

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ТЕХНОЛОГІЧНІ ВИМІРЮВАННЯ ТА ПРИЛАДИ МЕТРОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИЛАДІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ 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
2019

Технологічні вимірювання та прилади: Метрологічні характеристики приладів для вимірювання витрат [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: С. Г. Бондаренко, О. В. Сангінова. – Електронні текстові данні (1 файл: 5,1 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 162 с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 4 від 22.04.2019 р.)*

*за поданням Вченої ради хіміко-технологічного факультету
(протокол № 9 від 30.05.2019 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

ТЕХНОЛОГІЧНІ ВИМІРЮВАННЯ ТА ПРИЛАДИ МЕТРОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИЛАДІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТ

Укладачі: *Бондаренко Сергій Григорович*, канд. техн. наук, доц.

Сангінова Ольга Вікторівна, канд. техн. наук, доц.

Відповідальний
редактор

Абрамова А.О., к.т.н., доц.

Рецензент:

Супрунчук В.І., канд. техн. наук, доц.

Електронне мережне навчальне видання розроблено відповідно до програми підготовки бакалаврів за спеціальністю 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології. У навчальному посібнику систематизовані основні методи та засоби вимірювань витрат та кількостей речовин, які застосовуються в системах автоматичного контролю та керування. Описано принцип дії, технічні та метрологічні характеристики вимірювальних перетворювачів та приладів цієї групи приладів. Навчальний посібник з дисципліни «Технологічні вимірювання і прилади», яка належить до циклу професійної та практичної підготовки, має за мету закріплення знань та набуття вмінь з питань вимірювання витрат та кількостей речовин, визначення їх основних метрологічних характеристик, вирішення проблеми вибору витратоміра чи лічильника для надійної і якісної роботи в схемі автоматизації будь-якого технологічного процесу у хімічній галузі промисловості, а також для підготовки до лабораторних занять та виконання розрахункової роботи. Необхідність написання навчального посібника з питань вимірювання витрат та кількостей речовин пов'язана великим різноманіттям таких приладів, постійним оновленням та модифікацією лінійки приладів, розробкою нових методів та технічних засобів, що їх реалізують, та обмеженим часом аудиторних занять

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019

Зміст

Передмова.....	4
Мета і завдання до розрахункової роботи «Вибір і розрахунок приладів вимірювання»	5
1 Основні теоретичні відомості. Визначення метрологічних характеристик приладів для вимірювання витрат	7
1.1 Методи вимірювання витрати та витратоміри	12
1.2 Прилади, засновані на гідродинамічних методах	13
1.3 Прилади з безперервно рухомим тілом	53
1.4 Прилади, засновані на різних фізичних явищах	82
1.5 Концентраційні витратоміри.....	112
1.6 Вимірювання витрати та кількості сипких речовин.....	131
2 Приклади розв’язання задач	141
3 Варіанти завдань до розрахункової роботи	142
4 Запитання для самопідготовки.....	147
Список рекомендованої літератури	153
Додатки.....	155
Додаток А. Структура та зміст розрахункової роботи	155
Додаток Б. Зразок виконання титульного листа	158
Додаток В. Залежність між витратою і перепадом тиску на звужувальному пристрої	159

Передмова

Навчальний посібник розроблено відповідно до програми підготовки бакалаврів за спеціальністю «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» і є складовою частиною дисципліни «Технологічні вимірювання та прилади». Відповідно до робочого навчального плану підготовки бакалаврів за вказаною спеціальністю, значна частина годин цієї дисципліни виноситься на самостійну роботу (78 годин), у рамках якої студенти повинні підготуватися до лабораторних занять та виконання розрахункової роботи.

Представлений матеріал має за мету закріплення знань, отриманих в процесі вивчення дисципліни «Технологічні вимірювання та прилади» та вміння застосовувати їх для визначення джерел виникнення похибок засобів вимірювальної техніки, розрахунку цих похибок та визначення методів їх усунення. Надані теоретичні відомості сприятимуть засвоєнню матеріалу дисципліни.

Метрології, методам автоматичного контролю, основним відомостям з типових приладів для вимірювання основних параметрів виробничих процесів присвячено ряд підручників та навчальних посібників [1 – 4, 7, 8] та ін. Зокрема, при розробці індивідуальних завдань використані матеріали, наведені в роботі [4].

У роботі наведені мета та завдання до розрахункової роботи, викладений теоретичний матеріал, необхідний для підготовки до виконання індивідуальних завдань та зазначено літературу для поглибленого вивчення розділів, розглянуті приклади розв'язання типових задач та сформульовані контрольні питання для самопідготовки студентів.

Мета і завдання до розрахункової роботи

Вибір і розрахунок приладів вимірювання

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

Завдання до розрахункової роботи (РР) передбачається двох видів:

I. Розрахунок витратомірів та лічильників.

Перед виконанням завдання необхідно:

- вивчити методи вимірювання витрат та кількостей речовин;
- вивчити основні розрахункові залежності, що використовують при розрахунку витратомірів та лічильників.

Згідно зі своїм варіантом, що наданий викладачем, виконати отримані завдання, які стосуються розрахунку заданих витратомірів.

Для цього слід обґрунтувати вибір розрахункових залежностей, описати послідовність розрахунків та оцінити отримані результати. Схема приладу з описом його роботи повинна бути наведена перед розрахунками.

II. Розрахунок витратомірів зі звужувальними пристроями.

Перед виконанням завдання необхідно:

- вивчити методи вимірювання витрат та кількостей речовин;
- вивчити основні розрахункові залежності, що використовують при розрахунку витратомірів зі звужувальними пристроями.

Для виконання розрахунку витратомірів зі звужувальними пристроями¹ студент отримує такі дані: назву вимірюваного середовища (і його вологість, якщо це газ); максимальне значення вимірюваної витрати; мінімальне значення вимірюваної витрати; значення температури вимірюваного середовища перед звужувальним пристроєм; значення надлишкового тиску середовища перед звужувальним пристроєм; значення барометричного тиску в місці встановлення приладу; значення внутрішнього діаметру трубопроводу при температурі 20°C; назву матеріалу, з якого виготовлено трубопровід та абсолютну шорсткість трубопроводу.

Основи вимірювання витрати газів і рідин стандартними пристроями звуження потоку і загальні технічні вимоги до витратомірного пристроїв регламентуються Правилами РД 50-213-80 та ДСТУ ГОСТ 8.586.1:2007 (ISO 5167-1:2003) – ДСТУ ГОСТ 8.586.5:2007 (ISO 5167-5:2003).

¹ Звужувальний пристрій або задається викладачем, або обирається студентом самостійно (при проблемах вибору рекомендовано камерну діафрагму або трубу Вентурі).

Згідно з Правилами, витратомірний пристрій складається з витратоміра (стандартного звужувального пристрою, дифманометра).

Згідно з отриманим завданням (дані про вимірюване середовище) виконати наступне:

- виконати розрахунок заданого звужувального пристрою;
- виконати креслення встановлення розрахованого звужувального пристрою у вимірювальний трубопровід;
- на сайтах виробників підібрати стандартний дифманометр, що працюватиме в комплекті з розрахованим звужувальним пристроєм;
- виконати креслення підключення до дифманометра.

При розрахунках вважати, що фактична довжини прямих ділянок трубопроводу від місцевого опору до звужувального пристрою та від звужувального пристрою до найближчого місцевого опору становлять 1800 мм.

Оформити результати розрахунків згідно з вимогами до РР, які наведені у додатку А. Зразок виконання титульного листа подано у Додатку Б.

1 Основні теоретичні відомості

Визначення метрологічних характеристик приладів для вимірювання витрат

При автоматизації технологічних процесів неминуче доводиться мати справу з визначенням витрат або кількостей речовин, що необхідні для отримання заданого продукту.

Кількість речовини визначають її масою або об'ємом і вимірюють в одиницях маси (кг) або в одиницях об'єму (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 за різницею показань лічильника N_2 і N_1 , що визначені в моменти часу t_2 і t_1 :

$$V = q_v (N_2 - N_1), \quad (1.1)$$

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, що вимірюється у $\text{м}^3/\text{с}$, $\text{м}^3/\text{год}$, $\text{л}/\text{хв}$ і таке інше, і масову витрату, що вимірюється у $\text{кг}/\text{с}$, $\text{кг}/\text{год}$, $\text{т}/\text{год}$ і таке інше.

Масова (G) і об'ємна (Q) витрати пов'язані між собою залежністю:

$$G = \rho \cdot Q, \quad (1.2)$$

де ρ – густина.

Витрата рідини з рівним ступенем точності може бути виміряна як об'ємним, так і ваговим способом. Але при цьому варто 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 $\Delta T = T_2 - T_1$ при постійному тиску буде становити:

$$V_T = V_0 (1 + \beta_T \cdot \Delta T), \quad (1.3)$$

де V_T , V_0 – об'єм при температурах T_2 та T_1 , К; β_T – коефіцієнт об'ємного теплового розширення (який являє собою відносну зміну об'єму рідини при зміні температури на один градус при постійному тиску), К^{-1} .

Зміна густини або питомої ваги рідини від температури описується формулами:

$$\rho_T = \frac{\rho_0}{1 + \beta_T \cdot \Delta T}, \quad (1.4)$$

$$\gamma_T = \frac{\gamma_0}{1 + \beta_T \cdot \Delta T}, \quad (1.5)$$

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

Перерахування об'єму, густини, питомої ваги рідини, що вимірено в робочому стані, до нормальних умов (760 мм рт. ст. та 20 °С (або 293К)) здійснюється за формулами:

$$V_{T2} = V_{20}[1 + \beta_T \cdot (T_2 - 293)], \quad (1.6)$$

$$\rho_{T2} = \frac{\rho_{20}}{1 + \beta_T \cdot (T_2 - 293)}, \quad (1.7)$$

$$\gamma_{T2} = \frac{\gamma_{20}}{1 + \beta_T \cdot (T_2 - 293)}, \quad (1.8)$$

де V_T, ρ_T, γ_T – об'єм, густина, питома вага при температурі вимірювання T_2 ; $V_{20}, \rho_{20}, \gamma_{20}$ – об'єм, густина, питома вага при температурі 20 °С, T_2 – температура вимірювання, К.

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. При порівнянні результатів декількох вимірювань, що отримані за різних умов, об'єм газу необхідно привести до стандартних (іноді пишуть – нормальних, але нормальні умови при 0 °С) умов, бо інакше їх не можна порівнювати.

Для приведення об'єму газу до 20 °С (293,16 К) і 760 мм рт. ст. (1,033 кгс / см²) застосовується формула:

$$V_0 = V_p \frac{P_p \cdot 293,16}{760 \cdot T_p} = 0,383 V_p \frac{P_p}{T_p}, \quad (1.9)$$

де V_0 – об'єм газу за стандартних умов, м³; V_p – об'єм газу за робочих умов, м³; P_p – абсолютний тиск газу при робочих умовах, мм рт. ст.; T_p – абсолютна температура газу при робочих умовах, К. Якщо відомий коефіцієнт стисливості газу Z , то його варто врахувати в формулі.

$$V_0 = V_p \frac{P_p \cdot 293,16}{760 \cdot T_p} \cdot Z = 0,383 V_p \frac{P_p}{T_p} \cdot Z, \quad (1.10)$$

Для ідеального газу $Z = 1$ при будь-яких умовах. При високих тисках для всіх газів $Z > 1$, тобто їх важче стиснути, ніж ідеальний газ, оскільки в цій області переважають сили міжмолекулярної відштовхування. При низьких тисках для деяких газів $Z < 1$, що пояснюється переважанням сил міжмолекулярного тяжіння. В формулі (1.9) $Z = 1$.

Зворотний перерахунок об'єму газу, що приведений до стандартних умов (20 °С і 760 мм рт. ст.), в об'єм за інших (робочих) умовах можна здійснити за формулою:

$$V_p = V_0 \frac{760 \cdot T_p}{P_p \cdot 293,16} = 2,593 V_0 \frac{T_p}{P_p}. \quad (1.11)$$

Об'ємні витрати можна визначити через середню швидкість потоку $W_{\text{сер}}$ та площу поперечного перерізу трубопроводу (рис. 1.1):

$$Q = V_{\text{сер}} \cdot F, \quad (1.12)$$

де F – площа поперечного перерізу трубопроводу; $V_{\text{сер}}$ – середня швидкість потоку.

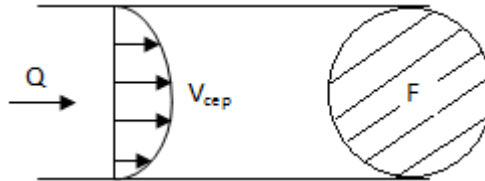


Рисунок 1.1 - До визначення витрат

Вимірювання витрат становлять до 15% від загального числа вимірювань в промисловості. Інформація про витрату широко використовується при управлінні технологічними процесами для оптимізації їх режимів. Останнім часом зростає роль вимірювань витрати енергоносіїв у зв'язку зі зростанням їхньої вартості і необхідністю контролю ефективності енергозберігаючих заходів. Залежно від одиниці виміру кількості речовини (м^3 або кг) розрізняють масову (кг/с) або об'ємну витрату ($\text{м}^3/\text{с}$). У техніці часто застосовують похідні позасистемні одиниці – $\text{м}^3/\text{год}$, т/год , л/с та ін.

Вимірювання витрати зазвичай здійснюється із двома цілями:

1) необхідність контролювати витрату з метою керування технологічними процесами;

2) необхідність обліку всіх матеріальних і енергетичних потоків.

Завдання вимірювання витрат і кількостей ускладнюються тим, що, з одного боку, доводиться мати справу з різноманітними за складом і фазовим станом речовинами. З іншого боку виробництво висуває певні вимоги до метрологічних характеристик і надійності засобів вимірювання витрати та кількості.

Зазвичай до витратомірів висувають вимоги, які задовольнити спільно дуже важко. До них відносять:

- високу точність вимірювання (нерідко при вимірюванні витрати потрібно мати похибку не більше 0,2-0,5%);
- високу надійність (безвідмовність і довговічність), що оцінюється часом, протягом якого прилад зберігає працездатність і заявлену точність (цей час залежить від типу приладу і від умов його застосування);
- незалежність (або малу залежність) результату вимірювань від зміни густини речовини;

- швидкодія приладу (ця вимога є дуже важливою, коли витратомір застосовують в системах автоматичного регулювання та при вимірюванні швидкозмінних витрат);
- широкий діапазон витрат, що підлягають вимірюванню (наприклад, витрати рідини можуть змінюватися в межах від 10^{-2} до 10^8 кг/год, а газів – в межах від 10^{-4} до 10^6 кг/год);
- врахування великої кількості факторів, що впливають на результати вимірювань (характеристики потоку, які сприймаються перетворювачами витрати, залежать від температури, в'язкості, щільності, наявності дисперсної фази і таке інше);
- усунення впливу на чутливий елемент фізико-хімічних властивостей потоку (речовини можуть бути агресивними, абразивними, токсичними, вибухонебезпечними і тому подібне);
- вартість приладу (наприклад, необхідно пам'ятати, що підвищення точності вимірювання призводить до збільшення вартості приладу).

Необхідність суворої економії енергетичних, водних і інших ресурсів для зменшення собівартості продукції і в екологічних цілях суттєво підвищує вимоги до засобів вимірювання витрати та кількості.

Все це призвело до створення засобів вимірювання, заснованих на різних принципах і методах вимірювання.

З наведеного вище можна зробити висновок, що прилади для вимірювання витрати або кількості речовини можна поділити на 2 класи:

1) **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.

2) **витратоміри** – прилади, що вимірюють витрату. **Витратомірами** рідини (газу) називають вимірювальні прилади або сукупність приладів, призначених для вимірювання витрати рідини (газу).

Необхідно розрізняти поняття «середня витрата» і «миттєва витрата». Наприклад, середня об'ємна витрата дорівнює:

$$Q_{\text{сеп}} = \frac{V}{t_2 - t_1}, \quad (1.13)$$

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: $Q = dV/dt$ та $G = dm/dt$. Таким чином витратоміри міряють миттєву витрату.

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

$$V = \int_{t_1}^{t_2} Q dt, \quad (1.14)$$

$$m = \int_{t_1}^{t_2} G dt. \quad (1.15)$$

Прилади, що працюють в комплекті з витратомірами і реалізують операцію інтегрування їх сигналів, називають інтеграторами витратомірів. Витратоміри з інтегруючими пристроями дозволяють вимірювати кількість речовини за будь-який проміжок часу.

Засіб 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).

1.1 Методи вимірювання витрати та витратоміри

Класифікація засобів вимірювань витрати та кількості речовин

Відповідно до [1, 4] 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 рухомих 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) 17) інші: з тілом, що автоколивається; з рухомою ділянкою трубопроводу; струменеві витратоміри.

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

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.

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.

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.

В окрему групу варто виокремити витратоміри, що застосовуються для вимірювання витрат сипких та кускових матеріалів.

Вся термінологія до засобів вимірювань витрати та кількості речовин наведена в ДСТУ ISO 4006:2009 Вимірювання витрати та кількості плинного середовища в закритих трубопроводах. Словник термінів і познач (ISO 4006:1991, IDT).

1.2 Прилади, робота яких заснована на гідродинамічних методах

1.2.1 Витратоміри змінного перепаду тиску

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.

Витратоміри змінного перепаду тиску отримали широке розповсюдження як в промислових, так і в експериментальних вимірах завдяки перевагам, до яких відносять:

- порівняно високу точність вимірювання;
- простоту і надійність, зручність і універсальність методу;
- легкість серійного виготовлення приладів;
- можливість, вимірювання будь-яких витрат (при деяких обмеженнях) рідини, пари та газу, що перебувають при різних температурах і тиску;
- відсутність рухомих частин;
- невисоку вартість.

До недоліків цього методу вимірювання варто віднести:

- деяку втрату енергії потоку;
- відносно складність промислового застосування при малих витратах речовини, в пульсуючих потоках і потоках речовини, що містить сторонні домішки, а також потоках речовини, що перебувають при параметрах, близьких до рівноважних.

Витратоміри змінного перепаду тиску, в залежності від виду перетворювача витрати діляться на кілька різновидів. Найбільшого

поширення набули витратоміри зі звужувальними пристроями (або з пристроями звуження потоку).

