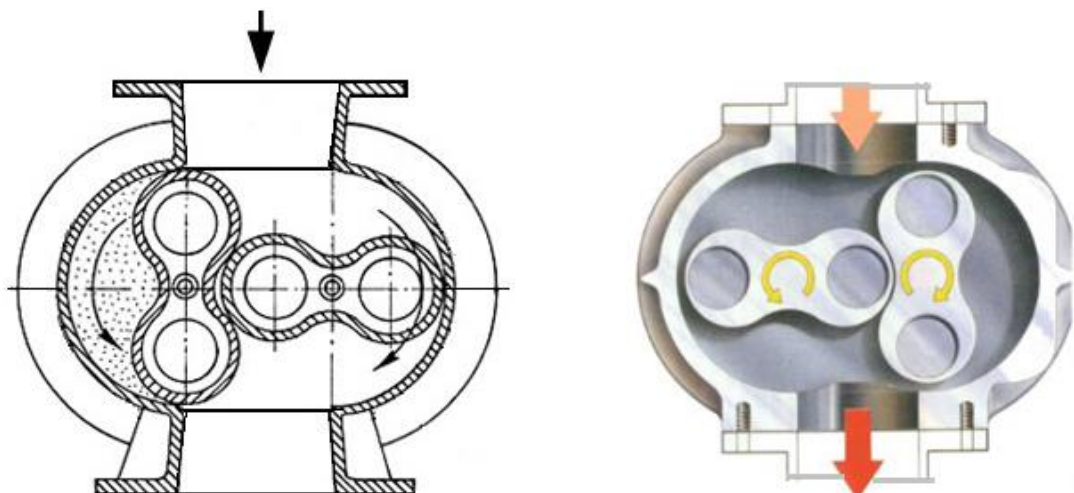


Рисунок 6.30 – Схема ротаційного газового лічильника

Ротори приводяться в обертання різницею тисків газу, що надходить через верхній вхідний патрубок і виходить через нижній вихідний патрубок. При виготовленні ротаційних лічильників особлива увага звертається на легкість ходу роторів і зменшення витоків газу через лічильник.

Принцип роботи **барабанних лічильників** заснований на безперервному вимірюванні і відліку рівних об'ємних порцій речовини. Число цих об'ємів реєструється рахунковим механізмом, що показує в об'ємних одиницях сумарна кількість речовини, що пройшла через прилад. Принципові схеми барабанних лічильників для вимірювання кількості рідини та газу (рис. 6.31) – це циліндричний горизонтальний резервуар, розділений на камери рівного об'єму. При послідовному наповненні й спорожненні камер резервуар, виконаний у вигляді барабана, приходить в обертання. Об'єм рідини, що пройшла через лічильник, пропорційна числу обертів барабану, фіксується рахунковим механізмом. В лічильниках рідини при надходженні в барабан рідини зміщується його центр ваги, що викликає періодичний або неперервний поворот барабану. В лічильниках газу барабан повертається під впливом перепаду тиску газу на вході та виході.

**Барабанний рідинний лічильник** (рис. 6.31.а) – це циліндричний горизонтальний резервуар, розділений на три камери рівного об'єму. Навколо осі лічильника є кільцева трубка 6 (подача рідини показана на схемі чорною стрілкою), по якій надходить рідина, що потім витікає у внутрішній циліндр 7. Циліндр 7 має три щілини, котрі сполучають його з вимірювальними камерами 4, 5, 10. Рідина з циліндру 7 витікає через нижню щілину 8 у вимірювальну камеру 10. При цьому рівновага лічильника не порушується, бо камера займає симетричне положення відносно вертикальної осі. Після того, як камера 10 повністю заповниться рідиною, почне також підвищуватись рівень в циліндрі 7 і рідина через щілину 2 почне заповнювати камеру 4. Тоді центр ваги зміститься вліво, і лічильник повернеться на  $120^\circ$  проти годинникової стрілки. При цьому рідина через отвір 1 витече з камери 10 в корпус приладу, що з'єднаний з вихідною

трубою. Камера 4 займе нижнє положення і буде далі наповнюватись рідиною. Трубки 3 служать для видалення повітря з камер 4, 5, 10. Стакани 9, що вбудований у стінки камер 4, 5, 10 дозволяють підігнати об'єми камер до заданого розрахованого значення. Щоб не було швидкого випорожнення камер і можливого проскакування барабану, в камерах виконують перегородки П (на схемі показані штриховою лінією), котрі гальмують витікання рідини. При послідовному наповненні і спорожненні камер барабан обертається. Один повний оберт лічильника відповідає кількості рідини, що заповнила три камери, що і враховується рахунковим механізмом, а за ним визначають об'єм рідини.

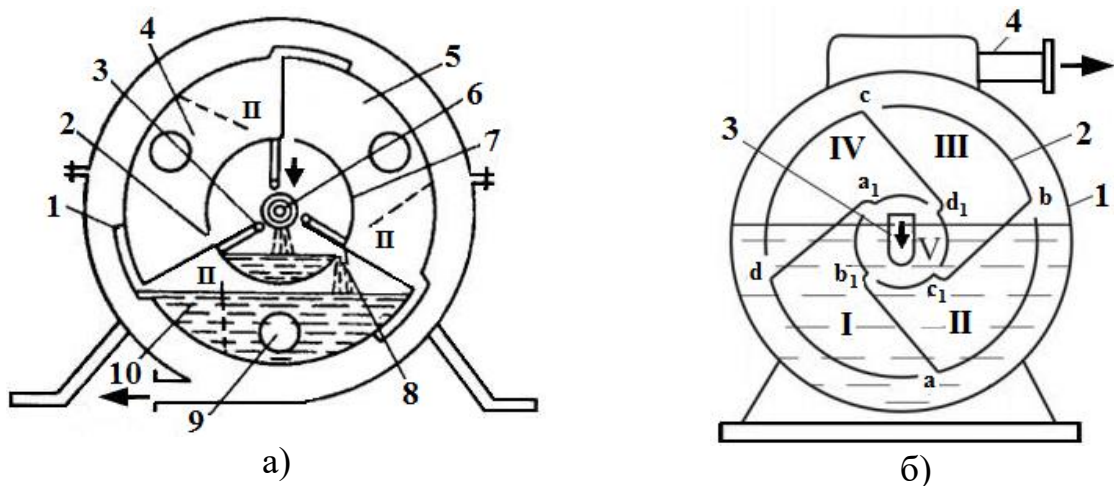


Рисунок 6.31– Принципові схеми барабаних лічильників для вимірювання кількості рідини (а) та газу (б).

1 – отвір; 2 – щілина; 3 – трубка; 4, 5, 10 – вимірювальні камери; 6 – кільцева трубка надходження рідини; 7 – внутрішній циліндр; 8 – нижня щілина; 9 – стакан; П – перегородки

1 – корпус; 2 – барабан; 3 – трубка подачі газу; 4 – вихідна труба

Барабанні лічильники можуть застосовуватися в поєднанні з електронно-імпульсними пристроями для передачі показань на відстань, а також з дозаторами, які автоматично припиняють потік рідини в лічильник після надходження заданої кількості.

Барабанні лічильники застосовують для вимірювання кількості чистих, малов'язких рідин у спиртовій та хімічній промисловості. Похибка показань в межах  $0,2 \div 1\%$ . Використовуються для вимірювання витрати рідини від  $0,02$  до  $0,6 \text{ м}^3/\text{год}$ . Також їх використовують в лабораторіях для точних вимірювань.

**Барабанний рідинний лічильник газу** (рис. 6.31.б) має чотири вимірювальні камери I-IV, об'єм яких обмежується рівнем затворної рідини, розташованим трохи вище осі барабана. В герметичному корпусі 1 безперервно обертається барабан 2 під дією перепаду тисків на вході та виході лічильника. Камери I-IV сполучаються через щілини a, b, c, d з порожниною корпусу приладу 1, що з'єднаний з вихідною трубою 4, а через щілини a1, b1, c1, d1 камери I-IV сполучаються з внутрішньою камерою V. Навколо вісі лічильника є кільцева трубка 3, по котрій надходить газ в камеру V (подача газу показана на схемі чорною стрілкою). Радіальні перегородки та щілини a, b, c, d розташовані так, що газ послідовно заповнює камери I – IV. Перепад тисків в трубах 3 і 4 змушує барабан обертатись за годинниковою стрілкою. Вхідна та вихідна щілини кожної камери ніколи не можуть бути одночасно над рівнем затворної рідини, і тому прямий прохід газу з труби 3 у трубу 4 виключений. Кожна камера наповнюється визначеним постійним об'ємом газу, який витісняється з камери в порожнину корпусу при виході щілини (a, b, c, d) з під рівня затворної рідини. Число обертів барабана фіксується рахунковим механізмом, і за ним визначають об'єм рідини. За один оберт барабана через лічильник проходить об'єм, що дорівнює сумарному об'єму камер I – IV. Затворною рідиною часто служить вода. За низьких температур її замінюють на гліцерин чи водний розчин хлориду магнію.

Барабанні лічильники газу є точними приладами, їх похибка не перевищує  $0,2\%$ . Однак вони зрідка випускаються продуктивністю понад  $3 \text{ м}^3/\text{год}$ . Барабанні лічильники використовують для вимірювання кількості

генераторного, коксового та інших газів, що помітно не розчиняються у воді та не впливають на матеріал лічильника.

**Лопатеві лічильники.** Принцип їх роботи заснований на безперервному вимірюванні й відліку рівних об'ємних порцій речовини. Лопатевий лічильник рідини (рис. 6.32) складається з циліндричної камери 1 (корпус) у середині якої обертається циліндр 2, і чотирьох лопатей 5, 6, 7, 8, що переміщуються в радіальних прорізах останнього.

Вимірювана рідина рухається в просторі, що обмежений циліндричними поверхнями корпусу 1 й циліндра 5. Усередині циліндра розташований нерухомий кулачок 3, на який спираються чотири ролика 4 із закріпленими на них лопатями 5, 6, 7, 8. Перетіканню рідини з вхідного отвору в вихідний перешкоджає вставка 9. Одна або дві з цих лопатей (на рис. 6.32 – лопаті 5 та 6) завжди примусово висунуті з циліндра практично до упору у внутрішню поверхню камери, перекриваючи при цьому кільцевий прохід. Лопаті, перебуваючи під різницею тисків рідини, що надходить до лічильника і йде з нього, переміщуються разом із рідиною, викликаючи одночасно обертання циліндра. Примусове переміщення лопатей в радіальних прорізах циліндра здійснюється за допомогою профільованого кулачка 3, навколо якого обкатуються ролики 4 із закріпленими лопатями. Таким чином, за повний оборот циліндра через лічильник проходить кількість рідини, що дорівнює об'єму вимірювальної камери (різниці об'ємів циліндричного корпусу й циліндра). Число обертів циліндра, фіксується рахунковим механізмом, і за ним визначають об'єм рідини.

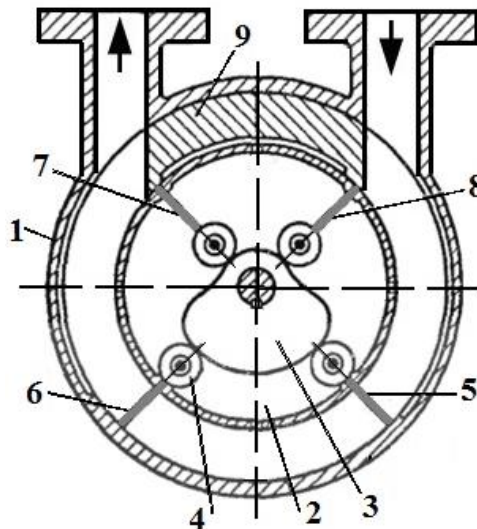


Рисунок 6.32 – Схема лопатевого лічильника. 1 – корпус; 2 – циліндр;  
3 – кулачок; 4 – ролик; 5, 6, 7, 8 – лопаті; 9 – вставка

Лопатеві лічильники переважно використовуються для вимірювання кількості малов'язких рідин (легких нафтопродуктів, спирту і т. п.). Лопатеві лічильники призначені для вимірювання в трубах діаметром 100÷200 мм. Робоча температура цих лічильників може бути в межах від 40 до 120°C і тиск до 6,4 МПа. Втрата напору не повинна перевищувати 50 кПа.

**Поршневі лічильники** також відносяться до приладів камерного (об'ємного) типу й принцип їх роботи заснований на безперервному вимірюванні і відліку рівних об'ємних порцій речовини, які витісняються поршнем з вимірювального циліндра. Ці лічильники виготовляються з різною кількістю поршнів. Найчастіше зустрічаються лічильники з одним, двома, чотирма і шістьма поршнями. На рисунку 6.33 показана схема поршневого лічильника з одним поршнем. Поршневі лічильники являють собою циліндр, усередині якого під дією рідини, що протікає, переміщається поршень.

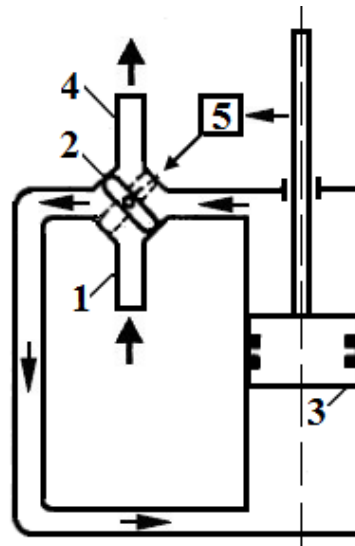


Рисунок 6.33 – Схема поршневого лічильника: 1 – вхідна труба; 2 – золотниковий пристрій; 3 – поршень; 4 – вихідна труба; 5 – механізм

Рідина надходить у лічильник по трубі 1 і через золотниковий пристрій (іноді чотириходовий кран) 2 поступає під поршень 3. Під тиском рідини поршень переміщується вгору. Золотниковий пристрій 2 в робочому стані займає два сталих положення: якщо рідина поступає в нижню порожнину циліндру, то верхня – сполучається із вихідною трубою 4. Поршень при переміщенні вгору витісняє рідину з верхньої порожнини у вихідну трубу 4.

Для поршневих лічильників у порівнянні з іншими типами об'ємних лічильників характерна велика втрата тиску. Поршневі лічильники використовуються для вимірювання сумарної кількості мазуту, нафти, бензину та інших рідин. Раніше їх застосовували для вимірювання кількості води. Поршневі лічильники рідини мають похибку до 2%.

**Перекидні лічильники** (лічильники з хитними судинами) застосовуються тільки для рідини. Ці лічильники складаються з двох камер (або ковшів), перекидання яких відбувається після заповнення однієї з камер певним об'ємом (рис. 6.34.а) або певної масою рідини (рис. 6.34.б) в разі вантажного врівноваження.

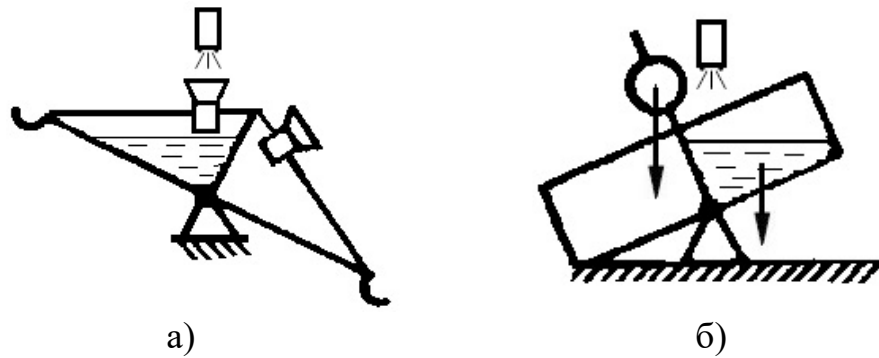


Рисунок 6.34– Схема перекидних лічильників: а – перекидання відбувається за об'ємом; б – перекидання відбувається за масою

Лічильники працюють наступним чином: поки перша з вимірювальних посудин заповнюється рідиною, з другої вона витікає. Коли перша посудина заповниться, лічильник перекидається й тепер буде заповнюватись друга посудина, а з першої рідина почне витікати.

### Силіві витратоміри

Силовими називаються витратоміри, в яких за допомогою силового впливу, що залежить від масової витрати потоку, надається прискорення того чи іншого роду, і вимірюється який-небудь параметр, що характеризує ступінь цього впливу (або ефекту від впливу). Прискорення потоку виникає в процесі зміни його первісного руху. Залежно від характеру цієї зміни й отриманого при цьому прискорення силіві витратоміри поділяються на: коріолісові, гіроскопічні і турбосилові.

**Коріолісовими** називаються витратоміри, в перетворювачах яких під силовим впливом виникає коріолісове прискорення, яке пропорційне безпосередньо масовій витраті. Вони набули найбільшого поширення серед силових витратомірів. Перший витратомір, робота якого базується на основі сил Коріоліса був представлений компанією MicroMotion у 1977 році. Сила Коріоліса (сила інерції) діє на тіло масою  $m$ , яке рухається з постійною лінійною швидкістю  $v$  та одночасно обертається з кутовою швидкістю  $\omega$ , та направлена під прямим кутом до напрямку руху. Прискорення Коріоліса (прискорення обертання) – це частина повного прискорення тіла, яке з'являється під час його руху в обертальній системі відліку. Дія сили

Коріоліса проявляється в коливальних системах, коли рідина або газ переміщуються в напрямку осі коливань, або в протилежному їй напрямку. Згідно з другим законом Ньютона, на якому ґрунтується робота коріолісових витратомірів, прискорення  $a$ , що отримане тілом, прямо пропорційно рівнодіючій всіх сил  $F$ , що діють на тіло, і обернено пропорційно масі тіла  $m$ :  $a=F/m$ . Цей вираз справедливий для будь-яких сил будь-якої природи.

Витратомір Коріоліса (рис. 6.35) складається з давача витрати (сенсора) і електронного перетворювача. Сенсор перетворює витрату, густину середовища та температуру сенсорних трубок в електричні сигнали. Електронний перетворювач (на рисунку не показаний) конвертує отриману від давача інформацію в стандартні вихідні сигнали та у цифровий сигнал. Сенсор складається з однієї або двох вимірювальних сенсорних трубок 1, що мають вигнуту форму, і приварені до ділянки трубопроводу з фланцями. Між трубками на спеціальному кріпленні розташована задавальна котушка 3, яка створює коливання трубок. З боків трубок (на виході та вході речовини) встановлені детектори 2, що визначають положення трубок одна відносно другої.

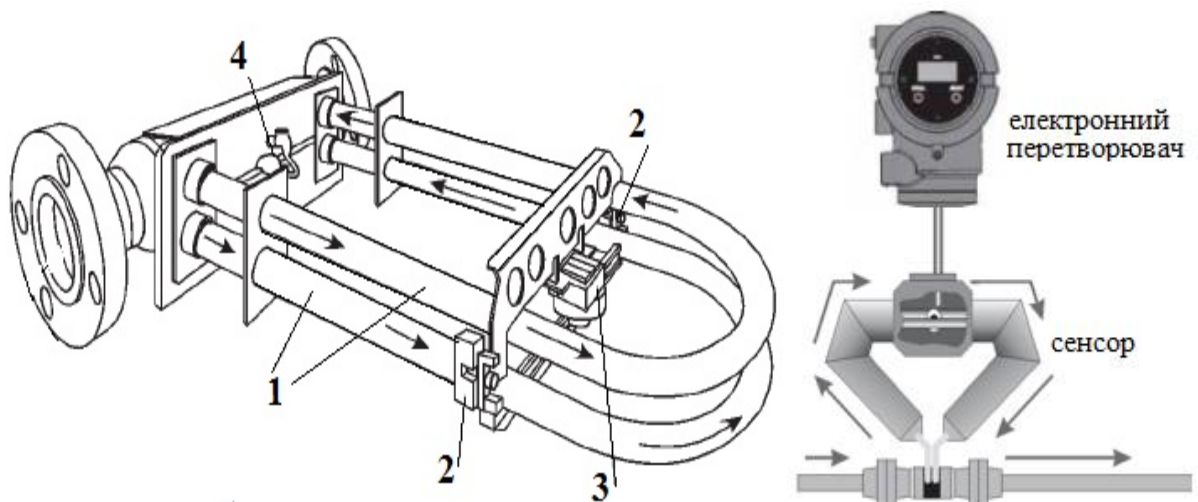


Рисунок 6.35 – Схема витратоміра Коріоліса: 1 – вимірювальні трубки; 2 – детектор швидкості; 3 – задавальна котушка; 4 – термоперетворювача

Вимірюване середовище, що надходить в сенсор, розділяється на рівні половини, що протікають через кожну з сенсорних трубок. Цим трубкам за допомогою котушки задається коливальний рух, що призводить до того, що трубки коливаються вгору-вниз у протилежному напрямку одна до одної (рис. 6.36.а). Коливання трубок подібне коливанням камертону. Амплітуда коливань становить менше 1 мм, а частота – близько 100 Гц.

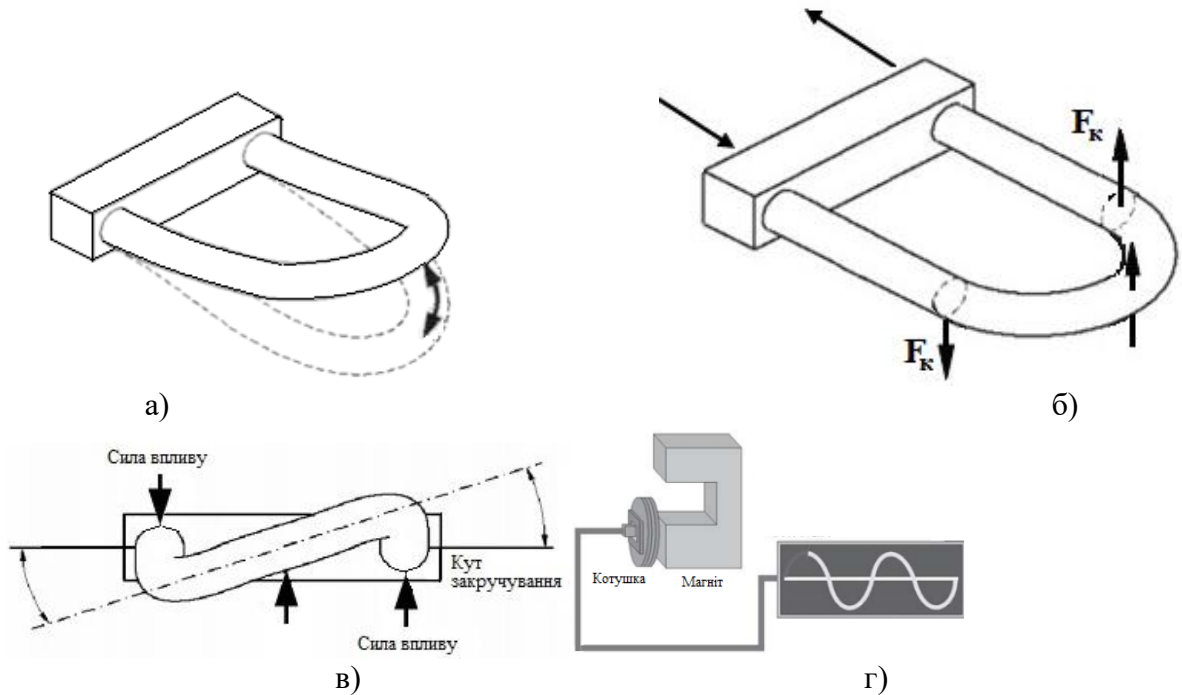


Рисунок 6.36 – Робота витратоміра Коріоліса

На сенсорних трубках встановлені детектори 2 (лівий та правий), що складаються з магнітів і котушок-соленоїдів (рис. 6.36.г), причому котушки змонтовані на одній сенсорній трубці, а магніти на іншій. Кожна котушка рухається крізь однорідне магнітне поле постійного магніту. Згенерована напруга від кожної котушки детектора має форму синусоїдальної хвилі (рис. 6.36.г). Порівняння цих сигналів показує рух однієї трубки відносно другої. Під час проходження рідини через сенсорну трубку зі швидкістю  $v$  та масовою витратою  $Q$ , поступальний рух рідини в кожній трубці розділяється на дві фази: рух середовища від основного трубопроводу до середини згину (вхідна сторона) та зворотний рух, назад до трубопроводу (вихідна сторона), причому цей рух здійснюється одночасно з синусоїдальним коливанням

площини трубки. Це приводить до виникнення коріолісового прискорення, яке свою чергу, приводить до появи сили Коріоліса  $F_K$  (рис. 6.36.б). Сила Коріоліса  $F_K$  спрямована в сторону протилежну напрямку руху трубки, що заданий електромеханічним ланцюгом збудження її коливань.