Витратоміри зі звужувальними пристроями

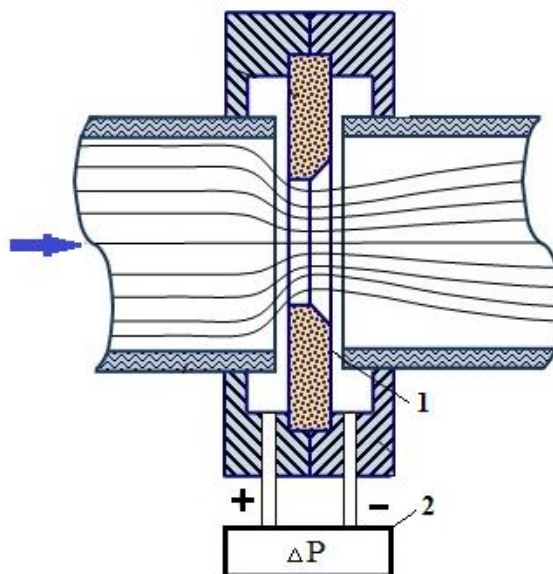
Принцип дії витратомірів із звужувальними пристроями заснований на тому, що при проходженні рідини через місцеве звуження каналу середня швидкість потоку в ньому збільшується, а тиск падає, тобто частина потенціальної енергії потоку перетворюється в кінетичну. Різниця (перепад) тиску, що утворюється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

Підсумовуючи вищесказане, можна сказати, що робота витратомірів зі звужувальними пристроями базується на вимірюванні змін статичного перепаду тиску контрольованого середовища, що проходить крізь штучно звужений сегмент трубопроводу, в результаті перетворення в звужувальних пристроях частини потенційної енергії тиску в кінетичну.

Зазвичай за допомогою таких витратомірів вимірюється витрата в трубопроводах з діаметром 50-1600 мм.

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

Рисунок 1.2) 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 значну відстань. Лініями зв'язку між звужувальним пристроєм та дифманометром є з'єднувальні трубки (імпульсні) зі спеціальними пристроями на них.



1 – звужувальний пристрій (діафрагма); 2 – дифманометр.

Рисунок 1.2 – Вимірювальний комплект витратоміру змінного перепаду тиску:

Отвори для відбору тиску розташовують на вході звужувального пристрою і на його виході (далі до звужувального пристрою і після нього).

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

Порядок визначення залежності між витратою і перепадом тиску на звужувальному пристрої наведено у додатку В.

Різновиди звужувальних пристроїв

Звужувальні пристрої поділяють на стандартні та нестандартні.

При вимірюванні витрат найбільш широко застосовуються нормалізовані (стандартні²) 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)) і 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.

Діафрагми

Стандартні діафрагми є основним типом звужувальних пристроїв. Діафрагма являє собою тонкий диск з круглим отвором (Рисунок 1.3), що має з боку входу потоку гостру прямокутну кромку. Отвір є фасонним: спочатку циліндричним, а 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.

² Стандартні звужувальні пристрої – це звужувальні пристрої, геометричні характеристики і умови застосування яких регламентовані стандартом.

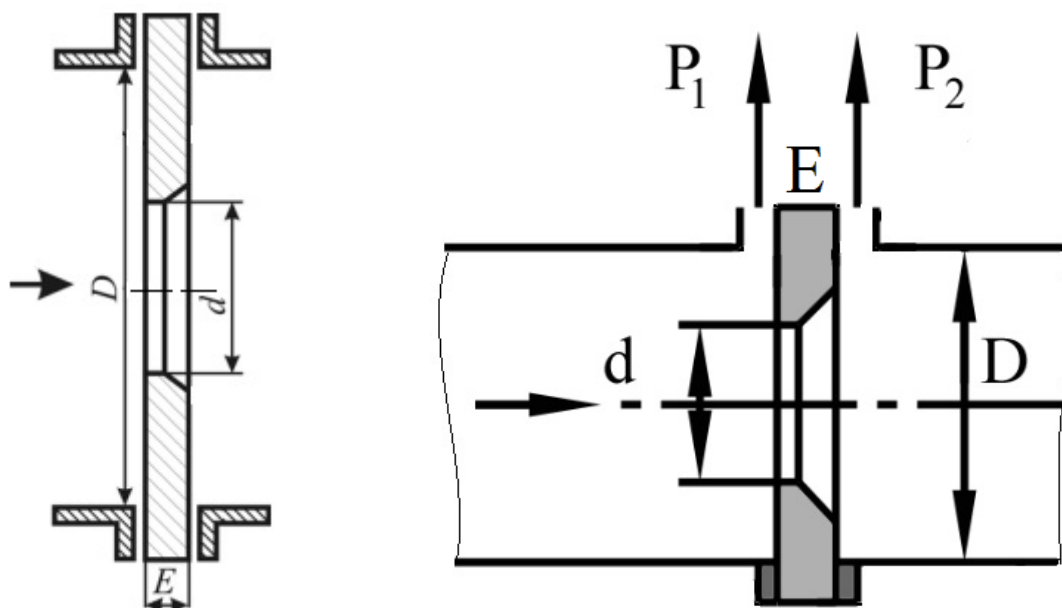


Рисунок 1.3 – Стандартна діафрагма

Діафрагми бувають двох основних типів: безкамерні (Рисунок 1.4), які використовують для вимірювання витрат у трубопроводах з діаметром $D = 300 \dots 1000 \text{ мм}$, та камерні (Рисунок 1.5), які відрізняються наявністю кільцевих камер для відбору тиску і, які використовують для вимірювання витрат у трубопроводах з діаметром $D = 50 \dots 500 \text{ мм}$.

У безкамерних діафрагмах відбір перепаду тиску здійснюється через отвори в трубопроводі або фланцях. Кільцеві камери камерних діафрагм призначаються для усереднення і вирівнювання тиску по периметру перерізу.

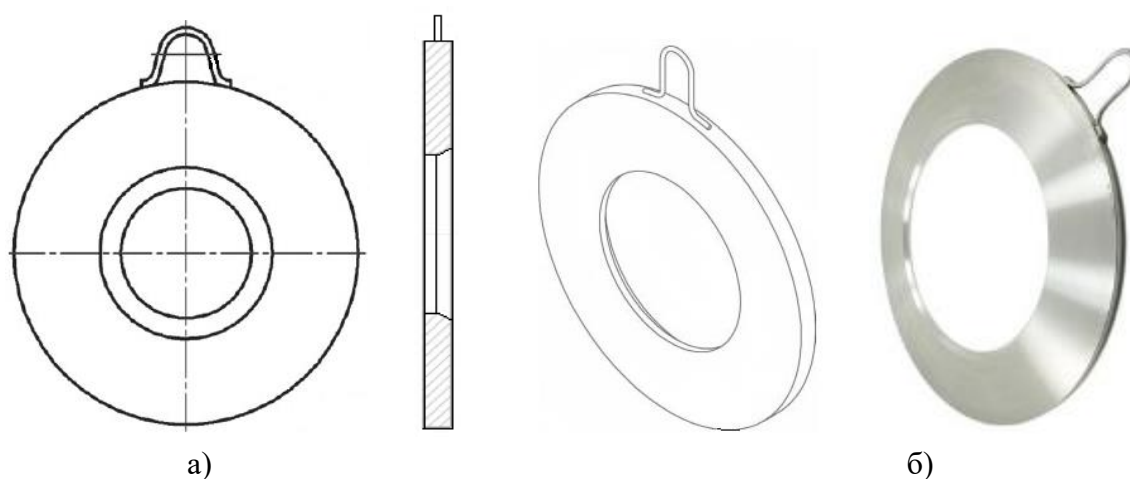
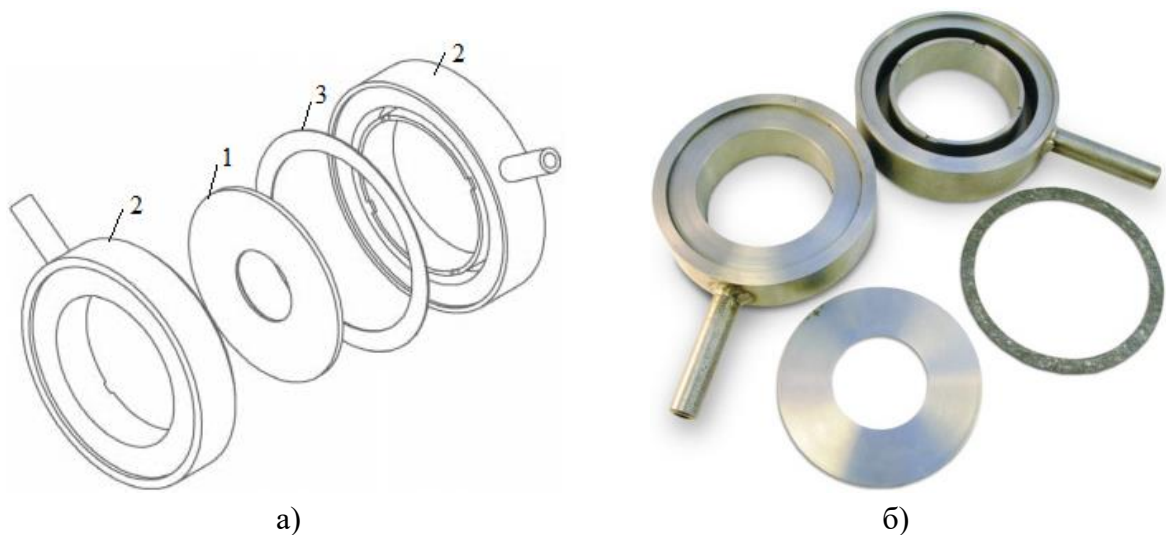


Рисунок 1.4 – Діафрагма безкамерна: а) схема; б) фотографія



а)
1 – диск (діафрагма); 2 – камери; 3 – прокладка;
Рисунок 1.5 – Діафрагма камерна: а) схема: б) фотографія

На Рисунок 1.6 наведені діафрагми (безкамерна, камерна та камерні в збірці), що застосовують у вимірюваннях витрат на виробництві.



Рисунок 1.6 – Діафрагми безкамерна, камерна та камерні в збірці й приклади встановлення діафрагм в трубопроводі

Відбір тисків до і після діафрагми здійснюється за допомогою спеціальних камер і окремих отворів. Одна діафрагма може бути використана для декількох способів відбору тиску.

При фланцевому (Рисунок 1.7-а) та трирадіусному (Рисунок 1.7-б) способах відбору тиску перепад вимірюється через окремі циліндричні отвори, що розташовані на відстані в першому випадку $l_1 = l'_2 = 25,4$ мм, а в

другому $l_1 = D$ і $l_2 = 0,5D$ від площин діафрагми. (Відстань l_1 вимірюють від вхідного торця діафрагми, а відстані l_2 та l'_2 – від вихідного торця діафрагми.)

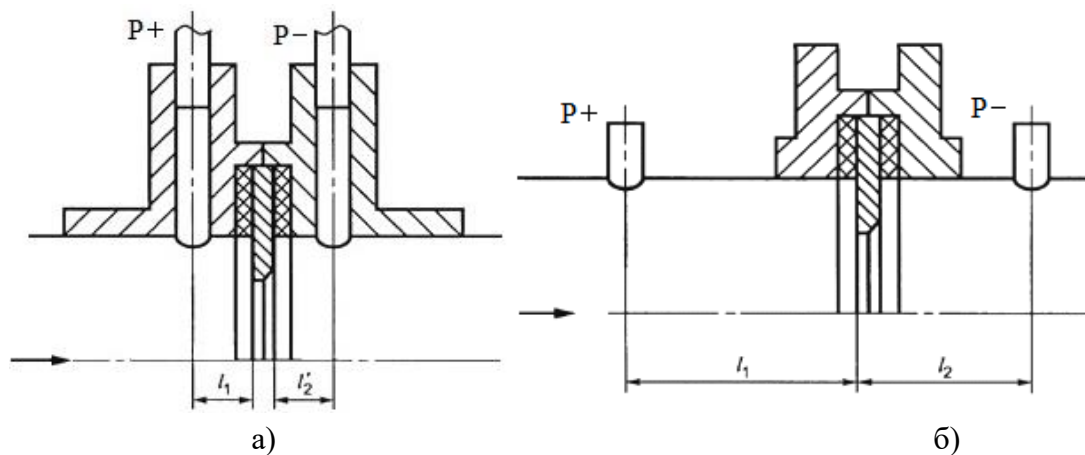


Рисунок 1.7 – Розташування отворів для фланцевого (а) і трирадіусного (б) способів відбору тиску

Відбір тисків $P+$ і $P-$ при кутовому способі здійснюється або через окремі циліндричні отвори (Рисунок 1.8- а), або з двох кільцевих камер, кожна з яких з'єднується з внутрішньою порожниною трубопроводу кільцевою щілиною або групою рівномірно розподілених по колу отворів (Рисунок 1.8- б).

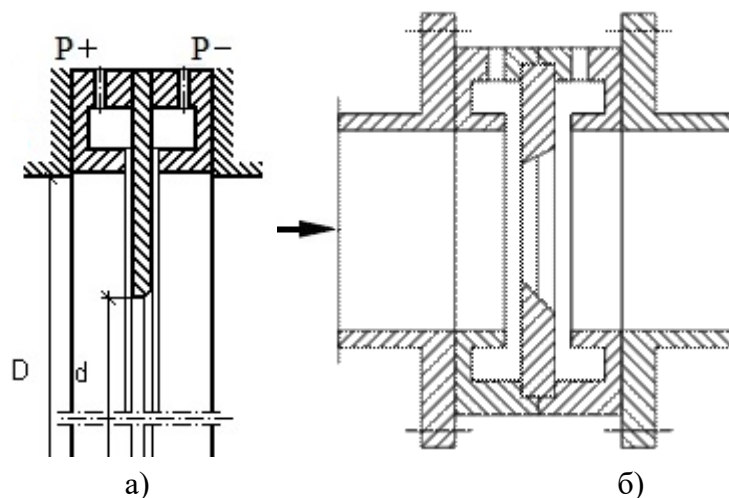


Рисунок 1.8 – Відбір тисків при кутовому способі

Кільцева камера перед диском називається плюсовою, а за ним – мінусовою. Наявність у діафрагмі кільцевих камер дозволяє усереднити тиск по колу трубопроводу, що забезпечує більш точний вимір перепаду тиску.

Сопла і сопла Вентури

Сопло ISA 1932

Сопло ISA 1932 – це сопло, у якого звужувальна частина на вході, утворена дугами двох радіусів, переходить в циліндричну частину на виході (Рисунок 1.9).

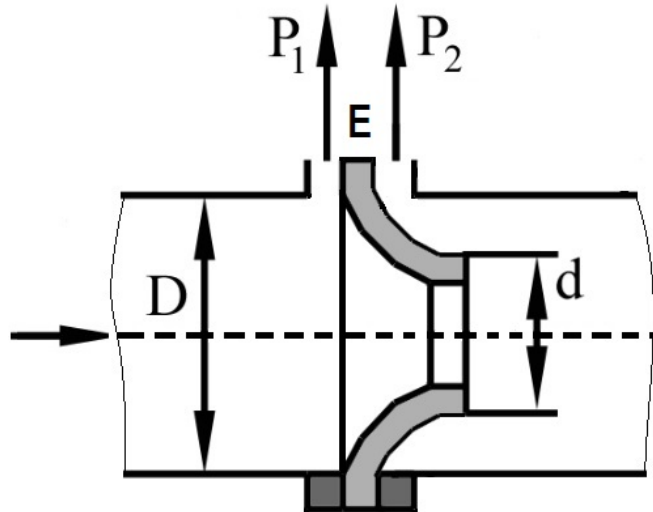


Рисунок 1.9 – Сопло ISA 1932

Стандарт ISO 5167-3 визначає можливість використання сопла ISA 1932 для труб діаметром від 50 до 500 мм.

Конструкція добірних пристроїв для діафрагм і сопел однакова (Рисунок 1.10).

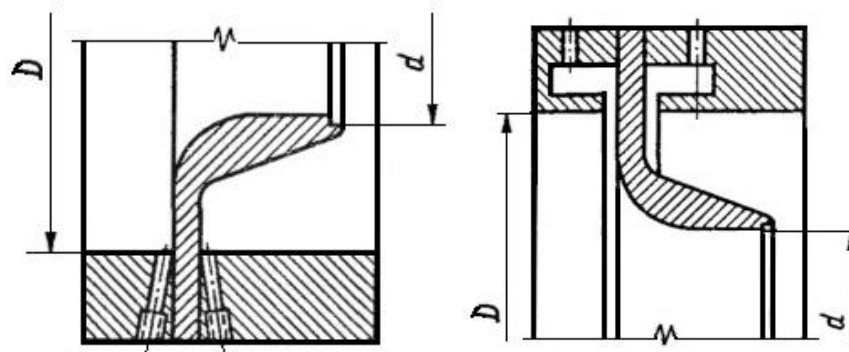
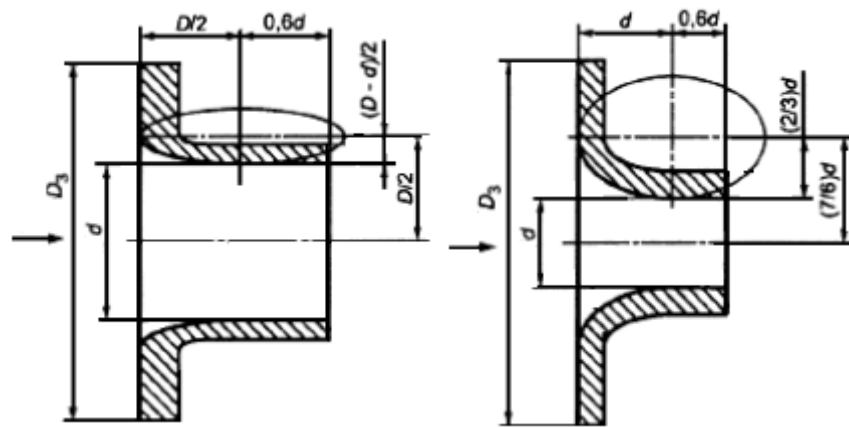


Рисунок 1.10 – Відбір тисків для сопла ISA 1932

Еліптичне сопло

Існують два різновиди еліптичних сопел, що згідно зі стандартом ISO 5167-3 відрізняються вимогами до виготовлення їх внутрішньої профільної частини: сопла з великим відносним діаметром горловини (Рисунок 1.11-а); сопла з малим відносним діаметром горловини (Рисунок 1.11-б).



а) б)

Рисунок 1.11 – Еліптичні сопла: сопла з великим відносним діаметром горловини (а); сопла з малим відносним діаметром горловини (б)

Сопло Вентурі

Профіль сопла Вентурі наведено на Рисунок 1.12. 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 1932. 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.