Таким чином, рідині, що протікає, надається вертикальна складова руху вібрувальної трубки. При русі сенсорної трубки вверх під час першої половини циклу колювання (рис. 6.36.б) рідина, що втікає в трубку (перша половина трубки) створює опір руху трубки вверх даваючи на трубку вниз (перешкоджає переміщенню трубки). Поглинувши цей вертикальний імпульс рухом навколо вигину трубки, рідина, що витікає з трубки, при зворотному русі вже опирається зменшенню вертикальної складової руху, штовхає трубку вверх (прискорює переміщення трубки). Це призводить до деякої деформації (вигину) сенсорної трубки – її закручуванню (рис. 6.36.в).

Коли в другій фазі вібраційного циклу трубка рухається вниз, напрям вигину змінюється на протилежний, і трубка закручується в протилежну сторону. У таких закручуваннях сенсорних трубок і проявляється ефект Коріоліса. В результаті трубка здійснює крутильні колювання. Згідно з другим законом Ньютона, кут закручування трубки під дією сил буде пропорційним кількості рідини, що проходить через трубку (рис. 6.36.в) за одиницю часу, тобто масовій витраті  $Q$  рідини. Детектори, що встановлені на вхідній та вихідній частинах сенсорних трубок, вимірюють зсув по фазі при русі протилежних сторін сенсорних трубок.

Коли витрат у трубках немає, то синусоїдальні сигнали, що надходять з детекторів, мають однакову фазу (рис. 6.37.а). Коли потоку вимірюваної рідини у трубках немає, вони не вигинаються. За наявності витрати синусоїдальні сигнали, що надходять з детекторів, не співпадають за фазою (рис. 6.37.б), оскільки сигнал від вхідного боку трубок запізнюється відносно сигналу з вихідного боку за рахунок вигину сенсорних трубок. Різниця в часі між сигналами ( $\Delta T$ ) вимірюється в мікросекундах і прямо пропорційна масовій витраті. Чим більше масова витрата, тим більше  $\Delta T$ .

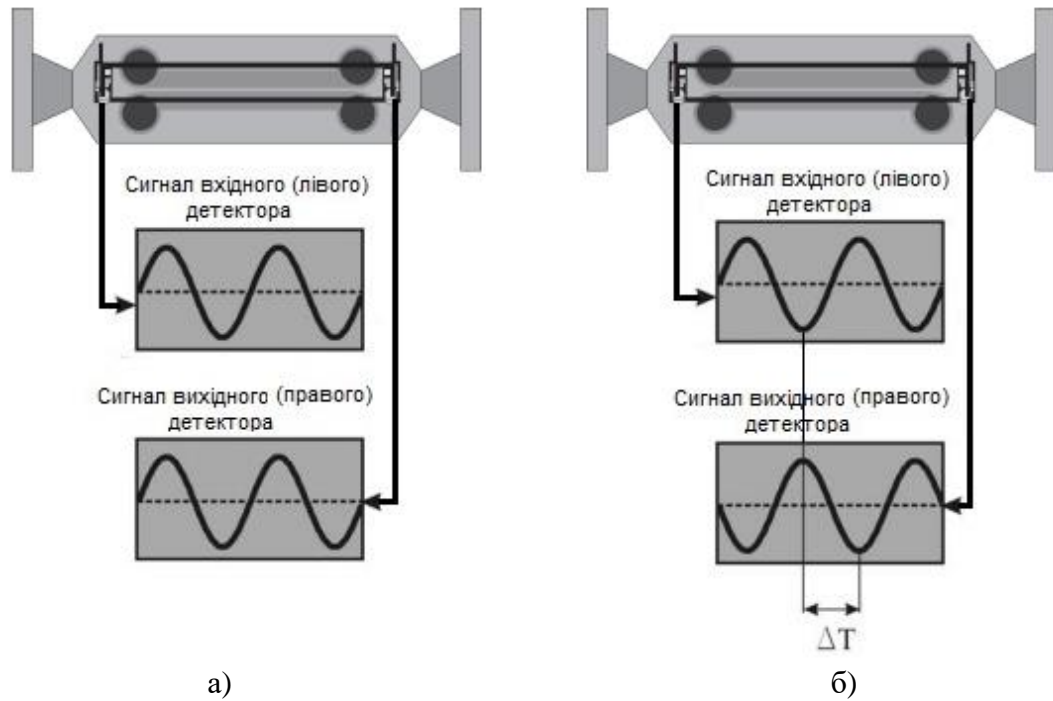


Рисунок 6.37 – Сигнали, що надходять з детектора: а – за відсутності витрати; б – за наявності витрати

Частота коливань сенсорних трубок залежить від їх геометрії, матеріалу, конструкції і маси. Маса вимірювального елемента складається з двох частин: маси самих трубок і маси вимірюваного середовища в трубках. Для конкретного типорозміру сенсора маса трубок постійна. Оскільки маса вимірюваного середовища в трубках дорівнює добутку густини середовища і внутрішнього об'єму, а об'єм трубок є також постійним для конкретного типорозміру, то частота коливань трубок може бути прив'язана і до густини середовища та визначена шляхом вимірювання періоду коливань. Оскільки густина рідини залежить від її температури, зміна, спричинена коливаннями температури рідини, яка проходить через витратомір, враховується за допомогою додаткового температурного сенсора 4 (наприклад, платинового термометра опору), який розміщується в сенсорі витратоміра.

Пропорційні витратам сигнали від обох сенсорів, виміряне значення температури та частота збудження власних механічних коливань сенсорних трубок подаються на мікропроцесорний перетворювач сигналів, де формуються стандартні вихідні сигнали витрати, температури та густини

продукту. Переміщення сенсорних трубок може реєструватися за допомогою оптичних перетворювачів, сигнал на виході яких також буде представляти собою імпульс, що пропорційний витраті.

Деякі виробники розробили сенсори з прямими трубками. Принцип роботи у них такий же, як і у витратомірів з вигнутими сенсорними трубками. Тут в першій половині сенсора рідина збільшує швидкість під впливом власної інерції, а потім знижує швидкість в другій його половині. Інерція рідини створює силу Коріоліса, котра незначно викривлює трубку. Для визначення степені викривлення трубки застосовують детектори. Коливаннями температури рідини, що проходить через сенсор, враховується за допомогою додаткового температурного сенсора.

Коріолісові витратоміри виконують пряме вимірювання витрати рідин, в тому числі високов'язких, агресивних, суспензій, емульсій, а також газів. Їх можна застосовувати для вимірювання витрати рідин і газів в трубопроводах 15 до 300 мм. Клас точності приладів  $0,5 \div 1,5$ . Наприклад, коріолісів витратомір із сенсорами компанії MicroMotion дозволяє вимірювати витрати від 55 до 680400 кг/год з похибкою 0,15 %.

Основні переваги коріолісових витратомірів: висока точність вимірювання параметрів упродовж тривалого часу; можливість роботи незалежно від напрямку потоку; відсутність необхідності прямолінійних ділянок трубопроводу до і після витратоміра; надійна робота в умовах вібрації трубопроводу, змінюваності температури та тиску контрольованої рідини; тривалий термін служби та простота обслуговування, оскільки немає рухомих та зношуваних частин; немає потреби в періодичному перекалібруванні та регулярному технічному обслуговуванні.



Витратомір Кориюліса YOKOGAWA RotaMass



Витратоміри Кориюліса RosemountMicroMotion



Масові (кориюлісові) витратоміри ЭМИС-МАСС 260

*Рисунок 6.38 – Приклади промислового виконання кориюлісових витратомірів*

**Гіроскопічними** називають витратоміри, в яких під впливом зовнішнього силового впливу виникає й потім вимірюється гіроскопічний момент, що залежить від витрати. Первинний перетворювач такого витратоміра складається з ділянки труби у вигляді петлі кільцевої або іншої форми, що обертається з постійною кутовою швидкістю навколо осі.

**Турбосиловими** називають силові витратоміри, в перетворювачі яких в результаті силового впливу, пропорційного масовій витраті, потік закручується.

### **Прилади, що засновані на інших фізичних явищах**

Серед приладів групи В найчастіше застосовують електромагнітні витратоміри для вимірювання витрати електропровідних рідин і ультразвукові (різновид акустичних) для вимірювання витрати рідин і частково газу. Рідше використовуються теплові витратоміри для вимірювання малих витрат рідин і газів.

**Теплові витратоміри.** Принцип їх роботи заснований на вимірюванні залежного від витрати ефекту теплового впливу на потік або тіло, яке контактує з потоком. Вони служать для вимірювання витрати газу і рідше – для вимірювання витрати рідини.

Теплові витратоміри розрізняють за:

- способом нагріву: електричний омичний спосіб нагріву є основним, індуктивний нагрів майже не застосовується на практиці. Також в деяких випадках застосовують нагрів за допомогою електромагнітного поля і за допомогою рідинного теплоносія;
- розташуванню нагрівача: зовні або всередині трубопроводу;
- характером функціональної залежності між витратою і вимірюваним сигналом.

За характером теплової взаємодії з потоком теплові витратоміри поділяються на:

- калориметричні: при електричному омичному нагріванні нагрівач розташований усередині труби;
- термоконвективні: нагрівач розташований зовні труби). Іноді їх називають квазікалориметричними;
- часто приладам груп а та б дають загальну назву калориметричні;

– термоанемометричні: прилади для вимірювання місцевих швидкостей потоків з'явилися раніше за інших. Калориметричні витратоміри з внутрішнім нагрівом з'явилися дещо пізніше, але не отримали помітного застосування. Потім стали розроблятися термоконвективні витратоміри, які завдяки зовнішньому розташуванню нагрівача знаходять все більш широке застосування в промисловості.

**Термоанемометри.** Термоанемометричний метод використовує залежність між швидкістю потоку і тепловіддачею чутливого елемента, розміщеного в потоці і нагрітого електричним струмом. Прилади, що реалізують цей метод (термоанемометри) характеризуються малою інерційністю, високою чутливістю, точністю, надійністю, компактністю. Їх використовують для вимірювання швидкості потоку рідини або газу від 0,1 м/с. На рисунку 6.39 показана схема термоанемометру.

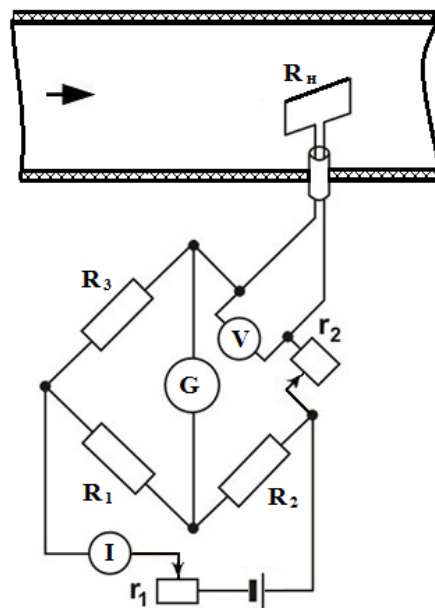


Рисунок 6.39 – Схема термоанемометру

Основною частиною термоанемометра є вимірювальний міст в одне плече якого включений чутливий елемент (розігрітий терморезистор  $R_H$ ) у вигляді нитки з нікелю (вольфраму, ніхрому, срібла або з платини) довжиною 3÷12 мм і діаметром 0,005÷0,15 мм, укріпленої на тонких електропровідних стрижнях (виготовляють з манганіну), і що нагрівається вище температури середовища електричним струмом. Кількість тепла, що передається нагрітою

ниткою потоку газу (рідини), залежить від фізичних характеристик середовища, що рухається, геометрії і орієнтації чутливого елемента. Потік речовини, що набігає на нагріту нитку, охолоджує її і тим самим змінює її електричний опір. Зміна опору фіксується за допомоги мостової схеми, за розбалансом якої визначається витрата вимірюваної речовини.

До переваг термоанемометрів можна віднести: великий діапазон вимірюваних швидкостей, високу швидкодію. До недоліків термоанемометрів відносять крихкість і зміна градування дроту нитки через старіння і перекристалізацію матеріалу дроту. Термоанемометричні витратоміри на даний момент практично не застосовують для технологічних вимірювань витрати самостійно, але завдяки їх перевагам вони використовуються у складі інших приладів та в наукових дослідженнях для вивчення руху речовин.

На рис. 6.40 показана схема **калориметричного витратоміра**, а також криві розподілу температури середовища до і після нагрівача при його постійній тепловій потужності. У трубопроводі 1 встановлений нагрівач потоку 5. На однакових відстанях від центру нагрівача розташовані термоперетворювачі 3, що вимірюють температуру потоку до і після нагрівача. Розподіл температур з двох сторін від нагрівача буде залежати від витрати речовини. Для нерухомою середовища (витрата дорівнює нулю) нагрівання симетричне і розподіл температури буде симетричний відносно осі нагрівача (на графіку розподілу температури середовища це суцільна лінія). І тому різниця температур  $\Delta t = t_2 - t_1 = 0$ . За деякої малої швидкості потоку ця симетрія порушується і крива розподілу температури також несиметрична і дещо зміщується вправо (на графіку розподілу температури середовища це штрихова лінія).

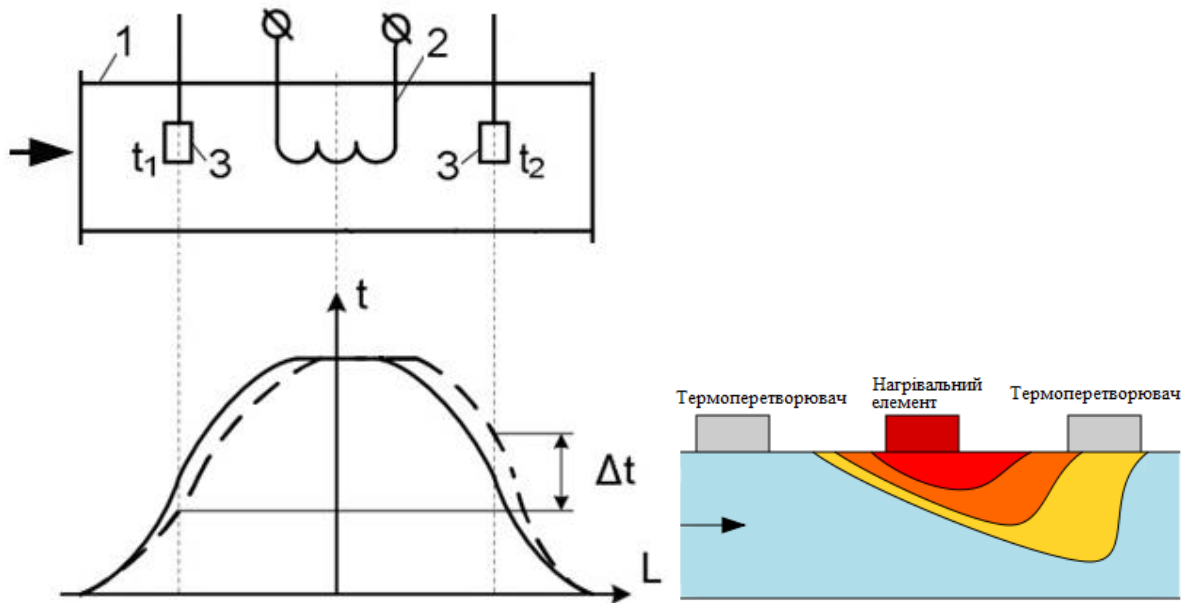


Рисунок 6.40– Схема калориметричного витратоміра: 1 – трубопровід; 2 – нагрівач потоку; 3 – термометри;  $t$  – температура;  $L$  – довжина ділянки трубопроводу

За малих витрат температура  $t_1$  падає внаслідок надходження холодної речовини, а температура  $t_2$  зростає, внаслідок чого  $\Delta t$  збільшується зі зростанням витрати. З подальшим збільшенням витрати за постійної потужності нагрівача температура  $t_2$  стане знижуватись, в той час як температура  $t_1$  буде майже постійною (дорівнювати температурі потоку контрольованої речовини перед витратоміром), і  $\Delta t$  буде зменшуватися. Таким чином, при малих витратах різниця температур  $\Delta t$  прямо пропорційна витраті, а при великих – обернено пропорційна (Рисунок 6.41).

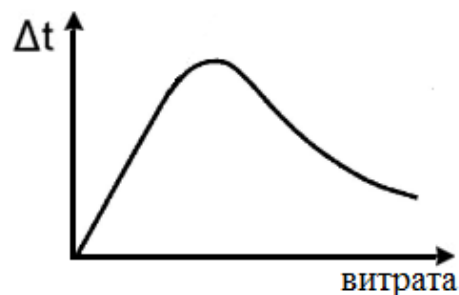


Рисунок 6.41 – Залежність перепаду температур від витрати

Малі швидкості потоку і відповідно малі витрати характерні переважно для трубопроводів малого діаметра. В таких трубопроводах часто важко розмістити нагрівач. Тому калориметричні витратоміри з внутрішнім

нагріванням зазвичай працюють на спадаючій гілці залежності різниці температур від витрати (рис. 6.41). Залежність між масовою витратою  $G$  і різницею температур  $\Delta t$  при великих витратах визначається рівнянням теплового балансу:

$$G = \frac{N}{kc\Delta t}. \quad (6.19)$$

де  $N$  – потужність нагрівача;  $k$  – поправочний множник на нерівномірність розподілу температур по перерізу трубопроводу;  $c$  – теплоємність речовини при температурі  $(t_1 + t_2) / 5$ .

З виразу (6.19) витікає, що вимірювання масової витрати може бути здійснено двома способами: за постійної потужності  $N$  нагріву за значенням різниці температур  $\Delta t$  або підтримуючи постійною різницю температур  $\Delta t$  за значенням потужності  $N$  нагрівача, що забезпечує цю постійну різницю температур.

В якості первинних вимірювальних перетворювачів температури можуть бути застосовані дві термопари або два термометра опору. При застосуванні термометрів опору їх включають в мостову схему, де в інші двоє плечей моста ввімкнено резистори з постійними опорамі  $R_1$  і  $R_2$  (рис.6.42), дозволить за розбалансом визначити витрату вимірюваної речовини.

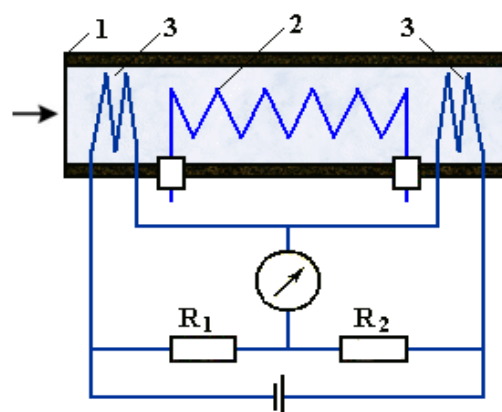


Рисунок 6.42– Схема калориметричного витратоміра: 1 – трубопровід;  
2 – нагрівач потоку; 3 – термоперетворювачі

Якщо калориметричний витратомір призначений для вимірювання великих витрат, то різницю температур  $\Delta t$  за максимальної витрати

обмежують значенням  $1 \div 3^\circ\text{C}$ , щоб уникнути великої витрати потужності на нагрівання. Калориметричні витратоміри знаходять застосування лише для вимірювання дуже малих витрат рідин, оскільки теплоємність рідин значно більша, ніж газів. В основному ці прилади застосовують для вимірювання витрати газу. Їх застосовують для різних дослідницьких і експериментальних робіт, а також в якості зразкових приладів для перевірки і градування інших витратомірів. Використовуючи калориметричні витратоміри з внутрішнім нагрівом можна забезпечити вимірювання витрати з відносною наведеною похибкою  $0.3 \div 0.5\%$ . Основною перевагою цих витратомірів є вимірювання масової витрати газу без вимірювання його тиску і густини.

Термоконвективними називаються теплові витратоміри, у яких нагрівач і термоперетворювачі розташовуються зовні трубопроводу (рис. 6.43), а не вводяться всередину. Це істотно підвищує експлуатаційну надійність витратомірів і робить їх зручними для застосування. Передача тепла від нагрівача до вимірюваного середовища здійснюється за рахунок конвекції через стінку труби. Їх застосовують на трубопроводах малих діаметрів (від 1,5 до 25 мм).

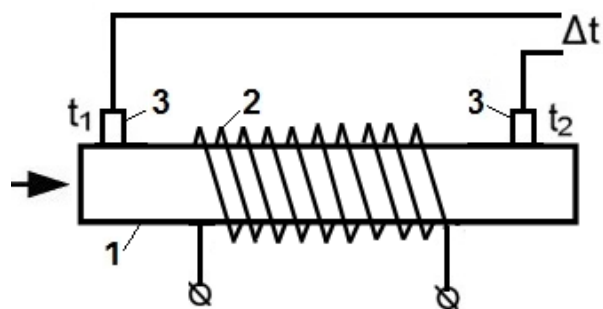


Рисунок 6.43 – Схема термоконвективного витратоміра: 1 – трубопровід; 2 – нагрівач потоку; 3 – термоперетворювачі

Витратомір є тонкостінною металеву трубку малого діаметра, на зовнішню поверхню якої намотано дрітний нагрівач 5. На однакових відстанях від центру нагрівача зовні розташовані термоперетворювачі 3, що вимірюють температуру потоку до і після нагрівача. Вимірювання температури здійснюється термопарами або термометрами опору (останні

також можуть намотуються на трубопровід). Включення термометрів опору в мостову схему, дозволить за розбалансом визначити витрату вимірюваної речовини.

Існують схеми термоконвективних витратомірів, у яких нагрівач суміщено з термоперетворювачами. Такі витратоміри відрізняються меншою інерційністю. Калориметричні витратоміри забезпечують високу точність (похибка  $0.3 \div 1\%$ , для термоконвективних –  $1,5 \div 3\%$ ), великий діапазон вимірювання, вимірювання пульсуючих і малих витрат.

### **Електромагнітні витратоміри**

Принцип дії цих приладів ґрунтується на законі електромагнітної індукції (законі Фарадея), згідно з яким рух провідника в магнітному полі, створює електрорушійну силу (ЕРС), яка пропорційна швидкості руху провідника. Напрямок струму, що виникає в провіднику, перпендикулярний напрямку руху провідника та силовим лініям магнітного поля. В електромагнітних витратомірах роль провідника виконує електропровідна рідина, яка протікає по трубопроводу між полюсами магніту і перетинає створене магнітом поле. У рідині буде наводитися ЕРС, що пропорційна швидкості її руху, і, відповідно, витраті рідини. Потрібно, щоб питома електропровідність рідини була не нижче  $10^{-3}$  См/м. За допомогою деяких електричних вимірювальних схем межа їх застосування може бути зсунута до  $10^{-5}$  См/м. Найбільшого застосування набули електромагнітні витратоміри, у яких вимірюється ЕРС, індукована в рідині, при перетині нею магнітного поля.

Принципові схеми електромагнітних витратомірів наведені на рис. 6.44. У таких приладах між полюсами магніту 2 (рис. 6.44.а) або електромагніту 2 (рис. 6.44.б) встановлюють ділянку трубопроводу 1 (перпендикулярно до напрямку магнітних силових ліній), яка виготовлена з немагнітного матеріалу і всередині покрита електроізоляційним матеріалом (наприклад, емаль, склопластик, фторопласт тощо) з потоком контрольованої рідини.

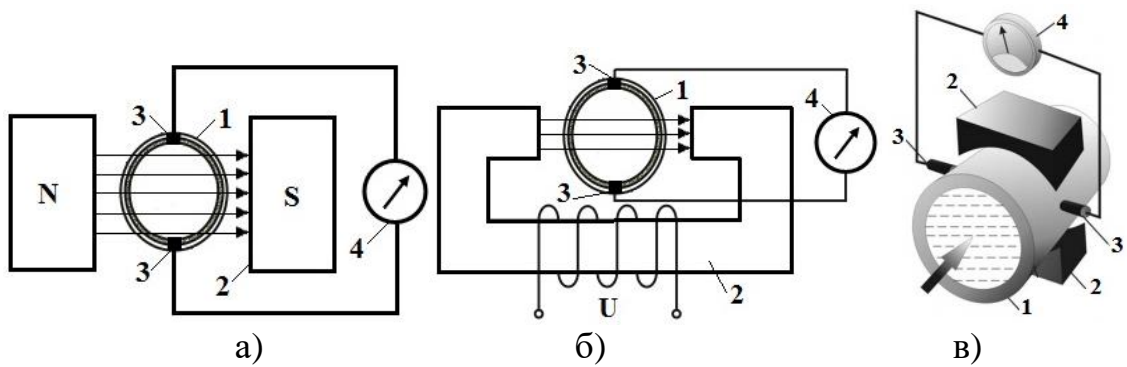


Рисунок 6.44 – Принципові схеми електромагнітних витратомірів: а – з постійним магнітом; б – з електромагнітом; в – об’ємне зображення витратоміру; 1 – трубопровід; 2 – електромагніт; 3 – електроди; 4 – вимірювальний прилад

У стінки трубопроводу в одному поперечному перерізі діаметрально протилежно введені два електроди 3 (врівень з внутрішнім діаметром труби) в напрямку, перпендикулярному як до напрямку руху рідини, так і до напрямку силових ліній магнітного поля. До електродів за допомогою з’єднувальних провідників підключають високочутливий вимірювальний прилад 4 (наприклад, мілівольтметр чи потенціометр). Шкалу приладу градуують в одиницях витрат або в одиницях швидкості.