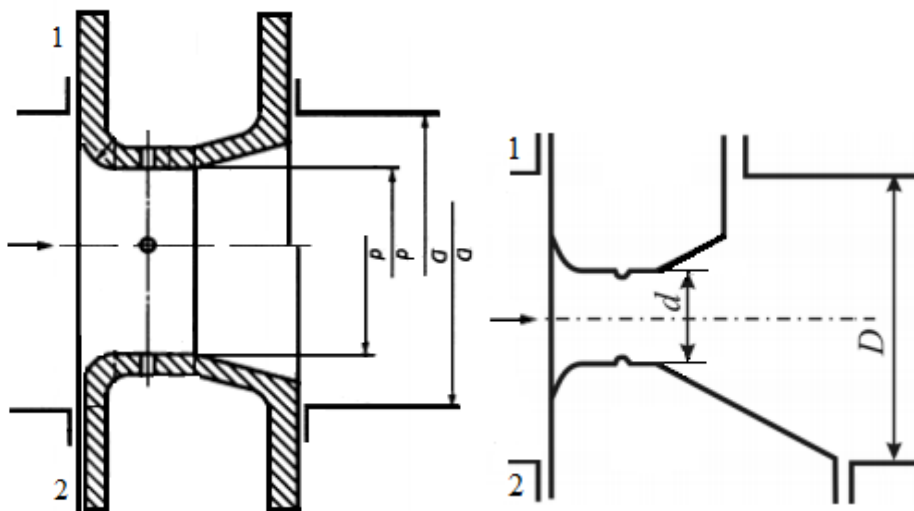


Рисунок 1.12 – Сопло Вентурі: 1 - укорочене сопло Вентурі; 2 - неукорочене сопло Вентурі

Способи відбору тиску, що використовуються для сопел Вентурі, наведені на Рисунок 1.13. Відбір тиску для сопла Вентурі (Рисунок 1.13- 1) виконують аналогічно застосовуванім для сопла ІСА 1932. Відбір тиску в горловині (Рисунок 1.13- 2) проводять через окремі отвори, з'єднані за схемою або за допомогою кільцевої камери усереднення, або п'єзOMETричного кільця.

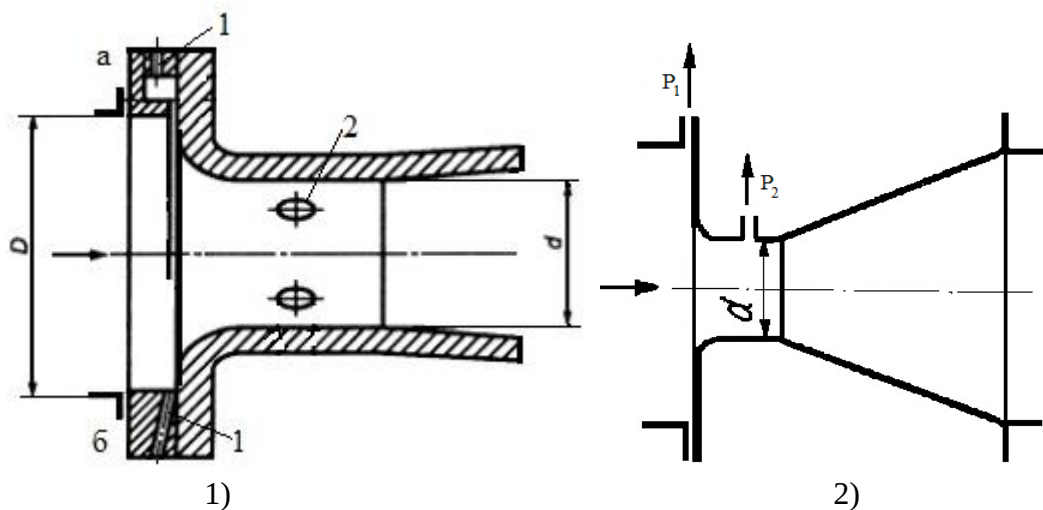
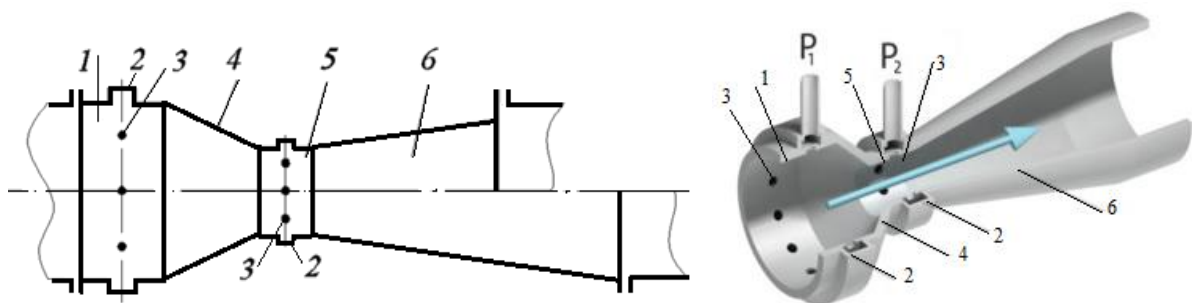


Рисунок 1.13 – Способи відбору тиску, що використовуються для сопел Вентурі:
1) відбір тиску до сопла Вентурі; 2) відбір тиску в горловині сопла Вентурі
а) з кільцевої камерою; б) з окремим отвором

Труби Вентурі

Труба Вентурі (Рисунок 1.14) 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.



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

Рисунок 1.14 – Труба Вентурі

Труба Вентурі встановлюється на трубопроводах діаметром від 50 до 1400 мм.

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 установці звужувальних пристроїв необхідно дотримуватися ряду умов, що впливають на похибку вимірювань. Звуження потоку в трубопроводі має розташовуватися перпендикулярно осі трубопроводу. Ось звужувального пристрою повинна збігатися з віссю трубопроводу. Важливою умовою є необхідність забезпечення сталого плину потоку перед входом в звуження потоку і після нього. Такий потік забезпечується наявністю прямих ділянок трубопроводу певної довжини до і після звужуючого пристрою.

Місцеві опори, що встановлені в вимірювальному трубопроводі (ділянка трубопроводу з встановленим звужувальним пристроєм), спотворюють кінематичну структуру потоку. Тому звужувальні пристрої і встановлюють між двома прямими ділянками вимірювального трубопроводу постійного перерізу і необхідної довжини, що не містять місцевих опорів і відгалужень (незалежно від того, підводять або відводять потік через ці відгалуження в процесі вимірювання). Необхідні мінімальні довжини прямих ділянок вимірювального трубопроводу залежать від виду місцевих опорів, їх розміщення на вимірювальному трубопроводі, типу пристрою звуження потоку і відносного діаметра його отвору, визначають за розрахунковими залежностями, що наведені в Міждержавному стандарті ГОСТ8.563.1-97 «Диафрагмы, сопла ИСА1932 и трубы Вентури, установленные в заполненных трубопроводах круглого сечения».

Відношення площі отвору звужувального пристрою до площі трубопроводу називається відносною площею (або модулем) звужувального пристрою, який позначають m і розраховують за формулою (1.16).

$$m = \frac{d_{20}^2}{D_{20}^2}, \quad (1.16)$$

де d_{20} , D_{20} – внутрішній діаметр звужувального пристрою та внутрішній діаметр вимірювального трубопроводу при температурі 20°C.

Тип звужувального пристрою вибирають, використовуючи рекомендації, наведені в стандартах. Основні принципи розрахунку внутрішніх діаметрів вимірювального трубопроводу та звужувального пристрою, відносного діаметра звужувального пристрою, а також перепаду тисків на звужувальному пристрою стандартах.

Модуль звужувального пристрою m для різних типів звужувальних пристроїв лежить в межах: для діафрагми $m = 0,05 \div 0,7$; для сопла $m = 0,05 \div 0,65$; для сопла Вентурі $m = 0,05 \div 0,6$.

Як зазначено раніше, звужувальні пристрої поділяють на стандартні та нестандартні. До нестандартних звужувальних пристроїв зокрема належать подвійні діафрагми, діафрагми з подвійним конусом, сегментні діафрагми, сопла у чверть круга, циліндричні сопла тощо, використовують в особливих

умовах: у разі малих чисел Рейнольдса, малих діаметрів трубопроводів (менше 50 мм - за таких діаметрів трубопроводів різко зростає вплив шорсткості внутрішньої поверхні трубопроводу на коефіцієнт витрати), сильного забруднення контрольованих рідин тощо [1].

Згідно з [1], до витратомірів змінного перепаду тиску окрім витратомірів зі звужувальними пристроями належать: витратоміри з гідравлічним опором; відцентрові витратоміри; витратоміри з напірними пристроями; витратоміри з напірними підсилювачами; ударно-струменеві витратоміри.

Витратоміри з гідравлічним опором базуються на вимірюванні перепаду тисків, який створюється цим опором. В ролі перетворювача можна використати капілярну трубку або пакет таких трубок, як показано на Рисунок 1.15.

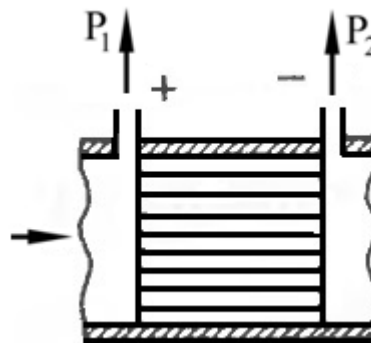
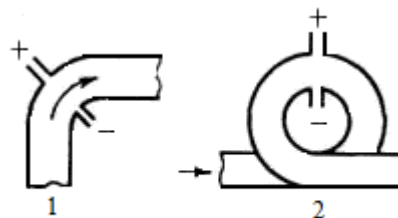


Рисунок 1.15 – Витратомір з гідравлічним опором

Режим потоку намагаються створити ламінарним, для того, щоб перепад тисків був пропорційним витраті. Такі витратоміри застосовуються рідко (зазвичай для малих витрат).

Відцентрові витратоміри базуються на залежності витрати від перепаду тисків, який створюється в тисках, який створюється в закругленому елементі труби під дією відцентрованих сил. В якості відцентрованих сил. В якості перетворювача витрати може служити коліно або кільцева ділянка або кільцева ділянка труби (1– коліно; 2 – кільцева ділянка

Рисунок 1.16).



1– коліно; 2 – кільцева ділянка

Рисунок 1.16 – Витратомір з гідравлічним опором:

Витратоміри з напірними пристроями (або 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 ($P_n = P_c + P_g$):

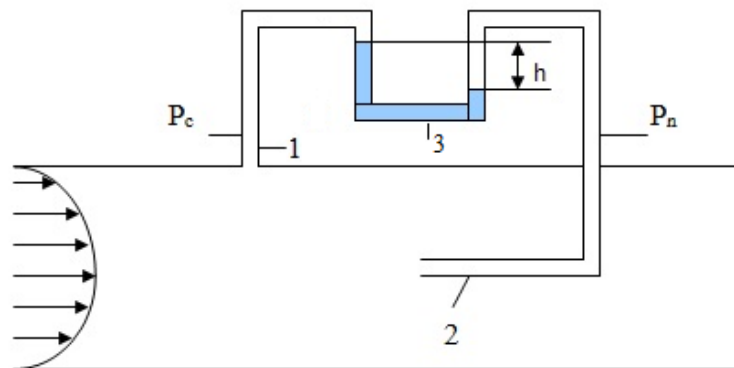
$$P_n - P_c = \frac{W^2 * \gamma}{2 * g}, \quad (1.17)$$

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

Звідки швидкість W :

$$W = \sqrt{\frac{2 * g}{\gamma} * (P_n - P_c)} = \sqrt{\frac{2 * g}{\gamma} * P_g}. \quad (1.18)$$

Динамічний напір, а отже, і швидкість потоку вимірюють пневмометричними трубками в комплекті з дифманометрами (Рисунок 1.17). 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. За його значенням визначають швидкість потоку W та витрату вимірюваного середовища.



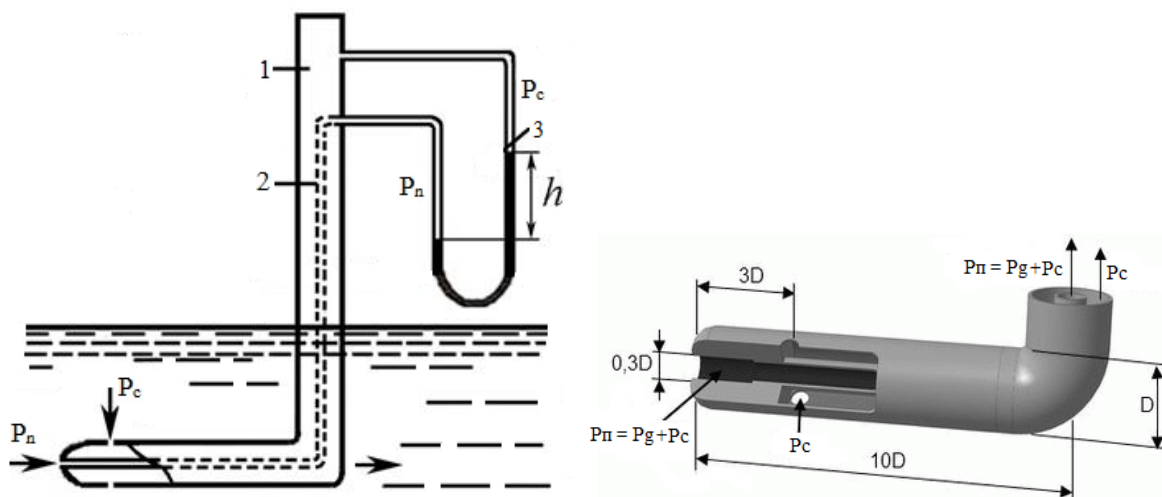
1, 2 – пневмометричні трубки; 3 – стандартний дифманометр

Рисунок 1.17 – Витратомір швидкісного напору

При практичному використанні в формулу (1.19) вводять поправочний коефіцієнт ξ , який враховує конструктивні особливості трубок й неточність їх виготовлення та реальні властивості потоку, що рухається. Коефіцієнт ξ для різних конструкцій трубок визначається дослідним шляхом. Тоді:

$$W = \xi \sqrt{\frac{2 * g}{\gamma} * P_g}. \quad (1.19)$$

При вимірюванні витрат найчастіше використовують диференціальну трубку Піто (комбіновану), як показано на Рисунок 1.18.



1, 2 – пневмометричні трубки для відбору статичного тиску та повного тиску, відповідно; 3 – стандартний дифманометр

Рисунок 1.18 – Витратомір швидкісного напору з диференціальною трубкою Піто та фрагмент такої трубки

Витратомір включає в свій склад диференціальну трубку, яка складається з вимірювального циліндру, що має центральний отвір для сприйняття повного тиску. На вимірювальному циліндрі є отвори для відбору статичного тиску.

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 (повинна встановлюватись всередині трубопроводу та 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 з напірним підсилювачем в своєму складі мають перетворювач, в якому поєднуються напірний і звужувальний пристрої (зазвичай це мікротрубки Вентурі). Перепад тиску створюється за рахунок як місцевого переходу кінетичної енергії струменя в потенційну, так і часткового переходу потенційної енергії струменя в кінетичну. На Рисунок 1.19 наведені приклади комбінацій напірного і звужувального пристроїв:

- а) комбінація діафрагми з трубкою Піто;
- б) комбінація трубки Піто з трубою Вентурі;
- в) здвоєна труба Вентурі.

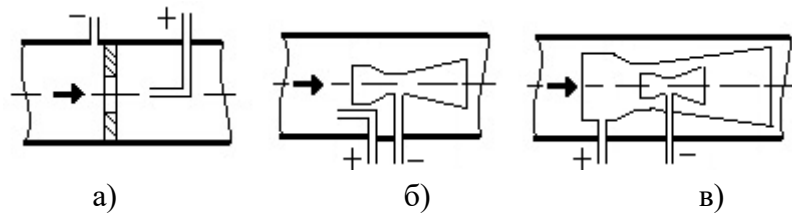
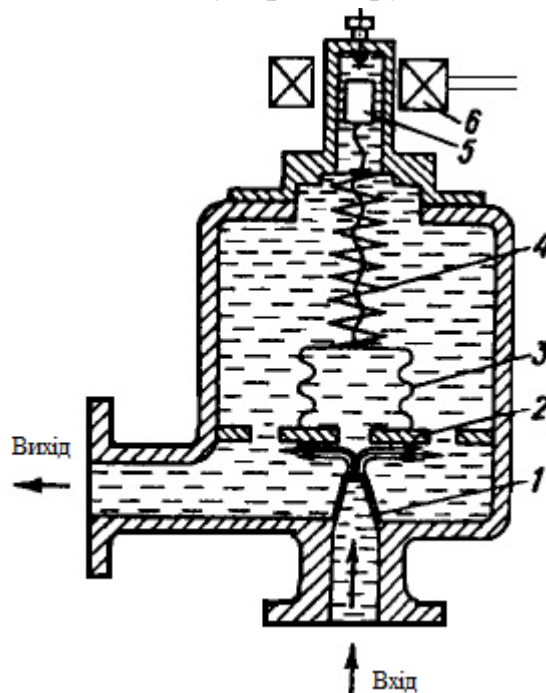


Рисунок 1.19 – Витратоміри з напірним підсилювачем: а) комбінація діафрагми з трубкою Піто; б) комбінація трубки Піто з трубою Вентурі; в) здвоєна труба Вентурі

Такі витратоміри застосовують при невеликих швидкостях газових потоків, коли перепад тисків, що створюється однією трубкою Піто, дуже малий.

Ударно-струменеві витратоміри базуються на вимірюванні перепаду тисків, який виникає в процесі удару струменя безпосередньо об тверде тіло (або через шар речовини). Тиск удару P_y залежить від швидкості W та густини рідини ρ і визначається залежністю: $P_y = \rho W^2 (1 - \cos \alpha)$, де α кут між напрямлення руху рідини до та після удару [1]. Зазвичай $\alpha = \pi/2$ і тоді $P_y = \rho W^2$. При відомій площі перерізу струменя речовини та швидкості W , що визначається через тиск удару P_y можна визначити об'ємну витрату речовини.

На Рисунок 1.20 наведена схема ударно-струменевого витратоміра.



1– сопло; 2–перегородка; 3 – сільфон; 4 – вимірювальна пружина; 5 – плунжер; 6 – котушка

Рисунок 1.20 – Схема ударно-струменевого витратоміра

Рідина витікає з сопла 1 і ударяється в перегородку 2, яка має центральний отвір, через який тиск удару передається рідині, що заповнює сільфон 3. Це створює зусилля на дно сільфона. Всередині сільфона діють

тиск удару P_y та статичний тиск вимірюваної речовини P_c , а зовні – тільки статичний тиск вимірюваної речовини P_c . Під дією перепаду тисків відбувається переміщення дна сильфона, котре навантажено вимірювальною пружиною 4, що викликає переміщення плунжера 5 всередині діамантної трубки, зовні якої розташована котушка 6 диференціально-трансформаторної або індуктивної системи передачі, що формує вихідний сигнал.

1.2.2 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 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) [1]. 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 (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 (у цьому випадку обов'язково вимірюють вагу посудини, оскільки вона зв'язана з висотою рівня, 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 (іноді сопла в чверть кола). Стандартні сопла не використовують, оскільки у них струмінь може відірватися від стінки (через вплив сил тяжіння та малих чисел Рейнольдса бо швидкість руху рідини є малою), а значить, може порушитися сталість витрати.

Схема витратоміра змінного рівня з діафрагмою, що встановлена в дні посудини наведена на Рисунок 1.21.

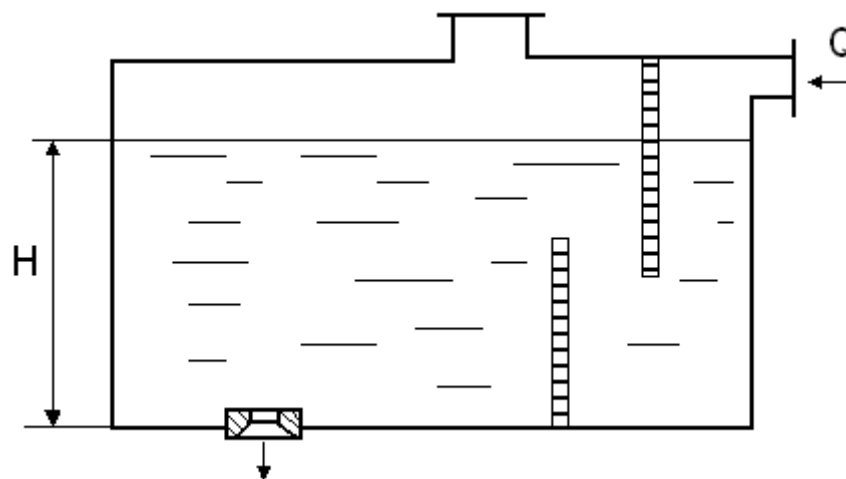


Рисунок 1.21 – Схема витратоміра змінного рівня з діафрагмою, що встановлена в дні посудини

Рідина безперервно надходить в посудину по трубі, проходить через систему перегородок (вони служать для того, щоб зменшити вплив динамічного тиску рідини на характер витікання рідини з діафрагми, а також відіграють роль фільтра, що запобігає засміченню діафрагми) і стікає через отвір діафрагми, що розташований в дні посудини. 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 [1].

Витрату рідини, що протікає через діафрагму визначають за формулою:

$$Q_v = \alpha F_0 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}, \quad (1.20)$$

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

Після підстановки ΔP в формулу визначення витрати отримаємо:

$$Q_v = \alpha F_0 \sqrt{2gH}. \quad (1.21)$$

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).

Ці 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 (Рисунок 1.22). 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.

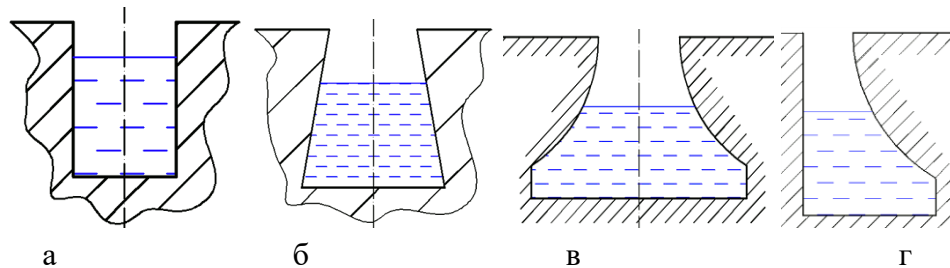


Рисунок 1.22 – Отвори для щілинних витратомірів: а– отвір прямокутної форми;
б– отвір форми симетричної трапеції; в – профіль Сутро;
г – несиметричний профіль Сутро

Схема щілинного витратоміра наведена на Рисунок 1.23.

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.

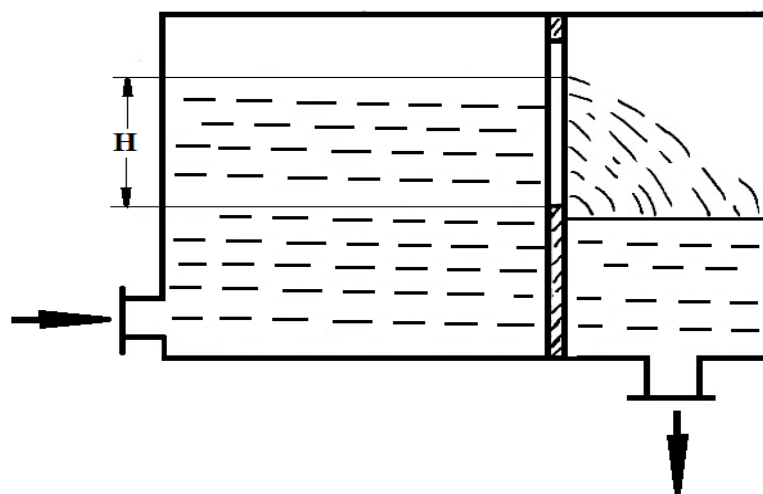


Рисунок 1.23 – Схема щілинного витратоміра

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:

$$Q_v = KH, \quad (1.22)$$

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 входної кромки отвору; ступеня обмеженості (стисненості) рідини при її підході до отвору.

1.2.3 Витратоміри обтікання

Витратоміри обтікання – це прилади, чутливий елемент яких сприймає динамічний тиск потоку і переміщається під його впливом, причому величина переміщення залежить від витрати [2].

Обтічним тілом може бути поплавок, диск, поршень і т.д. В окремих випадках обтічним тілом є лопать, диск, що повертаються навколо осі підвісу.

Ці витратоміри підрозділяють на три групи [2]:

- **постійного перепаду тиску**, де обтічне тіло переміщається вертикально, а протидіюча сила створюється вагою тіла;
- **з перепадом тиску, що змінюється**, в яких зазвичай є протидіюча пружина і крім вертикальної траєкторії руху обтічного тіла може бути й інша;
- **поворотною лопаттю**, де протидіюча сила створюється не тільки вагою тіла, а в багатьох випадках ще й пружиною. Також, є компенсаційні витратоміри з поворотною лопатою, в яких протидіюча сила створюється стороннім джерелом енергії.

До переваг витратомірів обтікання варто віднести конструктивну простоту, надійність роботи, досить високу точність вимірювання та можливість застосування при вимірюванні малих витрат і вимірюванні витрат агресивних середовищ.

Витратоміри постійного перепаду тиску

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

Ротаметри

Ротаметри є найбільш поширеними приладами серед витратомірів постійного перепаду тиску.

Ротаметр (Рисунок 1.24) складається з прозорої конічної трубки (найчастіше скляної), що розходитья вгору, всередині якої розташований поплавков. 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 0-100%), яка потім градується. У верхній частині поплавка (Рисунок 1.24) робляться косі прорізи, завдяки чому він обертається навколо своєї осі. Для монтажу пристрою на трубопровід призначені спеціальні різьбові штуцери.

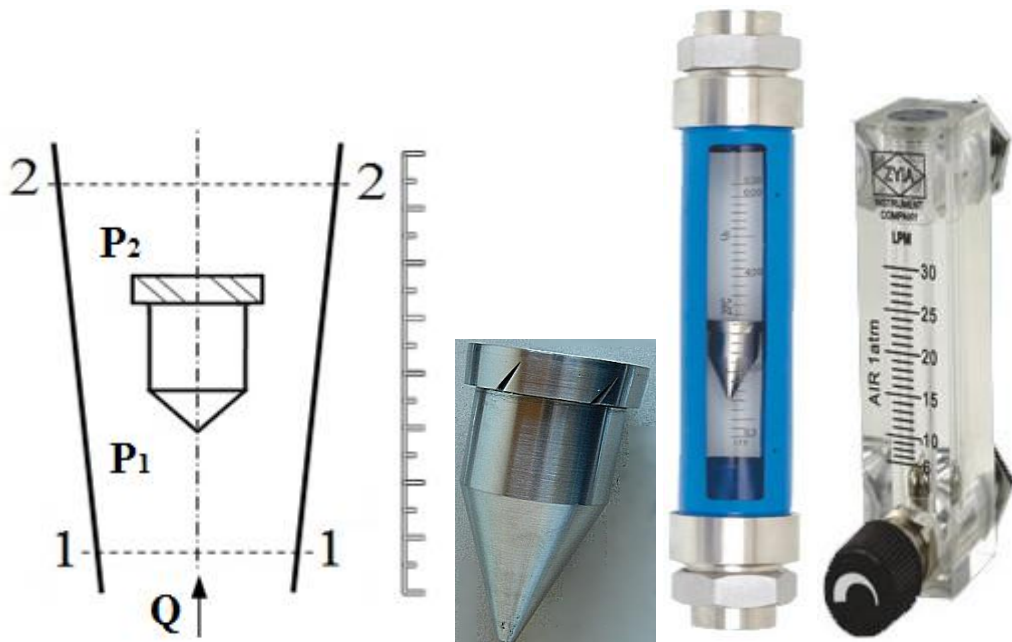


Рисунок 1.24 – Схема ротаметра, поплавков та приклади промислових ротаметрів

Розглянемо сили, що діють на поплавок.

На поплавок об'ємом V зверху вниз діє сила тяжіння G :

$$G = gV(\rho_n - \rho_p), \quad (1.23)$$

де ρ_n , ρ_p – відповідно густини матеріалу поплавка та речовини, що проходить через витратомір; g – прискорення вільного падіння, м/с^2 .

А знизу вверх на поплавок діють:

– сила, обумовлена різницею статичних тисків перед поплавком та після нього ($p_1 - p_2$), що виникає внаслідок прискорення потоку в кільцевому

- зазорі між стінкою й поплавком і формує піднімальну силу, $F = (p_1 - p_2) \cdot f$ (де f – площа максимального поперечного перерізу поплавка);
- динамічний тиск потоку – $W = c \cdot \rho_p \cdot v^2 \cdot f / 2$, де c – коефіцієнт опору поплавка, що залежить від його форми; ρ_p – густина речовини (вимірюваного середовища); v – швидкість вимірюваного середовища в перерізі 1-1 (Рисунок 1.24);
 - сила тертя потоку об поверхню поплавка – $N = k v_k^n f_\phi$, де k – коефіцієнт опору поплавка, що залежить від числа Рейнольдса і ступеня шорсткості поверхні поплавка; v_k – середня швидкість потоку в кільцевому зазорі; n – показник степеню, що залежить від швидкості; f_ϕ – площа бічної поверхні поплавка.

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

$$p_1 - p_2 = (G - W - N) / f. \quad (1.24)$$

Якщо знехтувати силами W і N , то отримаємо:

$$p_1 - p_2 = G / f = \text{const}. \quad (1.25)$$

Таким чином, перепад тиску на поплавок виявляється незалежним від витрати. Тому ротаметри відносять до групи витратомірів постійного перепаду тиску. (У дійсності при збільшенні витрат зростають W і N , а перепад $(p_1 - p_2)$ зі збільшенням витрати дещо зменшується.)

При вхідній витраті Q поплавок займає положення, яке характеризується площею кільцевого зазору f_{k1} . При цьому на поплавок діє перепад $(p_1 - p_2)$, при якому і виконується останнє рівняння. При збільшенні витрати в перший момент положення поплавка і площа кільцевого зазору f_{k1} будуть незмінні, в силу чого перепад $(p_1 - p_2)$ почне збільшуватися. При цьому рівновага порушується, створюється виштовхуюча сила і поплавок почне переміщатися 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 може текти потік. Підйом поплавка буде здійснюватися до тих пір, поки знову не відновиться рівність. Будь-якій витраті відповідає певна площа кільцевого зазору, тобто певне положення поплавка.

Рівняння витрат для ротаметру отримують із врахуванням того, що ротаметр вважається своєрідним витратоміром із звужуючим отвором кільцевого типу. Рівняння, що зв'язує витрату Q і площу кільцевого зазору f_k записується у вигляді:

$$Q = \alpha f_k \sqrt{\frac{2gV(\rho_n - \rho_p)}{\rho_p f}}, \quad (1.26)$$

де α – коефіцієнт витрат, що враховує особливості потоку; f_k – площа кільцевого зазору між поплавком і стінкою ротаметру.

Оскільки величини в отриманому рівнянні, що знаходяться під коренем, практично постійні, можна записати:

$Q = \alpha f_k K$ (де K – постійний коефіцієнт). З цього рівняння видно, що залежність має лінійний вигляд, тому і шкала ротаметру лінійна.

Коефіцієнт витрат α залежить від багатьох факторів. В деяких випадках його можна визначити за розрахунковими залежностями, що наведені в роботі [2]. Зазвичай ротаметри градуують експериментально. Положення поплавка залежить не тільки від витрат, а й від густини контрольованого середовища. Через велике розмаїття контрольованих середовищ ротаметри поділяються на дві групи: для рідин, які градууються по воді, і для газів, які градууються на повітря.

Показання для вимірювання інших речовин згідно методичних вказівок «ГСИ. Расходомеры постоянного перепада давления. Пересчет метрологических характеристик ми 1420-86» розраховують:

– для рідин перерахунок градуювальних характеристик з градуювального середовища на робоче слід проводити за формулою:

$$Q_2 = Q_1 \sqrt{\frac{\alpha_1 \rho_1 (\rho_n - \rho_{p1})}{\alpha_2 \rho_2 (\rho_n - \rho_{p2})}}, \quad (1.27)$$

де Q_1, Q_2 – витрати градуювального та робочого середовища; α_1, α_2 – коефіцієнти витрат для градуювального та робочого середовища; ρ_{p1}, ρ_{p2} – густина градуювального та робочого середовища.

– для газових ротаметрів формула перерахунку має вигляд

$$Q_2 = Q_1 \sqrt{\frac{\alpha_1 \rho_1}{\alpha_2 \rho_2}}. \quad (1.28)$$

Значення коефіцієнтів опору поплавка градуювального та робочого середовища шукають з перерахункових таблиць, що наведені в документації на ротаметр. Вхідними параметрами в них служать безрозмірні критерії подібності.

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). При необхідності поплавки роблять порожнистим (для зменшення його ваги). Для ротаметрів малих витрат іноді використовують поплавки 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 [5].

Межі застосування звичайних ротаметрів зі скляними трубками: по тиску 0,5-0,6 МПа; по температурі 100-150 °С.

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

Більшість недоліків можна усунути у випадку виготовлення трубки з металу і при використанні дистанційної передачі. Але при цьому 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, а також вони забезпечені перетворювальними пристроями з електричним або пневматичним вихідними сигналами. Принцип дії цих витратомірів такий же як у ротаметрів.

Поплавок в цих пристроях жорстко зв'язаний з осердям або магнітом для дистанційної передачі. Хід поплавка не перевищує 40-70мм. В цих приладах проточна частина може мати різну форму (Рисунок 1.25).

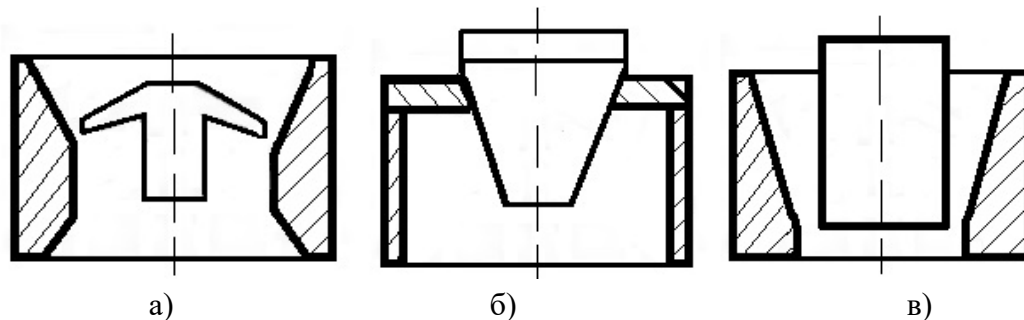
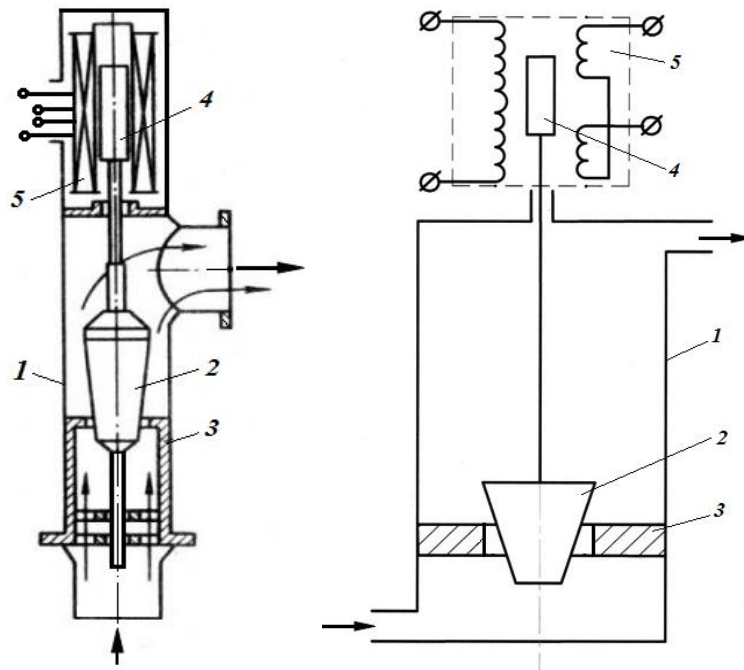


Рисунок 1.25 – Схема поплавкових пар у поплавкових витратомірів

Перша поплавок пара (Рисунок 1.25-а) складається з грибоподібного поплавка, який переміщається в конічній розточці. Ця пара застосовується для вимірювання малих витрат (для води 0,025-0,4 м³/год). Друга поплавок пара (Рисунок 1.25-б) складається з конічного поплавка, який переміщається в круглому отворі. Ця пара застосовується для вимірювання середніх витрат (для води 0,063-16 м³/год). Третя поплавок пара (Рисунок 1.25-в) складається з циліндричного поплавка, який переміщається в конічному отворі. Ця пара застосовується для вимірювання великих витрат (для води 16-63 м³/год).

Схеми поплавкових витратомірів з електричною дистанційною системою передачі показань і різним способом виконання чутливого елемента наведені на Рисунок 1.26 та Рисунок 1.27.