Електромагнітні витратоміри мають значні переваги: високу точність, яка не залежить від температури рідини, її в’язкості, густини; лінійність шкали; можливість застосування в трубах будь-якого діаметра; висока швидкодія (це особливо важливо для вимірювання витрат швидкоплинних потоків та при застосуванні в системах регулювання); здатність вимірювати витрату в’язкого, агресивного середовища і рідин з абразивом; менші довжини прямих ділянок труб порівняно з іншими витратомірами (ці витратоміри можна монтувати в будь-якому положенні на відстанях не менше 20 діаметрів трубопроводу після місцевих опорів і не менше 8 діаметрів до місцевих опорів). Гідравлічні втрати на приладі мінімальні, тому що первинні перетворювачі електромагнітних витратомірів не мають частин, що виступають всередину трубопроводу, звужень або змін профілю. Відсутність порожніх заглиблень виключає застій і коагуляцію вимірюваного

продукту. Тому ці витратоміри використовують в біохімічній і харчовій промисловості, де домінуючими є вимоги до стерильності середовища. За їх допомогою можна також вимірювати витрату водопровідної води, кислот, лугів та інших рідин, використовуваних у хімічній промисловості.

Але електромагнітні витратоміри непридатні для вимірювання витрат газу та пари, а також рідин діелектриків – таких, як спирти та нафтопродукти.

Електромагнітні витратоміри можна застосовувати для вимірювання витрати в межах  $1 \div 5000 \text{ м}^3/\text{год}$  у трубопроводах з діаметром  $10 \div 1000 \text{ мм}$  за лінійної швидкості потоку  $0,6 \div 10 \text{ м/с}$ . Класи точності електромагнітних витратомірів становить  $0,5 \div 1,5$ . Сучасні електромагнітні витратоміри використовують імпульсне живлення низької частоти для електромагнітів і використовують мікропроцесорні пристрої для перетворення сигналів.

### **Акустичні (ультразвукові) витратоміри**

Акустичні витратоміри – це прилади що ґрунтуються на вимірюванні того чи іншого ефекту, який виникає у разі проходження акустичних коливань через потік рідини або газу і залежить від витрати. Майже всі акустичні витратоміри, що застосовують на практиці, працюють в ультразвуковому діапазоні частот і тому їх називають ультразвуковими. Дані прилади прийнято розділяти на дві основні групи:

- витратоміри, які базуються на переміщеннях акустичних коливань рухомим середовищем;
- витратоміри, які побудовані на ефекті Доплера.

Найбільшого поширення набули прилади, що ґрунтуються на вимірюванні різниці часу проходження акустичних коливань за напрямом руху потоку і проти нього. Значно рідше зустрічаються прилади, у яких акустичні коливання спрямовують перпендикулярно потоку і вимірюють ступень відхилення цих коливань від початкового напрямку. Прилади, побудовані на ефекті Доплера, призначені в основному для вимірювання місцевої швидкості, але їх також застосовують для вимірювання витрати.

Вимірювальні схеми цих приладів простіші за інші. Поряд із трьома зазначеними різновидами ультразвукових витратомірів є акустичні витратоміри, що одержали назву довгохвильових, оскільки вони працюють у звуковому діапазоні частот акустичних коливань.

**Ультразвукові витратоміри з вимірюванням різниці часу проходження акустичних коливань.** Принцип роботи таких приладів засновано на вимірюванні різниці часу проходження акустичних коливань за потоком і проти нього і пояснюється схемою наведеною на рисунку 6.46. Джерело випромінювання (В) і приймач (П) ультразвуку (п'єзоелементи) встановлені зі зміщенням – на відстані  $L$  одне від одного. Кожен з п'єзоелементів по черзі виконує функції випромінювання і прийому ультразвукових коливань.

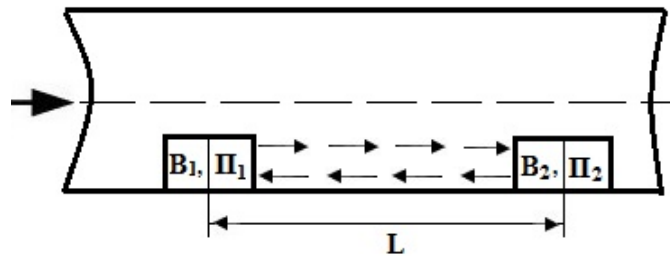


Рисунок 6.45 – Схема ультразвукового витратоміра

Ультразвукові коливання, що створені випромінювачем  $V_1$ , проходять в трубопроводі крізь контрольовану рідину в напрямку руху потоку рідини і реєструється приймачем  $\Pi_2$ . Час  $\tau_1$  поширення звукової хвилі у напрямі руху потоку від випромінювача  $V_1$  до приймача  $\Pi_2$  визначається за формулою:

$$\tau_1 = \frac{L}{c + V} = \frac{L}{c} \cdot \frac{1}{1 + V/c}$$

де  $V$  – середня швидкість потоку середовища на відрізку;  $c$  – швидкість звуку в контрольованому середовищі.

Одночасно з прийомом сигналу від випромінювача  $V_1$  випромінювачем  $V_2$  створюються коливання, що проходять крізь контрольовану рідину в напрямку протилежному руху потоку рідини. Час  $\tau_2$  поширення звукової

хвилі у напрямі протилежному руху потоку від випромінювача  $B_2$  до приймача  $\Pi_1$  визначається за формулою:

$$\tau_2 = \frac{L}{c - V} = \frac{L}{c} \cdot \frac{1}{1 - V/c}$$

Різниця часу проходження акустичних коливань за потоком і проти нього:

$$\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1 = \frac{L}{c} \cdot \frac{1}{1 - V/c} - \frac{L}{c} \cdot \frac{1}{1 + V/c} = \frac{L}{c} \cdot \frac{2 \frac{V}{c}}{1 - \frac{V^2}{c^2}} = \frac{L}{c^2} \cdot \frac{2V}{1 - \frac{V^2}{c^2}}$$

Відношення  $V^2/c^2$  набагато менше за одиницю (для рідин  $c = 1000 \div 1500$  м/с, а  $V \approx 3 \div 4$  м/с) тому без значної втрати точності можна записати:

$$\Delta\tau = \frac{2LV}{c^2} \quad (6.20)$$

Рівняння (6.20) показує, що різниця часу  $\Delta\tau$  пропорційна середній швидкості потоку  $V$ , а з урахуванням площі поперечного перерізу трубопроводу, по якому протікає контрольована рідина, буде пропорційна і об'ємній витраті. У більшості випадків площини випромінювальних і приймальних п'єзоелементів розташовані під деяким кутом до осі труби (рис. 6.46). Тоді акустичні коливання проходять в контрольованому середовищі відстань довжиною  $L$  під кутом до осі труби (нехай це кут  $\beta$ ). В такому випадку формула (6.20) набуває вигляду:

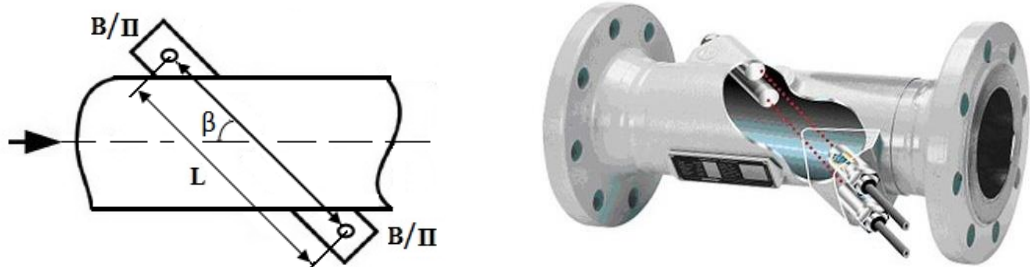


Рисунок 6.46 – Схема ультразвукового витратоміра з двома п'єзоелементами та приклад виконання ультразвукового витратоміра з чотирма п'єзоелементами

$$\Delta\tau = \frac{2LV}{c^2} \cos \beta \quad (6.21)$$

Ультразвуковий витратомір (рис. 6.46) складається з відрізка труби, на якому встановлені два (або чотири) п'єзоелементи. Кожен п'єзоелемент (В/П) працює поперемінно в режимі випромінювача і приймача, що забезпечується відповідною системою перемикачів. П'єзоелементи можуть встановлюватись ззовні трубопроводу, але здебільшого їх розміщують в особливих западинах трубопроводу – кишнях. Порожнини кишень можуть бути незаповненими чи заповненими звукопровідником з металу чи органічного скла. Перетворювачі з незаповненими кишнями для запобігання засмічуванню використовують тільки для чистих і неагресивних рідин. При зовнішніх п'єзоелементах, що встановлюються на стінку трубопроводу, зондуєчий імпульс потрапляє в вимірюване середовище проходячи через стінку. Їх важливою перевагою є не порушення цілісності трубопроводу і відсутність контакту п'єзоелементів з вимірюваною речовиною. Але в них наявний високий рівень паразитних сигналів і завад, що викликані проходженням акустичних коливань через стінку, та менша чутливість.

Звукові коливання високої частоти (20 кГц і вище) проходять крізь контрольовану рідину за напрямком її руху і назад. Метод вимірювання витрати, що заснований на безпосередньому вимірі різниці часу проходження коротких імпульсів ультразвуку за потоком і проти нього називають часоімпульсним, а витратоміри, що працюють за цим методом часоімпульсними витратомірами.

Крім цього існує кілька способів вимірювання  $\Delta t$ : фазовий, за яким вимірюється пропорційна  $\Delta t$  різниця фазових зсувів акустичних коливань, які направляються по потоку і проти нього (фазові витратоміри); частотний метод, за яким вимірюється різниця частот повторення коротких імпульсів або пакетів акустичних коливань, які направляються по потоку і проти нього (частотні витратоміри). Значне поширення отримав останній метод і його різновиди. За кількістю акустичних каналів вимірювання (так званих променів) ультразвукові витратоміри розділяють на:

- одноканальні (однопроменеві) – мають два п'єзоелемента, кожен з яких по черзі виконує функції випромінювання і приймання;
- двоканальні (двопроменеві) – мають два випромінювача і два приймачі, які створюють два незалежних акустичних канали;
- багатоканальні (багатопроменеві) – мають більше двох каналів і застосовуються для вимірювання витрати деформованих потоків з метою досягнення підвищеної точності.

**Ультразвукові витратоміри з перпендикулярним спрямуванням акустичних коливань.** В основу їх роботи покладено вимірювання зміщення потоком контрольованої рідини ультразвукової хвилі, що спрямована перпендикулярно до напрямку руху потоку. Вони істотно відрізняються від вище розглянутих тим, що акустичні коливання не спрямовують за потоком і проти нього, а ультразвуковий промінь направлений перпендикулярно до руху потоку (рис. 6.47). Величина відхилення променя від перпендикулярного напрямку залежить від швидкості  $V$  контрольованої речовини.