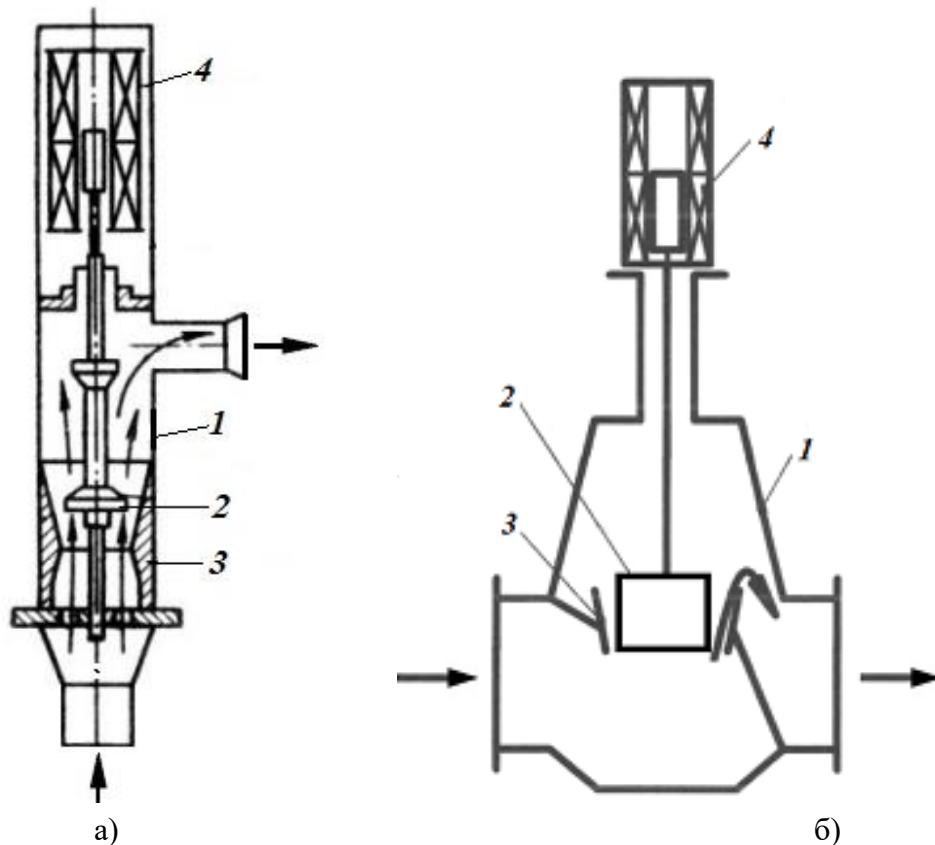


1 – металевий корпус; 2 – поплавок; 3 – діафрагма; 4 – осердя; 5 – диференціально-трансформаторний перетворювач

Рисунок 1.26 – Схеми поплавкових витратомірів з конічним поплавком

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.

Поплавковий витратомір з грибоподібним чи циліндричним поплавком має металевий корпус 1, всередині якого розташовані грибоподібний поплавок 2 в конічній розточці 3 (Рисунок 1.27-а), або циліндричний поплавок 2 в конічному отворі 3 (Рисунок 1.27-б). При зміні витрати поплавок переміщується. Через тягу це переміщення передається на систему дистанційного вимірювання, наприклад перетворювача 4.

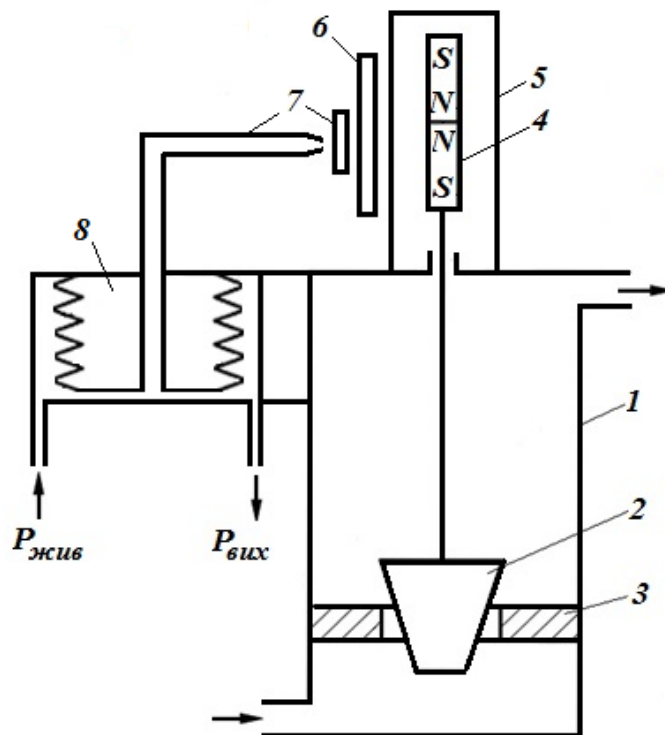


1 – металевий корпус; 2 – поплавок; 3 – діафрагма; 4 – осердя; 5 – диференціально-трансформаторний перетворювач

Рисунок 1.27 – Схеми поплавкових витратомірів з грибоподібним та циліндричним поплавком

Схема поплавкового витратоміра з пневматичною дистанційною системою передачі показань наведена на Рисунок 1.28.

Поплавковий витратомір 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, що виконане з двох магнітів, звернених один до одного однойменними полюсами. Зовні немагнітної трубки 5 на шарнірі розташований магніт 6, який функціонально зв'язаний з пневматичним перетворювачем сопло-заслінка 7.



1 – металевий корпус; 2 – поплавков; 3 – діафрагма; 4 – осердя (система магнітів); 5 – трубка з немагнітного матеріалу; 6 – зовнішній магніт; 7 – перетворювач сопло-заслінка; 8 – сифон зворотного зв'язку

Рисунок 1.28 – Схеми поплавкового витратоміра з конічним поплавком та пневматичною системою передач

Внутрішній і зовнішній магніти встановлюються різнойменними полюсами один проти іншого і утворюють врівноважену систему. При збільшенні витрати поплавок 3 піднімається вгору та переміщує із собою осердя 4 (магніти). Переміщення осердя 4 вгору (при збільшенні витрати) викликає рух зовнішнього магніту 6, що змінює відстань між соплом і заслінкою 7 (заслінка прикриває сопло), і тиск $P_{вих}$ збільшується. Це призводить до стиснення сифона від'ємного зворотного зв'язку 8 і викликає переміщення сопла вгору. При переміщенні заслінка незначно відходить від сопла. Рівновага системи настає тоді, коли зовнішній магніт 6 займе таке ж положення по висоті, яке займає внутрішній – осердя 4.

Таким чином, зовнішній магніт весь час відстежує за положення внутрішнього магніту, який зв'язаний з поплавком, що надає можливість визначити вимірювану витрату.

Поплавкові витратоміри зазвичай розраховані на робочій тиск 6,27 МПа. Основна допустима похибка цих приладів не перевищує 2,5-3% від верхньої межі вимірювань.

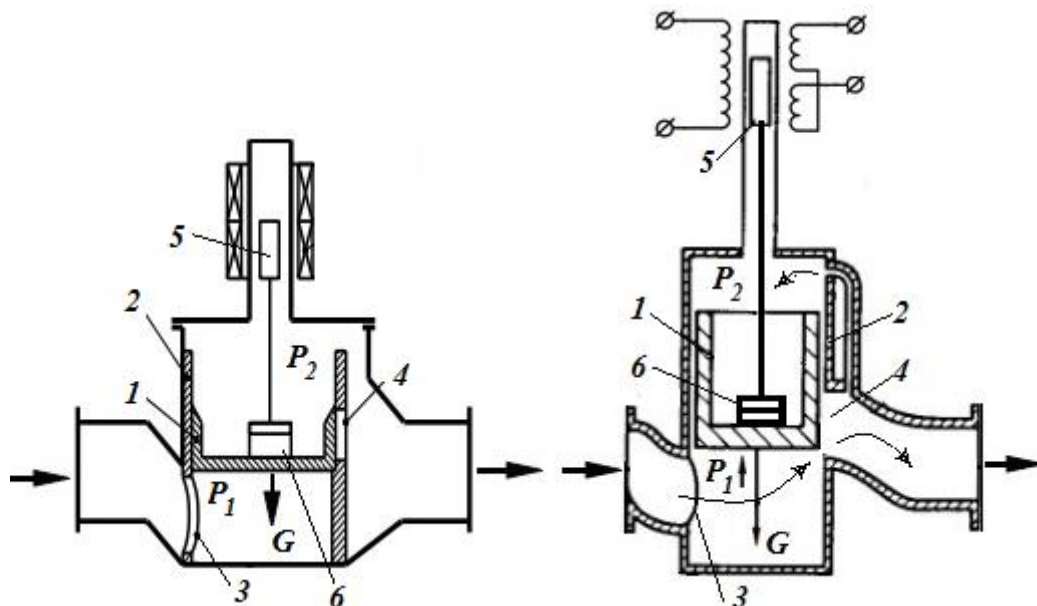
Поршневі витратоміри

Поршневі або золотникові витратоміри – третій різновид витратомірів постійного перепаду тиску. У цих приладах 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 при цьому зберігається постійним. Вибираючи належний профіль прорізу, можна отримати бажану залежність між витратою і переміщенням поршня.

Схема поршневого витратоміра наведена на Рисунок 1.29.

Поршень 1, що є чутливим елементом поршневого витратоміра, знаходиться всередині втулки 2. 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 осердям 5 системи передач. У поршковому витратомірі вага поршня G з тягарями 6 і вагою штока з осердям 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.



1 – поршень; 2 – втулка; 3 – круглий отвір; 4 – прямокутний отвір; 5 – осердя; 6 – тягарі

Рисунок 1.29 – Схеми поршневого витратоміра

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 перепадом тиску, що змінюється

Як і в витратомірах постійного перепаду тиску, тут також присутній поплавков, на який впливає потік вимірюваної речовини. Величина переміщення поплавка служить мірою витрати. Ці витратоміри можна поділити на поплавково-пружинні, поплавково-архімедові, витратоміри з електромагнітним зрівноважуванням, кулькові з рухом в криволінійній трубці.

Найбільш поширені серед них поплавково-пружинні витратоміри.

Поплавково-пружинні витратоміри

Якщо поплавок (або поршень) в поплавковому (або поршневому) витратомірі з'єднати з пружиною, то отримаємо поплавково-пружинний витратомір, в якому тиск потоку має долати не тільки вагу рухомого елемента, але і пружність пружини. Один з реалізованих пристроїв поплавкового-пружинних витратомірів показана на Рисунок 1.30-а.

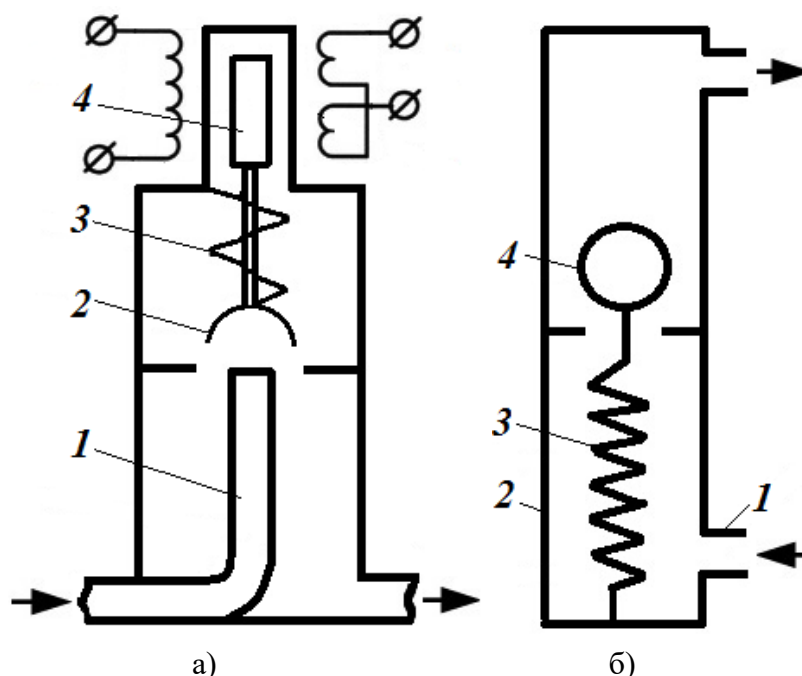


Рисунок 1.30 – Схема поплавково-пружинного витратоміра: а) – з верхньою пружиною: 1 – труба; 2 – дзвін; 3 пружина; 4 – осердя; б) – з нижньою пружиною: 1 – вхідний штуцер; 2 – труба (корпус витратоміра); 3 пружина; 4 – кульковий поплавок

Рідина, що протікає по трубі 1, піднімає дзвін 2 напівсферичної форми, що виконує роль поплавка. Дзвін, що навантажений пружиною 3, переміщується під дією напору рідини і переміщує осердя 4 диференціально-трансформаторної передачі і таким чином формується вихідний сигнал витратоміра.

Такі прилади розроблені для труб діаметром від 10 до 260 мм на витрати від 0.03-0.15 м³/год до 200-1000 м³/ год при тиску до 2 МПа і температурі до 120°C.

Витратомір, що показано на Рисунок 1.30-б, має кульковий поплавок 4, який притягнутий нижньою пружиною 3 до сидла, що розташоване всередині циліндричної трубки 2. Рідина поступає в нижню частину трубки через штуцер 1 і піднімає поплавок, натягуючи при цьому пружину, яка протидіє напору. Поплавок переміщується у верхній частині трубки. Кільцева площа прохідного перерізу між трубкою і кульовим поплавком залишається незмінною. Отже, витрата Q буде пропорційна $\sqrt{H}$ (де H – висота підйому поплавка).

Межі вимірювання поплавково-пружинних витратомірів можна змінювати шляхом заміни пружини.

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.

Витратоміри з поворотною лопаттю діляться на:

- витратоміри з пружинним і з вантажним зрівноваженням;
- витратоміри компенсаційні з електричним або пневматичним зрівноваженням.

Схеми витратомірів з поворотною лопаттю показано на Рисунок 1.31.

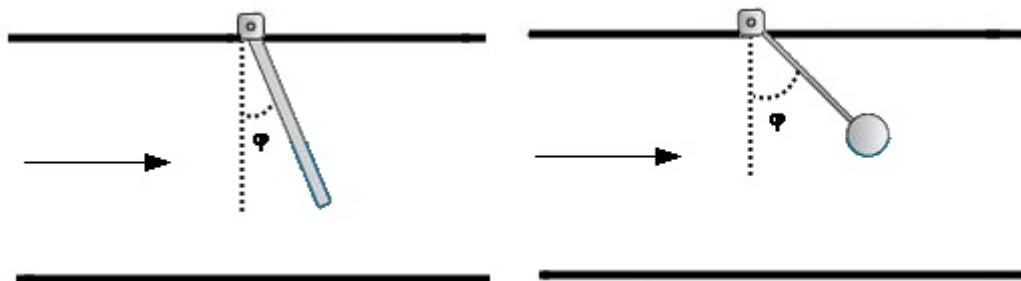
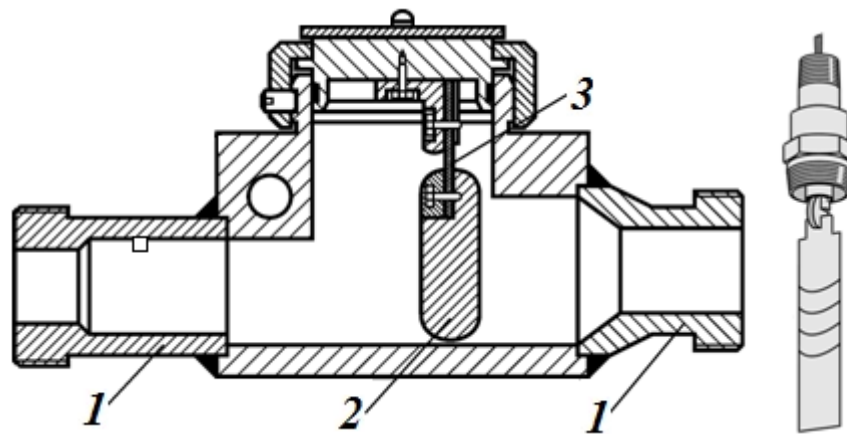


Рисунок 1.31 – Схеми витратомірів з поворотною лопаттю

Кут повороту лопаті для вимірювання витрат рідин не повинен перевищувати до 70-80°, а для газів – 60°. 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.

Витратомір РПЛ-1 з поворотною лопаттю та один з прикладів виконання лопаті показано на Рисунок 1.32.



1 – трубопровід; 2 – лопать; 3 – пружна підвіска

Рисунок 1.32 – Витратомір РПЛ-1 з поворотною лопаттю та приклад виконання лопаті

Витратомір включає чутливий елемент і пульт. Чутливий елемент монтується в розрив горизонтальної ділянки трубопроводу. Пристрій включає трубопровід 1 і лопать 2, що закріплена на пружній підвісці 3, і яка зв'язана з індуктивним перетворювачем, що розташований із зовнішнього боку. Трубопровід і корпус датчика виконані з іржостійкої неферомагнітної сталі, а лопать – з іржостійкої феромагнітної сталі.

Під дією потоку рідини лопать відхиляється на відповідний кут φ , який є мірою витрати рідини. Протидіючою силою виступає вага лопаті і пружні сили підвіски. Лопать також виконує роль осердя індуктивного перетворювача.

До переваг витратомірів з поворотною лопаттю можна віднести:

- великий діапазон вимірювань;
- простота перетворення гідродинамічного тиску рідини в стандартний сигнал;
- можливість двосторонньої дії використання (тобто при обох напрямках потоку);
- можливість використання для виміру великих витрат в умовах високих температур та в агресивних і забруднених середовищах;
- хороші динамічні характеристики (1,5-2 с загасання коливального процесу).

А до недоліків можна віднести: можливість появи вібрацій внаслідок утворення вихорів, боротьба з якими ускладнює конструкцію.

1.2.4 Вихрові витратоміри

Принцип дії вихрових витратомірів ґрунтується на явищі, що носить назву «ефект Кармана» (названий 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 Рисунок 1.33 показано обтікання циліндричного тіла потоком і утворення вихорів.