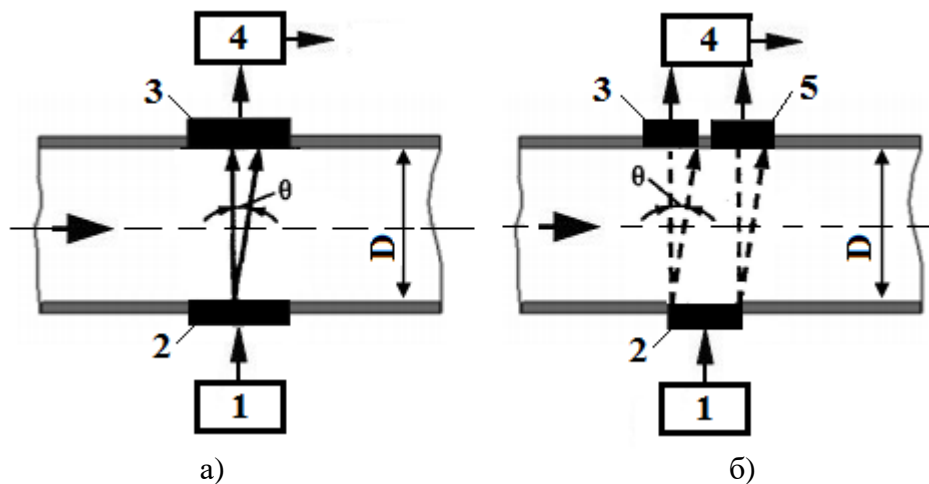


Рисунок 6.47 – Схеми ультразвукових витратомірів з випромінюванням, перпендикулярним до осі труби: а – з одним приймальним п'єзоелементом; б – з двома приймальними п'єзоелементами; 1 – генератор; 2 – випромінювальний п'єзоелемент; 3, 5 – приймальні п'єзоелементи; 4 – підсилювач

Ультразвукові хвилі випромінюються середовище по нормалі до напрямку руху потоку п'єзоелементом 3. Сприймаються ці коливання одним або двома п'єзоелементами 3,5. Кут відхилення  $\theta$  коливань від перпендикулярного напрямку визначають за рівнянням:

$$\tan \theta = x/D = V/c \quad (6.22)$$

де  $x$  – лінійне відхилення на приймальних п'єзоелементах;  $D$  – діаметр труби.

Отже:  $x = VD/c$ , звідки витікає, що лінійне відхилення  $x$  ультразвукового променя прямо пропорційне швидкості  $V$  контрольованого потоку рідини. При використанні одного приймального елемента (рис. 6.47.а) кількість акустичної енергії, що надходить на нього, буде зменшуватися з підвищенням швидкості  $V$ , і вихідний сигнал підсилювача 4 також буде зменшуватись, оскільки в міру відхилення ультразвукового променя від нормалі дедалі вужча його частина буде потрапляти на п'єзоелемент приймача 3. При використанні двох приймальних п'єзоелементів 3, 5, розміщених симетрично відносно випромінювача 2 (рис. 6.47.б), вихідний сигнал диференціального підсилювача 4 зі збільшенням швидкості  $V$  буде зростати.

Два приймальні 3, 5 п'єзоелемента встановлюються поруч таким чином, щоби при нерухомому вимірюваному потоці (швидкість  $V=0$ ) інтенсивності коливань, прийняті кожним п'єзоелементом були рівні, і тоді вихідний сигнал диференціального підсилювача 4 дорівнюватиме нулю завдяки рівності акустичної енергії, що надходить на увімкнені зустрічно приймальні п'єзоелементи. Схеми витратомірів, що працюють за даним методом прості, однак точність вимірювання не висока.

**Витратоміри, що побудовані на ефекті Доплера.** Такі прилади використовують ефект Доплера, який базується на зміні частоти хвилі під час її відбивання від рухомого об'єкту – частинки потоку. Зміна частоти відбитого сигналу дозволяє визначити швидкість потоку. Об'єктами, що відбивають зондуєчий сигнал в потоці рідини, є різноманітні домішки,

включення та бульбашки газу, швидкість яких відслідковується витратоміром.

Перетворювач, що працює за цим методом (рис. 6.48), має передавальний п'єзоелемент 1, який випромінює гармонійний ультразвуковий сигнал в вимірюване середовище. Приймальний п'єзоелемент 2 сприймає сигнал відбитий від неоднорідностей потоку, який має доплерівській частотний зсув.

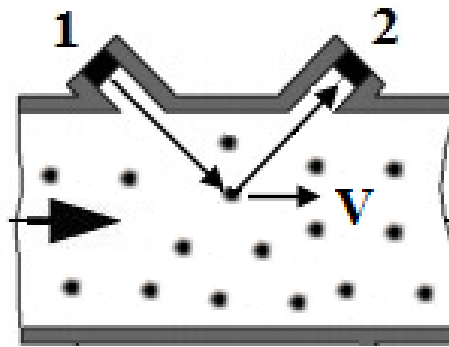


Рисунок 6.48– Схема доплерівського ультразвукового витратоміра: 1 – випромінювальний п'єзоелемент; 2 – приймальний п'єзоелемент

Різниця частот  $f_1 - f_2$ , що виникає при відбитті акустичних коливань неоднорідностями потоку, залежить від швидкості  $V$  частинки, що відбиває акустичні коливання, і швидкості поширення цих коливань:

$$f_1 - f_2 = f_1(\cos \alpha' - \cos \alpha'') V/c, \quad (6.23)$$

де  $f_1, f_2$  – частоти акустичних коливань відповідно випромінювача і відбита від частинки, яка сприймається приймальним п'єзоелементом;  $\alpha'$  – кут між напрямком зондуючого променя і вектором швидкості  $V$  частинки, яка відбиває сигнал;  $\alpha''$  – кут між напрямком відбитого променя і вектором швидкості.

Таким чином, вимірювана різниця частот може слугувати для визначення швидкості  $V$  частинки, яка відбиває сигнал, тобто для вимірювання місцевої швидкості потоку (а відповідно і витрати). Для застосування доплерівських ультразвукових витратомірів потрібно знати співвідношення між швидкістю частинки, яка відбиває сигнал, і середньою

швидкістю потоку. Частинки для турбулентних потоків повинні знаходитись на відстані  $0,12D$  від стінки труби, де швидкість відповідає середній швидкості потоку. В іншому випадку необхідна індивідуальне градування витратоміра.

Допплерівські ультразвукові витратоміри знаходять досить широке застосування. Вони використовуються головним чином для вимірювання витрати різних гідросумішей, в тому числі пульп, суспензій і емульсій, які містять частинки, що відрізняються по щільності від оточуючої речовини. Але і природних неоднорідностей (в тому числі газових бульбашок), наявних в різних рідинах, буває досить для прояви ефекту Доплера. За їх відсутності рекомендується вдувати в потік повітря або газ через спеціальну трубку на деякій відстані перед перетворювачем витрати. Витрата газу становить  $0,005 \div 0,1\%$  від витрати вимірюваної речовини.

### Оптичні витратоміри

Оптичними називаються витратоміри, засновані на залежності від витрати речовини того чи іншого оптичного ефекту в потоці. Є кілька різновидів цих приладів:

- доплерівські оптичні витратоміри, засновані на вимірі різниці частот, що виникає при відображенні світлового променя рухомими частинками потоку;
- витратоміри, засновані на ефекті Фізо-Френеля, в яких вимірюється який-небудь параметр (зрушення інтерференційних смуг або зсув частоти світлових коливань), пов'язаний із залежністю швидкості світла в рухомій прозорій речовині від швидкості останнього;
- витратоміри, засновані на особливих оптичних ефектах, наприклад, залежність оптичних властивостей волоконного світловода від швидкості оточуючого його потоку;
- інші.

Оптичні витратоміри часто називають лазерними, оскільки їх розвиток став можливим після створення потужних оптичних квантових генераторів

(ОКГ), які частіше називають лазерами. Оптичні витратоміри мають багато переваг: висока точність і швидкодія, висока чутливість, відсутність контакту з вимірюваним середовищем і ряд інших. Вони застосовуються для оптично прозорих рідин, до яких відносяться вода, гас, бензин, спирт, чотирихлористий вуглець, розчини сірчаної та азотної кислот, та газів. Лазерні витратоміри використовують також при вимірюванні витрат високо- і низькотемпературних (криогенних) рідин і газів.

### Іонізаційні витратоміри

Іонізаційними витратомірами називаються прилади, засновані на вимірі того чи іншого ефекту, який залежить від витрати, і виникає в результаті безперервної або періодичної іонізації потоку газу, рідше рідини. Іонізаційні витратоміри поділяються на дві істотно відмінні одна від одної групи:

- витратоміри, в яких вимірюється залежний від витрати іонізаційний струм між електродами, що виникає в результаті безперервної штучної іонізації потоку газу або рідини радіоактивним випромінюванням або електричним полем;
- витратоміри, в яких вимірюється залежний від витрати час переміщення на певній ділянці шляху іонізаційних міток, що виникають в результаті періодичної іонізації потоку газу іонізуючим випромінюванням або електричним розрядом. Ці витратоміри називаються мітковими іонізаційними і розглянуті у відповідному розділі.

Похибка приладів, які засновано на вимірюванні іонізаційного струму, є доволі великою (5%), і застосовуються вони порівняно зрідка, переважно для вимірювання швидкостей газових потоків. Існують розробки іонізаційних приладів, які призначені для вимірювання витрат рідин-діелектриків і мають похибку вимірювання в межах 2÷4%. Міткові іонізаційні витратоміри є більш точнішими.

**Витратоміри з іонізацією потоку газу радіоактивним випромінюванням** – це витратоміри у яких в якості іонізатора виступає радіоактивне випромінювання. Радіоактивне джерело, що створює  $\alpha$ -або  $\beta$ -

випромінювання, може перебувати як усередині, так і зовні труби. Це випромінювання іонізує потік газу, що рухається в трубці. Всередині неї поміщені два електроди, до яких подана різниця потенціалів. Сила іонізаційного струму, що виникає між електродами, буде залежати від числа іонізованих молекул в проміжку між електродами, тобто від швидкості руху газу.

Є два типи іонізаційних витратомірів. У першому – джерело випромінювання і електроди знаходяться з однієї сторони труби один від одного на деякій відстані  $L$  по осі труби (рис. 6.49.а) і іонізаційний струм тече вздовж осі труби. У другому – іонізаційний струм тече не вздовж, а впоперек труби, так як джерело випромінювання і прийомні електроди розташовані на протилежних сторонах труби (рис. 6.49.б).

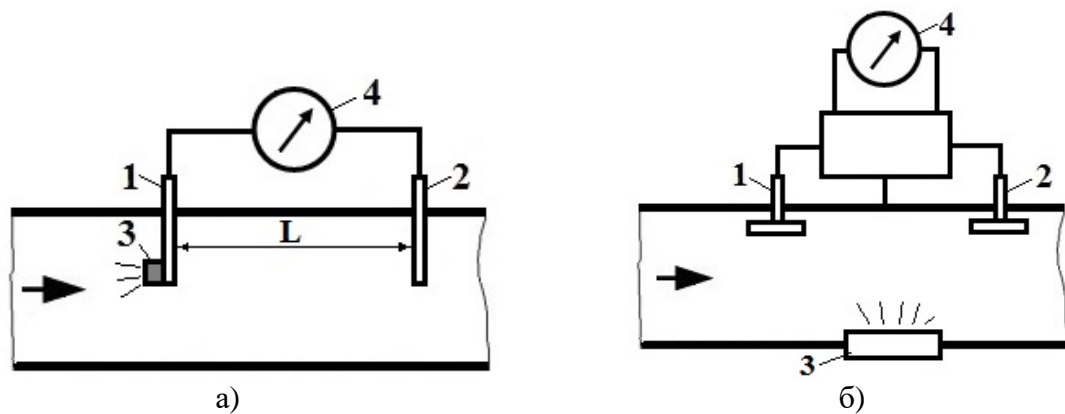


Рисунок 6.49 – Схеми іонізаційних витратомірів: а – джерело

випромінювання і прийомні електроди знаходяться з однієї сторони труби; б

– джерело випромінювання і прийомні електроди розташовані на протилежних стінках труби

У схемі наведеній на рисунку 6.49.а джерело випромінювання (шар радіоактивної речовини, що нанесений на електрод) розташоване на першому по ходу потоку речовини електроді 1, а другий приймальний електрод 2 розташований від першого на відстані  $L$ . За відсутності витрати всі іонізовані молекули рекомбінують, перш ніж досягнуть приймального електроду і струму в ланцюзі не буде. Зі збільшенням витрати буде зростати число іонізованих молекул, що досягають прийомних електродів, і сила струму в

ланцюзі почне зростати. Спочатку зростання сили струму пропорційне витраті, але потім це зростання струму почне сповільнюватися. Струм буде наближатись до деякого постійного значення, коли все іонізовані молекули, не встигнувши рекомбінувати, досягнуть приймального електроду. Подальшому зростання швидкості газу призводить навіть до невеликого зменшення сили струму, яке пояснюється тим, що частина іонізованих молекул проноситься вздовж електродів.