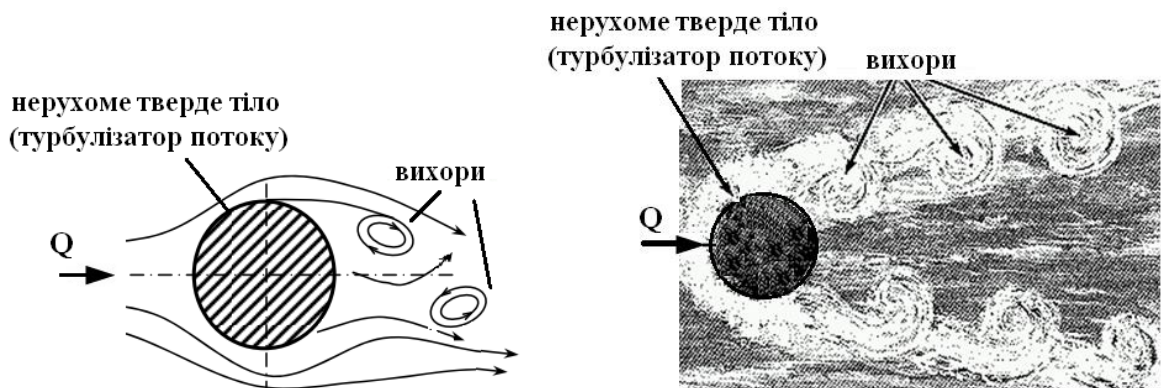


Рисунок 1.33 – Обтікання циліндричного тіла потоком з утворенням

Утворення вихрових доріжок пояснюється наступним чином. Тіло, що знаходиться на шляху потоку речовини, змінює напрям руху струменів потоку, що це тіло обтікають, і при цьому підвищується швидкість потоку за рахунок зменшення відповідного тиску. Таким чином, на передній частині обтічного тіла спостерігається підвищений тиск, а на задній – понижений тиск. Граничний шар потоку після проходження найбільшого перерізу тіла відривається від нього та під дією пониженого тиску змінює напрямок свого руху, створюючи вихор. Це явище відбувається як на верхніх точках обтічного тіла так і на нижніх. Оскільки розвиток вихору з однієї сторони обтічного тіла перешкоджає розвитку вихору з іншої сторони, то вихори утворюються по чергово з обох сторін тіла. І за тілом утворюються вихрові доріжки. На деякій відстані за тілом відбувається зменшення швидкості і збільшення відповідного тиску.

Частота утворення і зриву вихорів за тілом пропорційна швидкості потоку та розмірам тіла обтікання. При постійному характерному розмірі тіла частота пропорційна швидкості, а значить і об'ємній витраті.

Тіла обтікання, при цьому, можуть мати різну форму: трикутну, трапецієподібну, круглу, прямокутну, і таке інше (Рисунок 1.34).



Рисунок 1.34 – Форми тіла обтікання у вихрових витратомірів

При визначенні характеристик вихрових витратомірів оперують поряд з числом Рейнольдса Re також і числом Струхаля Sh . Число Струхаля (безрозмірна величина) є критерієм подібності нестационарних течій рідин і

газів, що характеризує сталість протікання процесів в часі. Одна з формул, що описує число Струхаля:

$$S = f \cdot D / V, \quad (1.29)$$

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

Число Струхаля є функцією числа Рейнольдса Re , і в діапазоні

$200 < Re < 200\,000$ діє емпіричний закон сталості числа Струхаля: $Sh \approx 0,2$.

Оскільки число Струхаля 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. При відомій площі перерізу витратоміра об'ємна витрата Q пов'язана з частотою залежністю:

$$f = k \cdot Q, \quad (1.30)$$

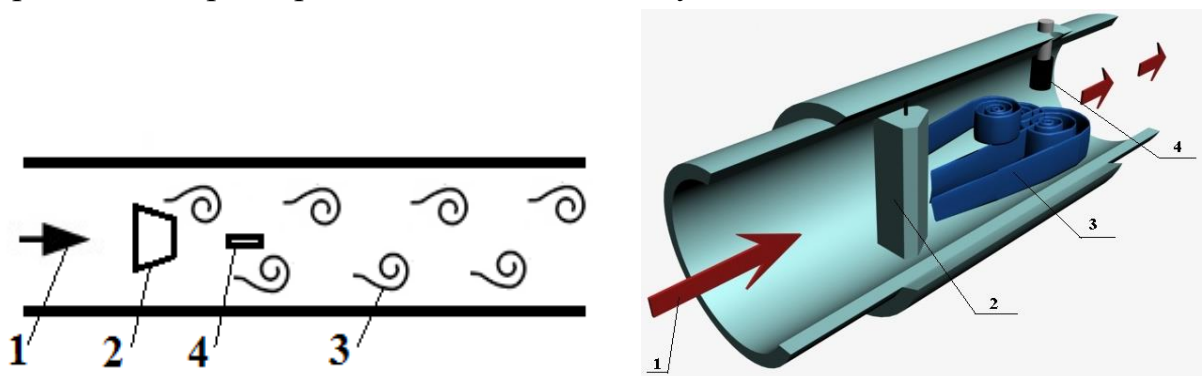
де k – коефіцієнт пропорційності вихрового витратоміра (визначають градуванням приладу).

Вихори в потоці утворюють поле змінного пульсуючого тиску, який пропорційний частоті.

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 вихроперетворювач (тіло обтікання) і пристрій детектування вихорів (сенсор). Загальна будова первинного перетворювача наведена на Рисунок 1.35.



1 – потік речовини; 2 – тіло обтікання; 3 – вихори; 4 – сенсор

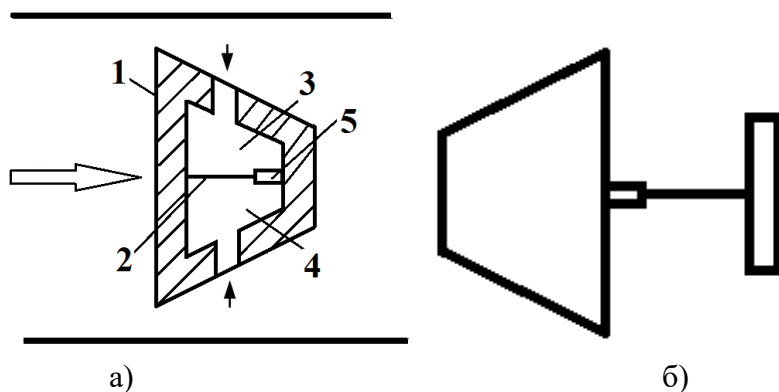
Рисунок 1.35 – Схема первинного перетворювача вихрового витратоміра

Існує досить велика кількість різновидів вихроперетворювачів, які можна розділити на дві групи: що складаються з однієї частини і ті, що складаються з двох і більше частин.

Найбільш поширені тіла обтікання у вихрових витратомірів, що складаються з однієї частини, такі: циліндричне, прямокутне, трикутне і трапецієподібне.

Для детектування вихорів за тілом обтікання (або всередині нього) встановлюється сенсор. У таких витратомірах може використовуватися кілька варіантів перетворення коливань вихрового потоку і перетворення їх в вихідний сигнал. Як правило, для цих цілей, застосовується метод вимірювання швидкості струменів по обидва боки обтічного тіла (за допомогою термоанемометрів – терморезисторів) або вимірювання періодичного коливання тиску, яке можна досить легко перетворити в електричні вихідні сигнали за допомогою різних перетворювачів (п'єзоелектричних, ємнісних, індукційних тощо).

Схема п'єзоелектричного перетворювача різниці пульсуючих тисків показано на Рисунок 1.36-а. Для детектування вихорів всередині тіла обтікання 1 встановлюється рухомий динамічний елемент 2 (може бути встановлений за тілом обтікання), на яке по черзі з різних боків впливають вихори потоку через спеціальні приймальні камери 3,4. Під дією тиску вихорів рухомий динамічний елемент вигинається і передає вплив на чутливий елемент – п'єзоелектричний перетворювач 5, який перетворює механічний вплив в електричний сигнал, який надалі посилюється і фільтрується.



1 – тіло обтікання; 2 – рухомий динамічний елемент (пластина); 3, 4 – приймальні камери; 5 – п'єзоелектричний перетворювач

Рисунок 1.36 – Схема вихрового витратоміра з п'єзоелектричним перетворювачем

Сенсори на основі п'єзoeлементів відрізняються швидкодією, хорошим рівнем сигналу, високою технологічністю, низькою вартістю виготовлення. Такі витратоміри відрізняються широким температурним діапазоном, універсальністю, високою стабільністю і надійністю. Проте, такі прилади дуже чутливі до вібрацій трубопроводу.

Один із способів знімання сигналу про витрати показано на Рисунок 1.36-б. Тут пластина механічно з'єднана з тілом обтікання трапецієподібної форми та п'єзокристалом (з обкладинок якого знімається напруга з частотою пропорційною частоті зриву вихорів.), а з іншої сторони з'єднана з диском, який сприяє посиленню і стабілізації вихроутворення. Замість п'єзокристалу на пластині можна розташувати тензорезистори, що будуть сприймати її коливання під впливом вихорів та перетворювати їх у вихідний сигнал.

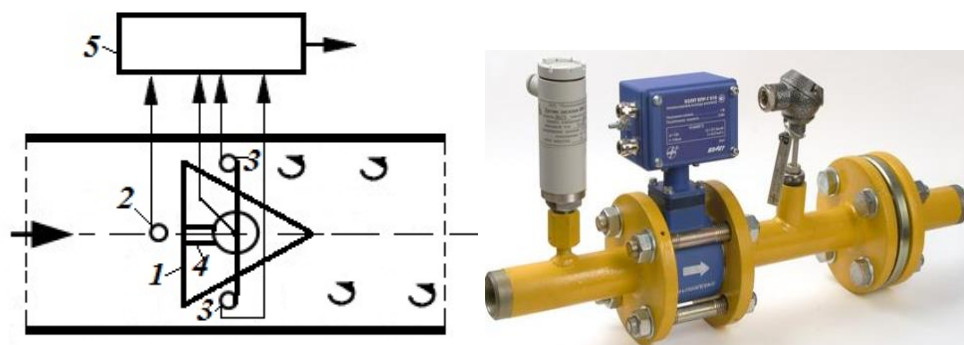
При застосуванні у вихровому витратомірі **ємнісного перетворювача** пульсації тиску вихорів будуть впливати на ємнісні комірки сенсора, деформуючи їх поверхню, і, відповідно, змінюючи ємність цих комірок. Перерозподіл ємностей комірок формує вихідний сигнал.

Роботу вихровому витратомірів можуть порушувати акустичні та вібраційні завади, що створюються різними джерелами: насосами та компресорами, місцевими опорами, вібруючими трубами в т.і. Якщо частота шкідливих пульсацій відрізняється від частоти вимірювального сигналу, то її можливо усунути за допомогою електричних фільтрів. Для боротьби з завадами доцільно використовувати два перетворювача (наприклад, два п'єзoeлементи), що включаються зустрічно та встановлюються в точках, де пульсації корисного сигналу знаходяться в протифазі, а пульсаційні завади в фазі. При цьому корисні сигнали підсилюються, а завади будуть усунуті. Вважається, що термоперетворювачі (термоанемометри) те такі чутливі до завад як пульсуючих тисків. Вібрації обладнання не впливають на їх роботу, але вони мають меншу міцність.

Вихрові витратоміри можуть бути додатково укомплектовані перетворювачем надлишкового тиску, який розміщують перед тілом обтікання, та перетворювачем температури, який розміщують в камері тіло обтікання або за тілом обтікання. У процесі обробки сигналів перетворювачів пульсацій тиску, температури та надлишкового тиску мікропроцесорним пристроєм відбуваються фільтрація паразитних складових, зумовлених впливами вібрацій, флуктуації тиску й температури потоку, та формування вихідних сигналів витрати, тиску та температури.

У вихровому витратомірі, що показано на Рисунок 1.37. визначення частота утворення вихорів проводиться за допомогою двох п'єзодатчиків, які фіксують пульсації тиску в зоні утворення вихорів.

Конструктивно вихровому витратомірі являє собою моноблок, що складається первинного перетворювача (проточна частина приладу) і вторинного перетворювача (електронного блоку). У корпусі проточної частини датчика розміщені первинні перетворювачі об'ємної витрати, надлишкового тиску і температури.



1 – тіло обтікання; 2 – перетворювач надлишкового тиску 3 – п'єзoeлектричні перетворювачі пульсацій тиску; 4 – термоперетворювач опору; 5 – мікропроцесорний пристрій та приклад промислового витратоміра

Рисунок 1.37 – Схема вихрового витратоміра з п'єзоелектричними перетворювачами

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 виконує обробку сигналів перетворювачів пульсацій тиску, надлишкового тиску та температури. В процесі обробки 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 те, 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, що та непридатність до вимірювання потоків, що рухаються з малою швидкістю.

Різні моделі вихрових витратомірів мають клас точності 1...2. Їх можна встановлювати на трубопроводах діаметрами 15...2000мм для газів та 50...1200мм для рідин, забезпечуючи вимірювання витрати газів у діапазоні 9...2000000 м³/год, рідин – 1...25000 м³/год.

Вихороакустичні витратоміри

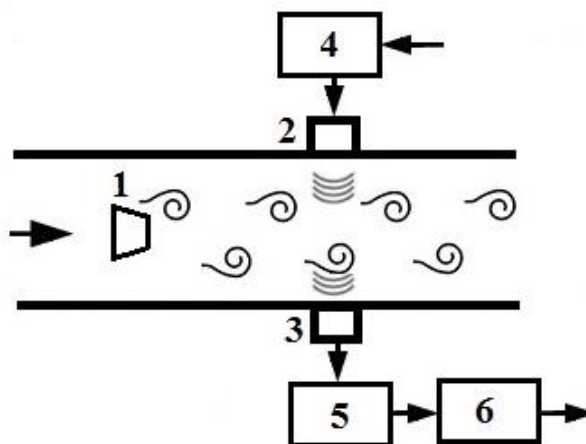
У вихороакустичних витратомірах в якості тіла обтікання застосовується призма трапецієподібного перерізу, а детектування вихорів здійснюється за допомогою ультразвукових пристроїв. Тому їх також називають і вихровими ультразвуковими витратомірами. Схема вихороакустичного витратоміра показана на Рисунок 1.38.

Конструктивно прилад складається з корпусу проточної частини і електронного блоку. В проточній частині розташовуються: призма трапецієподібного перерізу, п'єзовипромінювач, п'єзоприймач (також іноді встановлюють термоперетворювач).

Тіло обтікання 1 розташовано на вході проточної частини і при його 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.



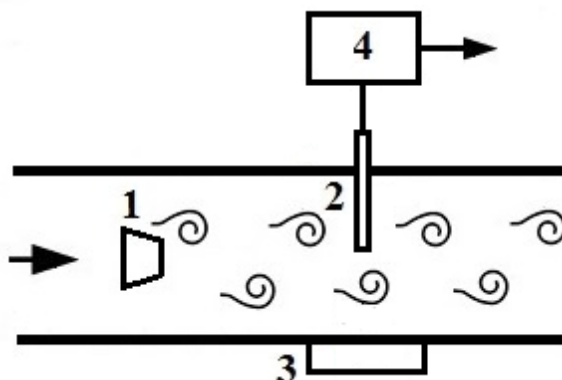
1 – тіло обтікання; 2 – п'єзовипромінювач; 3 – п'єзоприймач; 4 – генератор; 5 – фазовий детектор; 6 – електронний блок

Рисунок 1.38 – Схема вихороакустичного витратоміра

Прилади відрізняються високою чутливістю, що дозволяє їх використовувати для вимірювань на низьких витратах. При цьому 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.

Схема приладу з електромагнітним пристроєм для детектування вихорів (**вихрового електромагнітного витратоміра**) наведена на Рисунок 1.39.

Тіло обтікання 1 розташовано на вході проточної частини і при його обтіканні за ним утворюються вихрові доріжки. За тілом обтікання розташовано електрод 2, який знаходиться в полі постійного магніту 3. При русі електропровідної рідини (провідника) в поле постійного магніту наводиться ЕРС. Вихори створюють збурення потоку і приводять до пульсації тиску та до пульсації ЕРС, яка фіксується за допомогою електроду, що встановлений за тілом обтікання. Частота пульсацій ЕРС відповідає частоті утворення вихорів, а відповідно і витраті речовини. Частота пульсацій ЕРС, що знята за допомогою електроду обробляється блоком формування імпульсів для отримання вихідного електричного сигналу.



1 – тіло обтікання; 2 – електрод 3 – постійний магніт; 4 – блок формування імпульсів

Рисунок 1.39 – Схема вихрового електромагнітного витратоміра

Такі витратоміри відрізняються простій конструкції, можливістю автономного живлення, низькою вартістю.

Вихрові витратоміри із застосуванням тіла обтікання отримали дуже широке застосування. Значно рідше використовують вихрові витратоміри з іншими принципами створення вихорів і збуреного потоку.

До таких вихрових витратомірів відносять:

- витратоміри з прецесією воронкоподібного вихору;
- витратоміри з осцилюючим струменем.

Вихрові витратоміри з прецесією воронкоподібного вихору – це витратоміри, потік в яких закручується в первинному перетворювачі, а потрапляючи в широку частину труби, приймає воронкоподібний вид і створює пульсації тиску (прецесує).

Перетворювачі таких витратомірів мають пристрій, що закручує потік, котрий потім через коротку ділянку труби направляється на розширену ділянку труби (Рисунок 1.40).

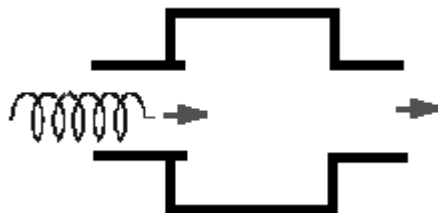


Рисунок 1.40 – До схеми вихрового з прецесією воронкоподібного вихору

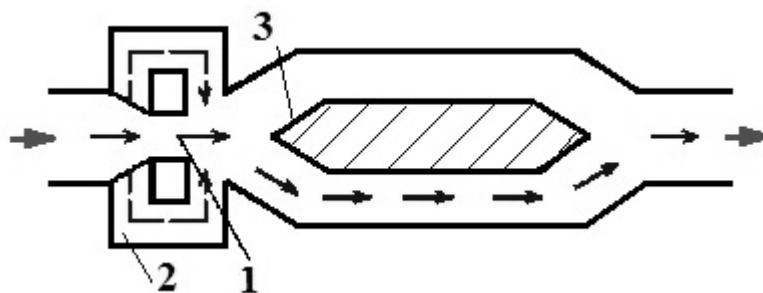
В широкій ділянці труби потік, що обертається приймає воронкоподібну форму, а вісь навколо обертається ядро вихору сама починає обертатися навколо осі трубопроводу. При цьому тиск на зовнішній поверхні вихрового потоку пульсує синхронно з кутовою швидкістю ядра вихору пропорційно лінійній швидкості потоку речовини (об'ємній витраті).

Для перетворення частоти пульсації в уніфікований вимірювальний сигнал використовуються напівпровідникові термоанемометри або п'єзоелементи.

Вихрові витратоміри з осцилюючим струменем – це витратоміри, де у первинному перетворювачі струмінь, що витікає з отвору, здійснює автоколивання, створюючи при цьому пульсації тиску.

Автоколивання та пульсації тиску забезпечуються спеціальною конструкцією витратоміра і створюються при витіканні струменя з отвору.

Вихрові витратоміри з осцилюючим струменем можуть бути двох типів: релаксаційні (Рисунок 1.41) і зі зворотним гідравлічним зв'язком (Рисунок 1.42).



1 – сопло; 2 – обвідна трубка; 3 – дифузор

Рисунок 1.41 – До схеми вихрового з осцилюючим струменем (релаксаційного типу)

Потік речовини проходить через сопло 1 і попадає в дифузор 3. Під впливом випадкових причин потік в кожен момент часу в більший ступені притискається до одної зі стінок дифузора (на рис. до нижньої). Тоді завдяки ежектуючій дії струменя тиск у нижній частині обвідної трубки 2 стане більшим за тиск у верхній частині обвідної трубки. Тоді виникне рух у обвідній трубці (показаний стрілками), що перекине струмінь до іншої зі стінок дифузора (верхньої). Напрямок руху в обвідній трубці зміниться, що потім знову перекине струмінь до іншої зі стінок дифузора. Струмінь почне осилювати (автоколивання струменя). Настане процес автоколивань, що буде супроводжуватися синхронними коливаннями тиску з обох сторін струменя за якими визначають витрату.

В схемі приладу зі зворотним гідравлічним зв'язком дифузор і канали побудовані таким чином, що не весь потік проходить зі входу на вихід, а частина його повертається на вхід. Це дозволяє перекинути струмінь до іншої зі стінок дифузора. В результаті струмінь почне осилювати.

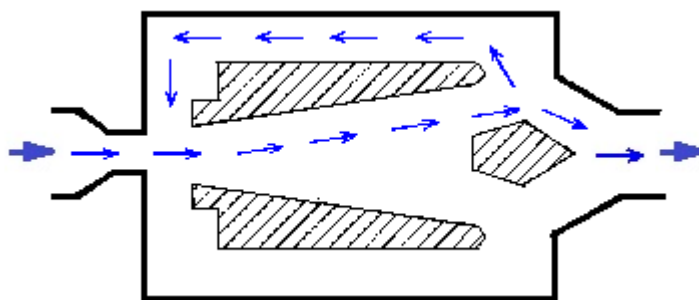


Рисунок 1.42 – До схеми вихрового з осцилюючим струменем (зі зворотним гідравлічним зв'язком)

Процес автоколивань буде супроводжуватися синхронними коливаннями тиску за якими визначають витрату.

Прилади, що мають перетворювач зі зворотним зв'язком працюють краще, оскільки, такий перетворювач дозволяє більш строго забезпечити процес осциляції і має лінійну залежність між витратою і частотою коливання. Такі витратоміри можуть бути використані в трубах з діаметром від 12 до 100 мм.

Взагалі, термін «вихровий витратомір», може бути застосовний тільки до приладів перших двох типів – тобто витратомірів з обтічним тілом і прецесією воронкоподібного вихору. Але характер зміни параметрів, що

визначають пух потоку в перетворювачах віднести і ці витратоміри до класу вихрових.

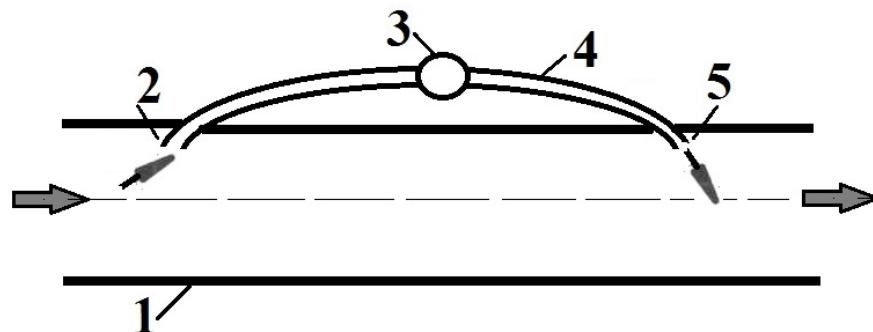
1.2.5 Парціальні витратоміри

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 званою парціальною схемою.

Характерною особливістю парціальної схеми є наявність невеликої ділянки труби невеликого 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 невеликій 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 Рисунок 1.43.



1 – трубопровід; 2 – прийомний отвір обводу; 3 – водомір; 4 – труба обводу;
5 – вихідний отвір обводу

Рисунок 1.43 – Схема парціального витратоміра

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).

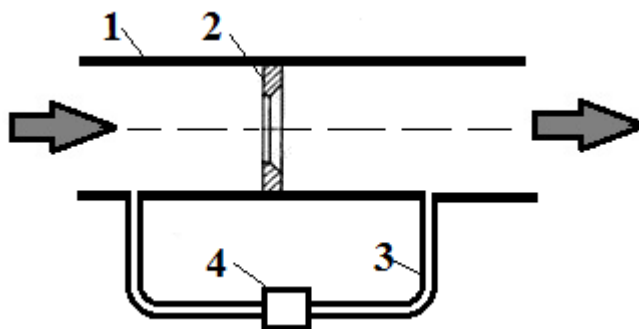
Парціальні витратоміри можна поділити на три основні групи:

- 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.

На практиці застосовують різні способи відгалужень. Найчастіше в основному трубопроводі встановлюють звуження потоку (опір), а кінці обвідної трубки приєднують з двох сторін від нього. Парціальний потік в обвідній трубці виникає через різницю статичних тисків, що створюється звужувальним пристроєм (чи якимось іншим опором) в основному трубопроводі.

На Рисунок 1.44 показана схема парціального витратоміра зі способом відгалуження, коли відгалужений потік повертається в основну трубу.

Для створення перепаду тисків в основному трубопроводі 1 встановлено звужувальний пристрій (діафрагму) 2. Під дією цього перепаду частина потоку направляється в обвідну трубку 3, і через стандартний витратомір 4 знову повертається в основну трубу. Основна витрата визначається за вимірною витратою в обвідній трубці.



1 – трубопровід; 2 – звужувальний пристрій (діафрагма); 3 – труба обводу;
4 – витратомір

Рисунок 1.44 – Схема парціального витратоміра, у якому відгалужений потік повертається в основну трубу

В іншому випадку обвідна трубка вводиться в основну трубу так, що її передній отвір був направлений назустріч потоку, а задній – в протилежну сторону. Тут, в обвідній трубці, парціальний потік утворюється за рахунок різниці динамічних тисків на її кінцях.

Ще одним із способів відгалуження від основного потоку є спосіб, коли обвідна трубка ставиться на коліні труби, де під впливом відцентрових сил створюється різниця тиску, яка залежить від витрати. Останній спосіб дозволяє вимірювати витрату речовини на всмоктуючому парубку колінчатої форми у великих вертикальних насосів.

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 воно є, то щоб дотримувалося рівність або сталість відносини густин середовища в основний і обвідній трубах.

Порівняльний аналіз деяких типів парціальних витратомірів показав:

Для парціальних витратомірів змінного перепаду тиску в більшості випадків залежність між Q і q лінійна. Це є перевагою даного типу витратоміра. Однак застосування парціального витратоміра в більшості випадків недоцільно, так як його застосування супроводжується суттєвим ускладненням вимірювальної схеми (не буде переваги перед звичайним способом вимірювання витрати в основному трубопроводі за допомогою звужувальних пристроїв).

Для парціальних витратомірів обтікання залежність між Q і q нелінійна. Однак цей недолік може бути усунутий відповідним градуюванням приладу. Також слід зауважити, що для отримання задовільних результатів вимірювання даними витратомірами необхідно зменшити опір чутливого елемента приладу і збільшувати опір обвідної труби, наприклад, установкою в ній діафрагми.

Найбільш привабливим є застосування індукційного парціального витратоміра. При даному способі наявна лінійна залежність між Q і q . Крім того, установка датчика індукційного витратоміра на трубопроводі малого діаметра створює нормальні умови його роботи. Властивості індукційного витратоміра дозволяють застосовувати датчики одного калібру для вимірювання витрат різних за величиною.

Парціальні теплові витратоміри досить часто зустрічаються на практиці завдяки повній відсутності контакту з вимірюваною речовиною. Але такі перетворювачі витрати зазвичай виготовляють для труб малого діаметра.

Парціальні витратоміри мають в порівнянні з іншими типами водомірів меншу точність. Також суттєвим недоліком парціальних витратомірів є те, що для отримання залежності $q = f(Q)$, як правило, необхідне градуювання. Парціальні витратоміри мало придатні для вимірювання витрат забрудненої рідини через засмічення отворів в обвідному трубопроводі.

1.3 Прилади з безперервно рухомим тілом

1.3.1 Тахометричні витратоміри

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 оборотів поміщеного в потік рухливого елемента.

Якщо вимірювати швидкість руху рухливого елемента, то отримуємо тахометричний витратомір. При створенні тахометричного витратоміра необхідно швидкість руху елемента перетворити в сигнал, що пропорційний витраті та зручний для вимірювання.

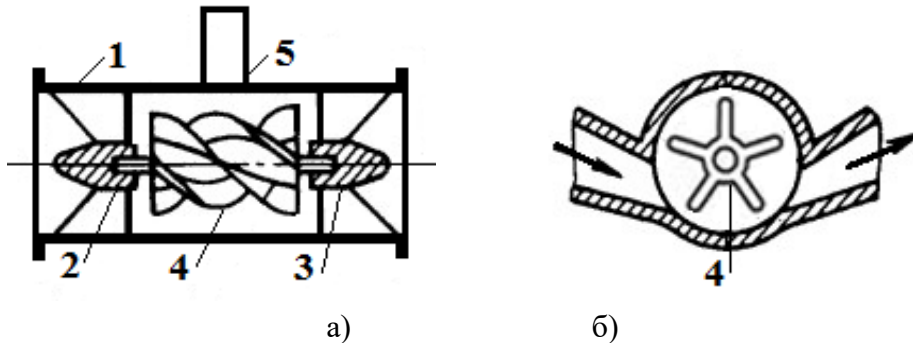
Якщо підраховувати (вимірювати) загальне число обертів (чи ходів) рухливого елемента – вертушки (крильчатки або турбіни), то отримуємо тахометричний лічильник кількості речовини (об'єму або маси). Різниця між крильчаткою (також називають тангенціальною турбіною) та турбіною (також називають аксіальною турбіною) 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.

Всі тахометричні витратоміри (лічильники) є енергонезалежними. 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 4-750 мм та тиску до 250 МПа. Тахометричні прилади зазвичай вимірюють об'ємні витрати в межах 0,03-1600 м³/год. При необхідності вимірювання масових витрат вони повинні забезпечуватися або вимірювачами температури та тиску (або густинοмірами), обчислювальними пристроями. Тахометричні витратоміри (лічильники) використовують для вимірювання витрати та кількості води, різних 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 різних рідин, крім дуже забруднених та з високою в'язкістю. Для вимірювання витрати газу їх використовують значно рідше внаслідок його малої густини. В якості рухливого елементу у цих витратомірах використовують крильчатки або турбінки (відмінності між ними розглянуті вище), тому їх часто називають крильчасті витратоміри та турбінні витратоміри (іноді просто турбінні витратоміри без вказівки на тип рухливого елементу).

Схеми швидкісних витратомірів показані на Рисунок 1.45.



1 – трубопровід; 2, 3 – струменевипрямлячі; 4 – вертушка; 5 – пристрій формування вихідного сигналу (тахометричний перетворювач або лічильний пристрій)

Рисунок 1.45 – Схеми швидкісних витратомірів: а) з турбінкою; б) з крильчаткою

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 Рисунок 1.45-а зображена турбінка з лопатями які вигнуті за гвинтовою лінією, вісь обертання якої паралельна напрямку руху потоку речовини, а на Рисунок 1.45-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 витрату (кількість) речовини.

Кількість рідини Q можна визначити через середню швидкість потоку $V_{\text{сер}}$ та площу поперечного перерізу трубопроводу S :

$$Q = V_{\text{сер}} \cdot S.$$

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.

В результаті отримаємо формулу зв'язку між кількістю рідини Q , що пройшла через лічильник, та кількістю обертів вертушки: $n = k \cdot (Q / S)$.

На Рисунок 1.46 наведені приклади об'ємного зображення лічильників води.

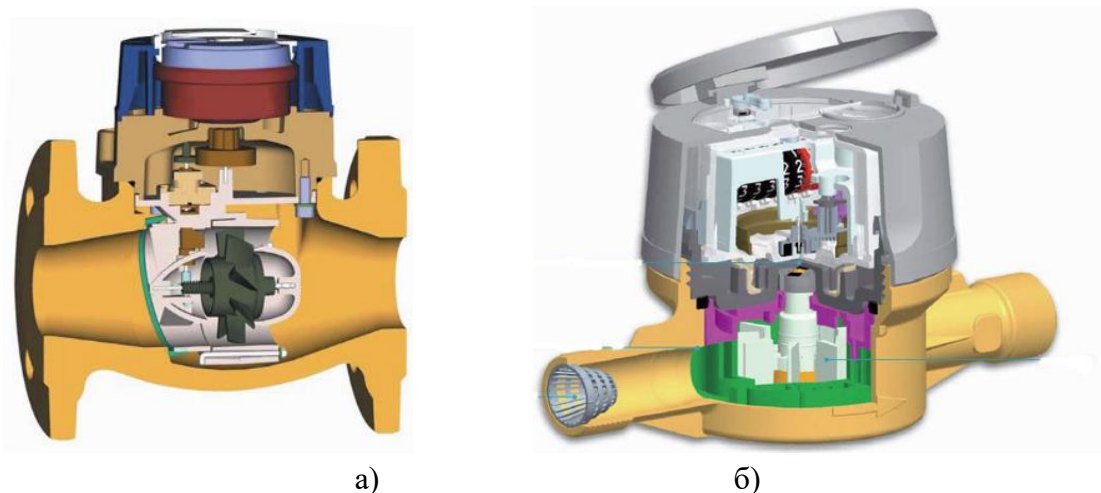
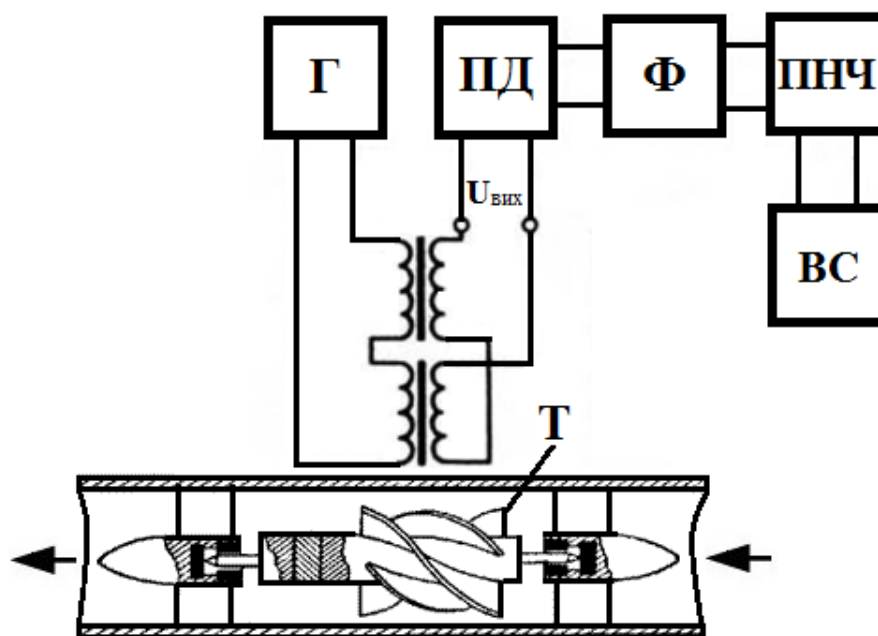


Рисунок 1.46 – Лічильники води: а) з турбінкою; б) з крильчаткою.

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.

Схема турбінного витратоміра з індуктивним перетворювачем показана на Рисунок 1.47.



Т – вертушка (турбінка); Г – генератор; ПД – підсилювач-демодулятор; Ф – фільтр; ПНЧ – підсилювач низької частоти; ВС – вимірювальна схема

Рисунок 1.47 – Схема швидкісного витратоміра з індуктивним перетворювачем

Перетворювач має первинну обмотку, що живиться від генератора Г змінним струмом частотою 6-8 кГц, та дві секції вторинної обмотки, які

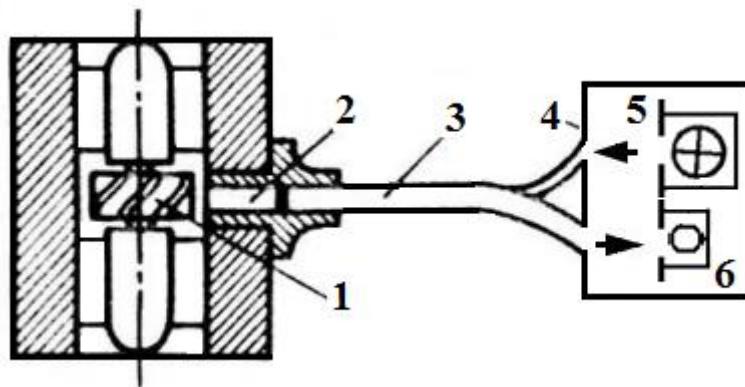
включені зустрічно (для підвищення стійкості до завад і зовнішніх магнітних полів). і двох осердь.

За допомогою рухомого осердя проводиться регулювання взаємних індуктивностей між секціями вторинної та первинної обмоток таким чином, щоб у вихідному ланцюзі перетворювача при відсутності феромагнітної маси у нижнього торця перетворювача залишкова ЕРС мала як можна менше значення. При проході феромагнітної маси (лопаті турбінки з включення-відміткою феромагнітної маси) у нижнього торця перетворювача змінюється взаємна індуктивність між секціями вторинної та первинної обмоток, що призводить до виникнення на виході перетворювача сигналу змінного струму $U_{\text{вих}}$. Таким чином, при обертанні турбінки T на виході котушки створюється напруга $U_{\text{вих}}$, промодульована по амплітуді з частотою f , яка дорівнює числу обертів турбінки за секунду, помноженій на число лопатей турбінки.

Вимірювальний перетворювач, на вхід якого надходить $U_{\text{вих}}$, виділяє частоту модуляції і перетворює її в вихідний струмовий сигнал.

В швидкісних витратомірах для вимірювання витрати газів (іноді і для прозорих рідин при малих розмірах турбінки) застосовують фотоелектричні перетворювачі. Принцип їх дії заснований на появі пульсуючої електричної напруги в колі фотоелемента при обертанні лопатей турбінки між джерелом світла і фотоелементом.

Оптичні тахометричні перетворювачі, такі як фотоелектричні, засновані на періодичному перериванні світлового променя лопатями турбінки 1 (Рисунок 1.48).