У схемі наведеній на рисунку 6.50.б є два прийомних електроди 1 і 2, що розташовані на стінці труби симетрично відносно джерела випромінювання 3, яке знаходиться на протилежній стінці. Електроди 1 і 2 включені назустріч один одному. За відсутності витрати і повній симетрії схеми різниця іонізаційних струмів, що протікають через приймальні електроди, дорівнює нулю. Зі збільшенням витрати число іонізованих молекул, що досягають електрода 1, зменшується, а тих що досягають електрода 2 збільшується, завдяки чому різниця іонізаційних струмів зростає. Іонізаційний струм в схемах поряд із залежністю від швидкості або витрати потоку залежить і від різниці напруги, прикладених до електродів. Із зростанням напруги збільшується швидкість переміщення іонів уздовж силових ліній електричного поля.

**Ядерно-магнітні витратоміри** засновані на залежності ядерно-магнітного резонансу (ЯМР) від витрати потоку.

### **Концентраційні витратоміри**

Серед витратомірів групи Г: міткові і концентраційні слугують для разових вимірювань, наприклад, при перевірці промислових витратомірів на місці їх установки. Дуже перспективні кореляційні прилади, зокрема, для вимірювання витрат двофазних середовищ.

Концентраційні витратоміри засновані на залежності кратності розбавлення речовини індикатора, який вводиться в потік від витрат. Такі прилади називають іноді витратомірами, які засновано на методі щеплення, на сольовому методі, на методі змішування тощо. Істотною перевагою даного

методу вимірювання витрат є відсутність інформації про розміри поперечного перерізу трубопроводу або іншого каналу. Раніше подібні витратоміри служили для вимірювання витрати води, із застосуванням сольового розчину в якості індикатора потім почали застосовувати і інші індикатори, зокрема радіоактивні ізотопи. Це дозволило застосувати концентраційний метод також для вимірювання витрати газу і навіть пари. Похибка вимірювань витрат за допомогою даного методу залежить від індикатора, степені його перемішування та від достовірності результатів по вимірювання кінцевої концентрації індикатора. Похибка вимірювання витрат знаходиться у межах від  $0,5 \div 1\%$  до  $2 \div 3\%$ .

Розроблено і реалізуються два різновиди концентраційного методу. У першій проводиться безперервне (протягом декількох хвилин) введення індикатора і при цьому вимірюється його витрата. У другій відбувається короткочасне або залпове введення відомої кількості індикатора.

Принцип дії **концентраційного витратоміра з безперервним введенням індикатора** полягає в вимірі ступеня або кратності розведення індикатора після змішування з вимірюваним речовиною. Тут протягом деякого часу в потік вводиться індикатор, об'ємна витрата і початкова концентрація  $(Q_i, c_i)$  якого повинні бути відомі. Час введення має бути не менше того, що забезпечить отримання в контрольному перерізі (після належного змішування з вимірюваним речовиною) постійної концентрації  $c_x$  індикатора протягом, принаймні, кількох хвилин (зазвичай, вибирають від 5 до 30 хв.). Тоді об'ємну витрату  $Q_0$  вимірюваної речовини можна знайти з рівняння матеріального балансу:

$$Q_0 c_0 + Q_i c_i = (Q_0 + Q_i) c_x, \quad (6.24)$$

де  $c_0$  – можлива початкова концентрація індикатора контрольованій речовині (зазвичай  $c_0=0$ ).

Розв'язавши рівняння (6.24) відносно об'ємної витрати  $Q_0$  отримаємо:

$$Q_0 = Q_i (c_i - c_x) / (c_x - c_0), \quad (6.25)$$

З урахуванням того, що  $c_0=0$  і  $c_x \ll c_i$  формула набуває вигляду:

$$Q_0 = Q_i c_i / c_x, \quad (6.26)$$

Звідси витікає, що для точного визначення витрати  $Q_0$  необхідне точне визначення малих концентрації, що часто викликає певні труднощі. Для цієї мети в залежності від індикатора застосовують різні методи: хімічне титрування, колориметричний, флуориметричний, рефрактометричний, інтерференційний, кондуктометричний і інші. Ряд методів або дуже трудомісткі, або не забезпечують високої точності вимірювання. При використанні індикаторів барвників (біхромату натрію, флуоресцеїну тощо) застосовують флуориметричний і колориметричний методи. При використанні радіоактивних індикаторів їх концентрація визначається за допомогою іонізаційних лічильників. Скелетна схема концентраційний витратоміра з безперервним введенням індикатора показана на рисунку 6.50.

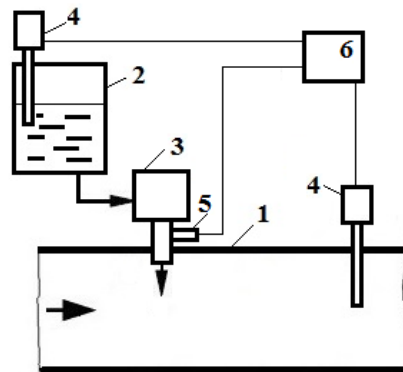


Рисунок 6.50 – Скелетна схема концентраційного витратоміра з безперервним введенням індикатора: 1 – трубопровід; 2 – посудина; 3 – насос дозатор; 4 – кондуктометричний перетворювач; 5 – лічильник; 6 – вимірювальний блок

Розчин індикатора з посудини 2 за допомогою насоса дозатора 3 подається в потік, що протікає по трубопроводу 1. Об'ємна витрата індикатора  $Q_i$ , введеного в потік контрольованої речовини контролюється лічильником 5, а його концентрація  $c_i$  – кондуктометричним перетворювачем 4, що встановлений в посудині 5. Після перемішування індикатора з контрольованою речовиною вимірюється концентрація  $c_x$  індикатора в потоці за допомогою кондуктометричного перетворювача 4, що встановлений в

трубопроводі 1 (кондуктометричний перетворювач може бути встановлений і проміжній ємності, в яку відбирається проба з трубопроводу 1). Значення концентрації  $c_x$  дозволяє визначити витрату контрольованої речовини з урахуванням об'ємної витрати  $Q_i$  і початкової концентрації  $c_i$  індикатора у вимірювальному блоці 6.

Слід зауважити, що необхідна довжина ділянки  $L$  трубопроводу, і кінці якої відбувається повне перемішування залежить від багатьох причин. Найбільша довжина ділянки ( $L \approx 100D$ ,  $D$  – діаметр трубопроводу) буде, коли перемішування відбувається за рахунок турбулентної дифузії в прямій ділянці трубопроводу. Зменшення необхідної довжини ділянки ( $L \approx 30 \div 50D$ ) можна досягти рядом заходів (наприклад, з використанням місцевих опорів, введенням індикатора проти потоку з великою швидкістю тощо). В стандартах ISO наведені формули теоретичного визначення відносної довжини ділянки  $L/D$ .

**Витратоміри з короткочасним (залповим) введенням речовини індикатора.** Принцип дії у цих витратомірів такий само, як у попередніх, але введення індикатора тут не безперервне, а практично миттєве. З великою швидкістю в потік, витрата якого підлягає визначенню, вводиться відома кількість індикатора. Якщо це розчин, то повинні бути відомі його об'єм і концентрація індикатора в ньому. Після повного змішування його з вимірюваною речовиною, при якому досягається рівномірний розподіл індикатора, по перетину потоку проводиться безперервно або яким-небудь іншим шляхом вимірювання змінної в часі концентрації індикатора в потоці протягом часу, що забезпечує повний прохід індикатора через контрольний переріз.

Перевага залпового методу – скорочення часу вимірювання і зменшення витрати індикатора, що має значення у випадку великих витратах вимірюваної речовини. Він може бути рекомендований для вимірювань, які не потребують особливо високої точності. Залповий метод можна реалізувати за допомогою компактною і малогабаритною вимірювальною установкою.

**Мітковими** називають **витратоміри**, засновані на вимірі часу переміщення будь-якої характерною частини (мітки) потоку на контрольній ділянці шляху. Мітку в потоці створюють, як правило, штучним шляхом. Мітки можуть бути найрізноманітніші: іонізаційні, радіоактивні, фізико-хімічні, теплові, оптичні, ядерно-магнітні та інші. Відповідно різні будуть пристрої для створення мітки і її детектування при проходженні нею контрольної ділянки шляху. Радіоактивні, фізико-хімічні та деякі оптичні мітки створюють шляхом введення в потік сторонньої речовини-індикатора. У більшості випадків для введення газового індикатора при вимірюванні витрати газу, розчину солі при вимірюванні витрати рідини, а також радіоактивного ізотопу застосовують пружинні пристрої, що забезпечують швидке введення речовини-індикатора. У більшості інших випадків мітка утворюється в самому потоці без введення сторонньої речовини. Міткові витратоміри це прилади не безперервної, а дискретної дії, але за високої частоті утворення міток можна говорити про практично безперервне вимірювання витрат. Значно частіше міткові витратоміри застосовують не в якості експлуатаційних приладів для безперервного вимірювання витрати, а для різних лабораторних і дослідницьких робіт, і зокрема під час градування і повірки інших витратомірів.

Похибка вимірювання витрати у міткових витратомірів коливається від  $0,1 \div 0,2$  до  $2 \div 3$  % в залежності від роду мітки, вимірювальної апаратури, способу детектування тощо. Довжина контрольної ділянки, в залежності від роду мітки, може бути від декількох міліметрів до декількох кілометрів. Міткові витратоміри можуть бути з одним або двома детекторами мітки. У першому випадку (рис. 6.51.а) контрольною відстанню  $L$  вважається відстань від місця введення мітки 1 до детектора 2, у другому (рис. 6.51.б) – відстань між двома детекторами 2 і 3.

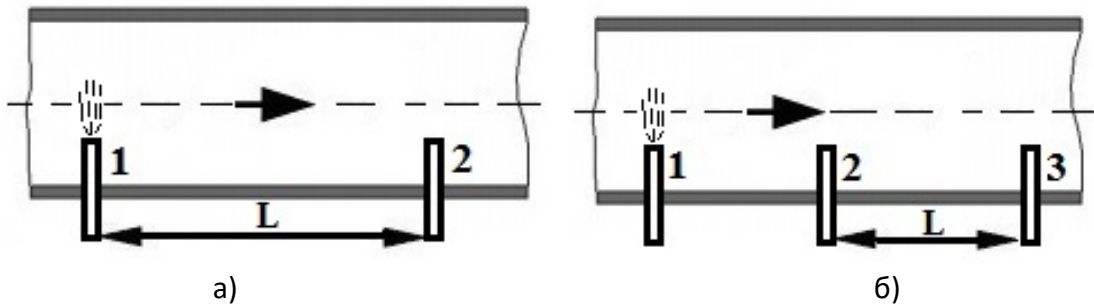


Рисунок 6.51 – Схеми міткових витратомірів: а – з одним детектором; б – з двома детекторами; 1 – місце введення мітки; 2, 3 – детектори

Швидкість мітки визначається з виразу:  $V=L/\Delta\tau$  (де  $\Delta\tau$  – вимірний час проходження міткою контрольної ділянки  $L$ ). Об'ємну витрату визначають за формулою:

$$Q_0=k \cdot L \cdot S / \Delta\tau, \quad (6.25)$$

де  $k = V_{п}/V_{м}$  – відношення середньої швидкості потоку до середньої швидкості мітки;  $S$  – площа поперечного перерізу трубопроводу.

**Кореляційні витратоміри.** Методи визначення витрати, які отримали назву кореляційних, інтенсивно розвиваються останнім часом для вимірювання витрати різних однофазних і багатofазних середовищ. Кореляційний витратомір є подальшим розвитком міткового витратоміра, принцип дії якого заснований на визначення часу переміщення на заданій ділянці шляху мітки, що введена в потік контрольованої речовини. Цей час який залежить від витрати рідини. Принцип дії цих витратомірів полягає у визначенні швидкості потоку, як відношення довжини ділянки  $L$  до часу його проходження міткою  $\Delta\tau$ . Особливо близькі до міткових ті кореляційні витратоміри, у яких випадкові процеси створюються штучним шляхом. Відмінність цих витратомірів в наступному:

- в кореляційному витратомірі, на відміну від міткового мітка не створюється штучно, а є випадковою величиною (носить випадковий характер);
- у міткового витратомірі перетворювачі виробляють дискретні сигнали при проходженні міткою контрольної ділянки, а в кореляційному

виробляються безперервні сигнали, що відповідають характеру зміни випадкових процесів в контрольованих перерізах.

Кореляційні витратоміри – витратоміри, які запам'ятовують в заданому перерізі трубопроводу образ потоку контрольованого середовища з його подальшим розпізнаванням в іншому перерізі труби, розташованого на деякій відстані від першого. У відповідності до міжнародного стандарту ISO 4006 та ГОСТ 15528-86 «Засоби вимірювання витрати, об'єму або маси протікають рідини і газу. терміни та визначення» кореляційний витратомір (перетворювач витрати) визначають наступним чином. Кореляційний витратомір – перетворювач витрати рідини (газу), в якому створюється сигнал вимірювальної інформації, заснований на залежності часу переміщення місцевої неоднорідності потоку на ділянці шляху, що визначається за допомогою кореляційної функції, від витрати рідини (газу).

Більшість однофазних потоків, не кажучи вже про багатофазні, не строго однорідні. Тому ті або інші властивості або параметри потоку (густина, електрична провідність, температура тощо) безперервно змінюються випадковим чином. Якщо за допомогою корелометра визначити абсцису максимальної ординати взаємної кореляційної функції двох параметрів потоку одного і того ж роду, що випадково змінюються у двох перерізах, які віддалені один від одного на невеликій відстані  $L$ , то ця абсциса буде відповідати часу  $\Delta t$  переміщення потоку на вказаній відстані. Об'ємну витрату  $Q$  можна визначити за формулою:  $Q_0 \approx SL / \Delta t$ .

## 6.2 Опис лабораторних засобів та обладнання

Лабораторна установка (рис. 6.52) складається з пристроїв для вимірювання витрат рідини та приладів керування. Установка призначена для калібрування засобів вимірювання витрат рідини.

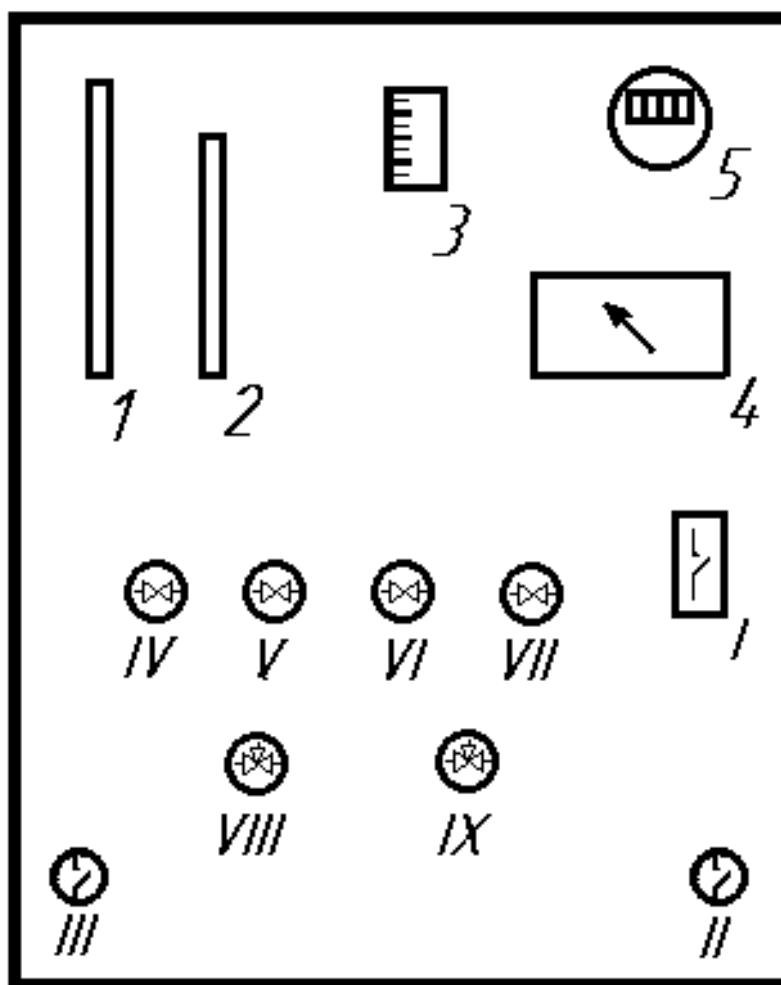


Рисунок 6.52 – Схема лабораторної установки

Живлення установки забезпечується увімкненням пакетного вимикача *I*. Рух рідини в установці забезпечує циркуляційний насос, який знаходиться усередині установки і вмикається вимикачем *III* на передній панелі. Вимикач *II* призначений для вмикання підсвічування для ротаметрів. За допомогою вентиля-перемикача *VIII* здійснюється зміна режиму роботи установки з байпасу (рідина оминає вимірювальні прилади) на робочий.

Вентиль-перемикач *IX* встановлений для майбутнього розширення можливостей установки і в даний момент не задіяний.

Прилади 1 і 2 – скляні поплавкові ротаметри. Витрати рідини через них регулюється вентилями *IV* і *V* відповідно. Прилад 3 являє собою поплавковий ротаметр KROHNE DK32 з магнітною передачею на аналоговий індикатор, який показує вимірне значення. Регулювання витрат рідини через нього здійснюється вентилем *VI*. Прилад 4 – міліамперметр – показуючий прилад

для датчика витрат рідини на основі водного ротора и давача Холла. Регулювання витрат рідини через датчик здійснюється вензелем *VII*.

Контрольним приладом в роботі є високоточний водяний лічильник 5 ResidiaJet Q3 4.0 класу С. Для виконання роботи необхідний секундомір.

*Примітка:* на даний час прилади 2 та вентиля *V* і *IX* у даній роботі не використовувати.

### **6.3 Заходи безпеки під час виконання лабораторної роботи**

Під час виконання роботи «Вимірювання витрат рідини» слід враховувати що рідина в установці пройшла хімічне оброблення та не може використовуватися для пиття та побутових цілей.

Під час виконання лабораторних робіт категорично **забороняється:**

- доступ студентам до монтажної частини лабораторної установки;
- виконувати на установці операції, які не передбачені ходом роботи;
- працювати на установці за наявності у ній будь-яких несправностей, проводити самостійне усунення несправностей установки;
- тримати вентиль-перемикач *VIII* в режимі «Робота» протягом тривалого часу за перекритих вентилів *IV – VII*.
- проводити будь-які роботи на установці без дозволу викладача або відповідального інженерного працівника у лабораторії.

### **6.4 Послідовність виконання роботи**

1. Ознайомитися з лабораторною установкою.
2. Подати електричне живлення на стенд пакетними вимикачем *I* (при цьому загоряється контрольна зелена лампа).
3. Увімкнути підсвічування ротаметрів за допомогою перемикача *II*.
4. Увімкнути насос за допомогою перемикача *III*.
5. Вентиль-перемикач *VIII* перевести у положення «Робота».

6. За допомогою вентиля *IV* встановити значення витрат рідини за ротаметром 1 (за вказівкою викладача). За необхідності, обертаючи вентиль *IV* підтримувати це значення на заданому рівні.
7. За допомогою секундоміру визначити час проходження трьох літрів рідини за лічильником 5 (три повних оберти рухомого колеса лічильника).
8. Показання витрати за ротаметром 1 і середню витрату рідини за приладом 5 занести до відповідної таблиці протоколу лабораторної роботи.
9. Пункти 6-8 виконати для 4-5 заданих значень за ротаметром 1 (20-80 % шкали приладу).
10. Провести описане в пунктах 6-9 дослідження за приладом 3, регулюючи витрати рідини вентилям *VI* (40-100 % шкали приладу).
11. Провести описане в пунктах 6-9 дослідження за показуючим приладом 4, регулюючи витрати рідини вентилям *VII* (40-90 % шкали приладу).

Таблиця 6.1

## Результати дослідження приладів для вимірювання витрат

№ досліду	Відмітка шкали, %	Об'єм рідини за лічильником 5, л	Час проходження рідини, с	Середня витрата рідини, л/с
<b>Прилад 1</b>				
1				
2				
3				
4				
<b>Прилад 2</b>				
1				
2				
3				
4				
<b>Прилад 4</b>				
1				
2				
3				
4				

## 6.5 Оброблення та аналізування результатів. Оформлення звіту

Звіт повинен містити схеми витратомірів і установки, результати випробувань, побудовані градувальні характеристики приладів 1, 3, 4.

### Контрольні запитання

1. У чому полягає відмінність між витратою та кількістю речовини?
2. У чому полягає відмінність між витратоміром та лічильником?
3. Якими методами вимірюють витрату рідин, газів та сипких речовин?
4. В чому полягає принцип дії витратомірів із звужувальними пристроями?
5. Які стандартні звужувальні пристрої використовують для вимірювання витрати рідини та газу?
6. З чого складається вимірювальний комплект витратоміру змінного перепаду тиску?
7. В яких звужувальних пристроях найбільша втрата тиску?
8. В чому полягає принцип дії витратомірів з напірними пристроями (витратомірів швидкісного напору)?
9. В чому полягає особливість конструкції диференціальної трубки Піто?
10. В чому полягає принцип дії витратомірів змінного рівня?
11. Які отвори для витікання використовуються у витратомірах змінного рівня?
12. На які різновиди поділяють витратоміри обтікання?
13. В чому полягає принцип дії ротаметра?
14. В чому полягає відмінність скляних ротаметрів і поплавкових витратомірів?
15. Які застосовують системи передачі показань у поплавкових витратомірах?
16. В чому полягає особливість конструкції поршневого витратоміра?
17. Які види рухливого елемента використовують у тахометричних витратомірах?
18. В чому полягає принцип дії камерних тахометричних витратомірів?

19. Як працює лічильник з овальними шестернями?
20. Як працює ротаційний газовий лічильник?
21. На якому фізичному явищі заснована робота електромагнітного витратоміра?
22. У чому полягає принцип дії акустичних витратомірів?
23. На які групи поділяють акустичні витратоміри?
24. За якими параметрами визначають витрату в акустичних витратомірах?
25. Скільки акустичних каналів вимірювання можуть мати ультразвукові витратоміри?

## Список рекомендованої літератури

### Основна література

1. Чистофорова Н.В. Технические измерения и приборы. Ч.1. Измерение теплоэнергетических параметров: Уч. пособие / Н.В. Чистофорова, А.Г. Колмогоров. – Ангарск: АГТА. 2008. – 200 с.
2. Лукінюк М. В. Технологічні вимірювання та прилади: Навч. посіб./ М.В. Лукінюк. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 436 с.
3. Раннев Г.Г. Методы и средства измерений: учебник для вузов / Г.Г. Раннев. – М.: Изд. центр «Академия», 2003.
4. Кузнецов Н.Д. Сборник задач и вопросов по теплотехническим измерениям и приборам: учеб. пособие для вузов / Н.Д. Кузнецов, В.С. Чистяков. – М.: Энергоатомиздат, 1985, 328 с.
5. Кулаков М.В. Технологические измерения и приборы для химических производств / М.В. Кулаков. - М.: Машиностроение, 1983, 424 с.
6. ФрайденДж. Современные датчики: Справочник: Пер. с англ. / Под ред. Е.Л. Свинцова - М.: Техносфера, 2005, 592 с.
7. Измерения в промышленности: справ. изд. / под ред. П. Профоса. Пер. с нем. - М.: Металлургия, 1980, 648 с.

### Додаткова література. Вимірювання рівня

8. Каталог средства измерения: ООО "ИТЦ ПромКомплектИнжиниринг": режим доступа: <http://www.pribor-s.ru/index.php>.
9. Хансуваров К. И., Цейтлин В.Г. Техника измерения давления, расхода, количества и уровня жидкости, газа и пара: Учебное пособие для техникумов. — М.: Издательствостандартов, 1990, 287 с.

### Додаткова література. Вимірювання витрат

10. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ: Справочник: Кн.1 – 5-е изд. перераб. и доп. – СПб.: Политехника, 2005, 409 с.

- 11.Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ: Справочник: Кн.5 – 5-е изд. перераб. и доп. – СПб.: Политехника, 2004, 412 с.
- 12.ГОСТ 15528-86 Средства измерений расхода, объема или массы протекающих жидкости и газа. Термины и определения, 43с.
- 13.Хансуваров К. И., Цейтлин В.Г. Техника измерения давления, расхода, количества и уровня жидкости, газа и пара: Учебное пособие для техникумов. — М.: Издательство стандартов, 1990, 287 с.
- 14.Каталоги: Расходомеры. Плотномеры. режим доступа: <http://www5.emersonprocess.com/ru-RU/brands/Metran/products/Pages/catalog.aspx>
- 15.ПРАМЕНЬ. Разработка и производство расходомеров, измерительных систем, поверочного оборудования. режим доступа: <http://npropramen.ru/>.