1 – турбінка; 2– герметичний пристрій введення; 3 – волоконно-оптична лінія; 4 – приймально-передавальний блок; 5 – джерело інфрачервоного випромінювання; 6 – фотоелемент

Рисунок 1.48 – Схеми фотоелектричного швидкісного витратоміра

Світло поширюється по волоконно-оптичним лініям зв'язку. Світловий потік від джерела інфрачервоного випромінювання 5 (світлодіод АЛ107Б або АЛ119), що розташоване в приймально-передавальному блоці 4, поширюється по волоконно-оптичній лінії 3 і через спеціальний герметичний пристрій введення 2 попадає на лопать турбінки 1. Промінь світла попадає на

турбінку через захисне скло. Світло, що відбилося від лопаті також по волоконної лінії підводиться до світлочутливого фотоелемента 6 блоку 4.

Частота пульсацій напруги в колі фотоелемента пропорційна частоті обертання турбінки. Зазвичай випромінювач і приймальний фотоелемент розміщують по різні боки турбінки та відокремлюють від вимірюваної речовини захисним склом.

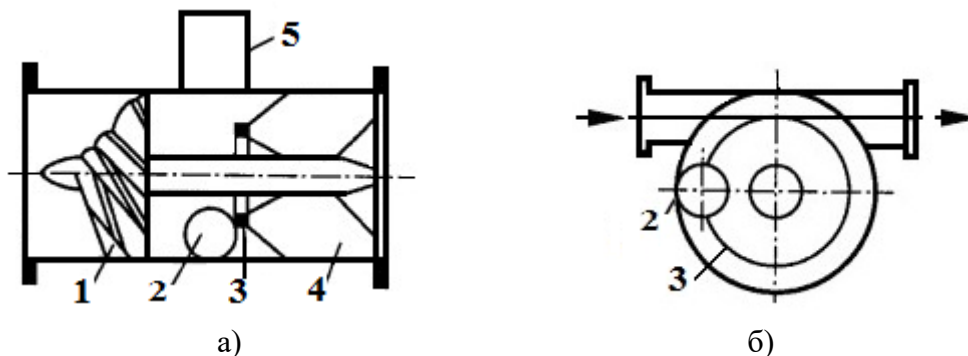
Серійно випускаються швидкісні (турбінні) витратоміри для вимірювання витрати води від 0,07 до 500 м³/год в трубопроводах діаметром від 20 до 150 мм при температурах середовища до 120 ° С і тиску до 1,6 МПа з границями основної відносної похибки $\pm (2 \dots 5)\%$. Витратоміри газу випускаються з верхніми межами від 100 до 1600 м³/год при діаметрах труб 65 ... 200 мм, температурі газу до 50 ° С і тиску до 0,6 МПа. Перевагою турбінних витратомірів є можливість їх використання в широкому інтервалі витрат, діаметрів трубопроводів і параметрів контрольованого середовища. У окремих типів витратомірів при великих швидкостях і діаметрах труб динамічний діапазон виміру досягає 15...20. Такі витратоміри мають малу інерційність.

Однак тахометричні турбінні витратоміри мають і недоліки, що обмежують їх застосування: вплив в'язкості контрольованого середовища, знос опор (не можна, наприклад, вимірювати витрату середовищ, які містять зважені частки, особливо якщо вони мають абразивні властивості).

Кулькові витратоміри

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 Рисунок 1.49.



1 – формувач потоку; 2 – кулька; 3 – обмежувальне кільце; 4 – струменевипрямляч; 5 – тахометричний перетворювач

Рисунок 1.49 – Схеми кулькового перетворювача: а) – для великих витрат; б) – для малих витрат.

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 чого швидкість центру кулі відстає від відповідної окружної швидкості потоку речовини. Цю обставину слід враховувати при розрахунках 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. Рисунок 1.49-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.

У кулькових витратомірах застосовуються тахометричні перетворювачі швидкості, що аналогічні до перетворювачів турбінних витратомірів (а кульки виготовляють з феромагнітного матеріалу і покривають поліпропіленом, поліетиленом або іншим пластиком).

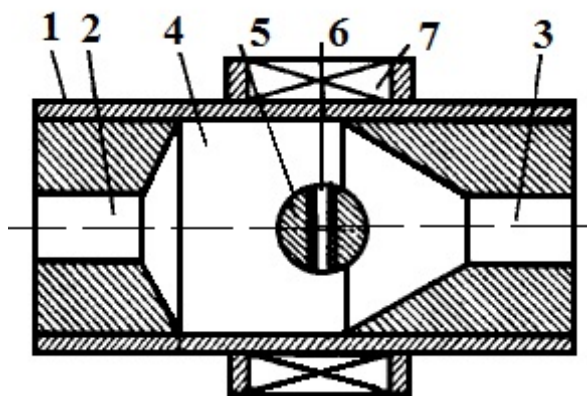
Серед всіх тахометричних перетворювачів витрати кульковий є найбільш простою за своєю будовою. Ці витратоміри з'явилися пізніше турбінних та камерних. Кулькові витратоміри, що випускаються промисловістю, використовуються для вимірювання витрати рідини від 0,025 до 600 м³/год, при температурі до 28 °С і тиску до 10 МПа. Втрата тиску не перевищує 50 кПа. Щільність середовища повинна знаходитися в межах 700-1400 кг/м³ і кінематична в'язкість в межах $(0,3-12) \cdot 10^{-6}$ м²/с. Через відсутність опору рухомого елемента витратоміри можуть використовуватися на рідинах з твердими включеннями обмеженого розміру, а також агресивних.

Роторно-кульові витратоміри

У роторно-кульових витратомірів на відміну від кулькових куля або інше тіло обертання рухається не по колу, а обертається навколо своєї осі під впливом потоку вимірюваної речовини. Ці прилади поки не знайшли широкого застосування. Існує декілька різновидів приладів, що відрізняються один від одного, способом приведення кулі в обертання.

Принципова схема одного роторно-кульового перетворювача для представлена на Рисунок 1.50.

В корпус перетворювача 1 вимірювана рідина поступає через вхідний отвір 2, а видаляється – через вихідний 3. В порожнині корпусу, що має спеціальну геометричну форму, поміщена куля 5, яка буде зважуватись потоком речовини і займати визначене положення, починаючи з якогось значення витрати. Оскільки куля має наскрізний діаметральний отвір, то вона обертається навколо горизонтальної вісі зі швидкістю, що пропорційна об'ємній витраті вимірюваного середовища.



1 – корпус перетворювача; 2 – вхідний отвір; 3 – вихідний отвір; 4 – порожнина корпусу; 5 – куля; 6 – магнітна вставка; 7 – індукційний вузол знімання сигналу

Рисунок 1.50 – Схеми кульового перетворювача.

Для передачі сигналу частоти обертання кулі в неї запресовують магнітну вставку 6, а зовні діамантного корпусу перетворювача розміщують індукційний вузол знімання сигналу. Кулі зазвичай виготовляють з полістиролу. Проведені дослідження таких витратомірів показали, що перетворювач може працювати в будь-якому положенні (вертикальному, горизонтальному, нахиленому). Напрямок потоку можна змінювати. При цьому частота обертання кулі не змінюється. Також виявлена здатність кулі до самоочищення від домішок, що внесені потоком речовини.

У порівнянні ж з турбінними перетворювачами їх перевагами є відсутність опор і можливість вимірювання витрати речовин, що містять механічні домішки.

Камерні витратоміри

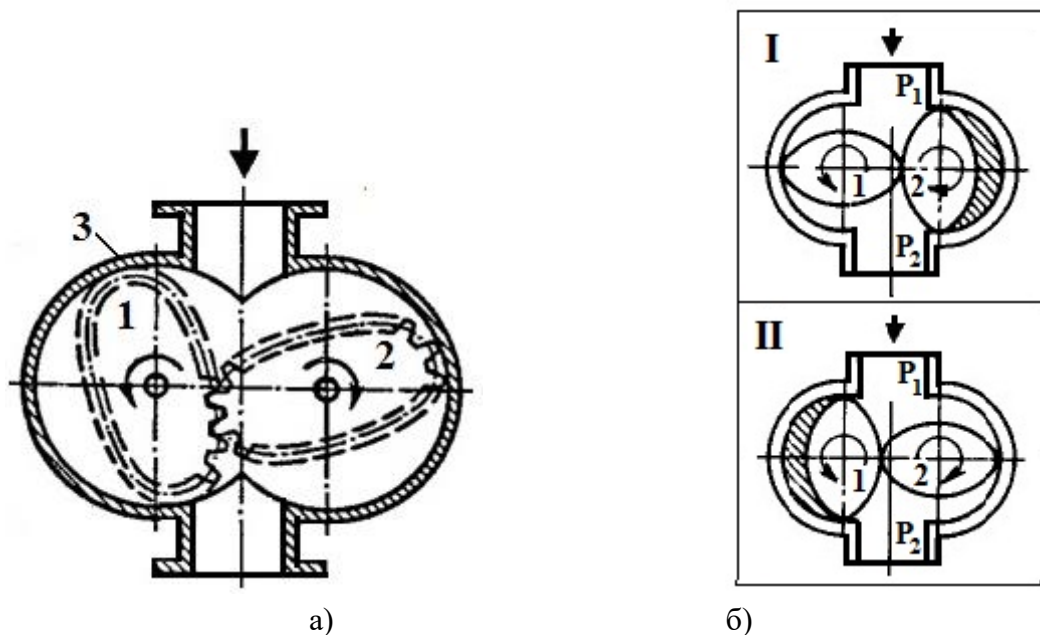
Камерними називаються тахометричні витратоміри і лічильники, що мають один або кілька рухомих елементів, які при русі відмірюють певні об'єми рідини або газу. Зазвичай ці рухливі елементи рухаються безперервно зі швидкістю, пропорційною об'ємній витраті. Ці витратоміри і лічильники також називають об'ємні. 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.

Лічильники з овальними шестірнями

Лічильник з овальними шестірнями (Рисунок 1.51) 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.



1, 2 – овальні шестірні; 3 – корпус

Рисунок 1.51 – 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 (Рисунок 1.51-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 шестірни та стінкою корпусу вимірювальної камери (заштрихована область на рис. 2.7-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 або тахометром, 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 $300 \cdot 10^{-6}$ м²/с, температура – від 40 до 120°C і тиску до 6,4 МПа. Втрата напору при встановленні лічильника складає до 0,02 МПа. Застосовуються при діаметрах труб 15-80 мм. Похибка показань не перевищує 0,5 %. Лічильник з овальними шестірнями широко застосовують при вимірюванні нафтопродуктів. Лічильники з овальними шестірнями випускають двох модифікацій: без обігріву та з паровою сорочкою (для сильно в'язких рідин).

Ротаційні лічильники газу

З лічильників для газу найбільшого поширення набули ротаційні лічильники. Ротаційний (роторний) лічильник – це камерний лічильник для газу. Вони працюють за принципом витіснення чітко визначеного обсягу газу обертливими роторами. Їх робота аналогічна роботі лічильників з овальними шестернями, що використовуються для вимірювання кількості рідин. Тільки в якості перетворювального елемента застосовуються не овальні шестерні, а ротори, що мають восьмиподібну форму (іноді форму порівнюють з лемніскатою або гантеллю).

Ротаційний газовий лічильник (Рисунок 1.52) складається з корпусу, всередині якого обертаються два однакових восьмиподібних ротора, а також передавального й лічильного механізмів, що пов'язані з одним з роторів (на схемі не показані).

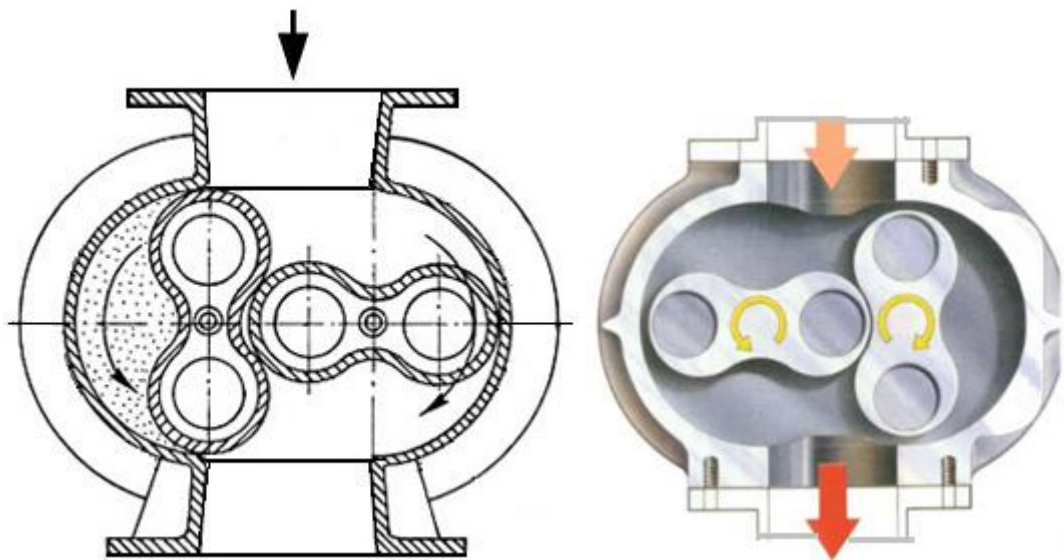


Рисунок 1.52 – Схема ротаційного газового лічильника

Ротори приводяться в обертання під дією різниці тисків газу, що надходить через верхній вхідний патрубок і виходить через нижній вихідний патрубок. Механізм обертання роторів ротаційного газового лічильника аналогічний механізму обертання овальних шестерень для лічильників кількості рідини. При обертанні ротори обкатуються своїми бічними поверхнями. Об'єм газу, що проходить через лічильник, визначається об'ємом вимірювальної камери лічильника, утвореної внутрішньою поверхнею корпусу й поверхнями двох роторів, що синхронно обертаються в протилежних напрямках. Об'єм газу, що витіснений за півоберта одного ротора, дорівнює об'єму, обмеженому внутрішньою поверхнею корпусу і бічною поверхнею ротора, що займає вертикальне положення (цей об'єм позначений на рисунку). За повний оборот роторів витісняються чотири таких об'єми.

При виготовленні ротаційних лічильників особлива увага звертається на легкість ходу роторів і зменшення невраховуваних витоків газу через лічильник. Легкість ходу, що є якісним показником малого тертя в механізмі, а отже, мала втрата тиску в лічильнику, забезпечується установкою валів роторів на кулькові підшипники, зведенням до мінімуму тертя в редукторі й рахунковому механізмі, а також раціональним вибором конструктивних розмірів і частоти обертання роторів. Зменшення витоків газу досягається ретельною обробкою і взаємної підгонкою внутрішньої поверхні корпусу і роторів. Зазор між корпусом і прямокутними майданчиками, розташованими на кінцях найбільших діаметрів роторів, коливається від 0,04 до 0,1 мм в залежності від типу лічильника.

У порівнянні з іншими газовими лічильниками ротаційні мають менші габарити при одних і тих же межах вимірювання.

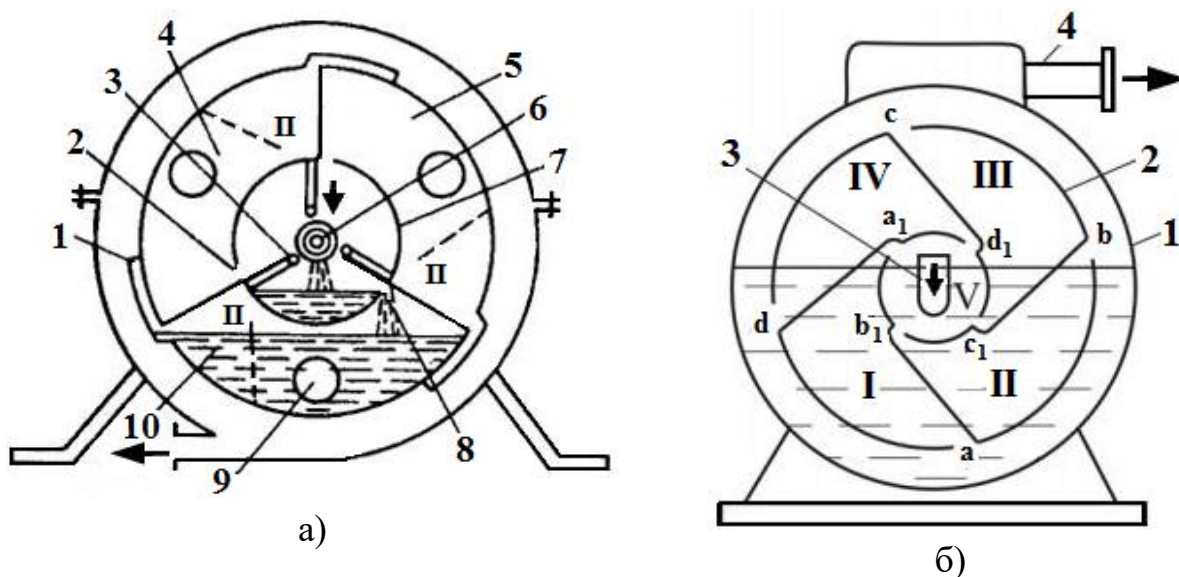
Барабанні лічильники

Барабанні лічильники є найстарішими приладами для вимірювання об'ємної кількості рідини або газу. Принцип роботи їх 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 пройшов через прилад.

Принципові схеми барабанних лічильників для вимірювання кількості рідини та газу (Рисунок 1.53) – це циліндричний горизонтальний резервуар, розділений на три 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.

Лічильники складаються з барабану, що розділений перегородками на декілька рівних за об'ємом камер. 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. Барабанні лічильники в основному використовуються для вимірювання об'ємної кількості рідини або газу.



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

Рисунок 1.53 – Принципові схеми барабанних лічильників для вимірювання кількості рідини (а) та газу (б).

Барабанний рідинний лічильник (Рисунок 1.53-а) – це циліндричний горизонтальний резервуар, розділений на три камери рівного об'єму. Навколо вісі лічильника є кільцева трубка 6 (подача рідини показана на схемі чорною стрілкою), по котрій надходить рідина, що потім витікає у внутрішній циліндр 7. Він має три щілини, котрі сполучають циліндр 7 з вимірювальними камерами 4, 5, 10. З циліндру 7 рідина витікає через нижню щілину 8 у вимірювальну камеру 10. При цьому рівновага лічильника не порушується, бо камера займає симетричне положення відносно

вертикальної вісі. 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° 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 вбудовані в 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. Число обертів барабана, фіксується рахунковим механізмом, і за ним визначають об'єм рідини.

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.

Також їх використовують в лабораторних умовах при точних вимірах.

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

Барабанний рідинний лічильник газу (Рисунок 1.53-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 a_1 , b_1 , c_1 , d_1 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

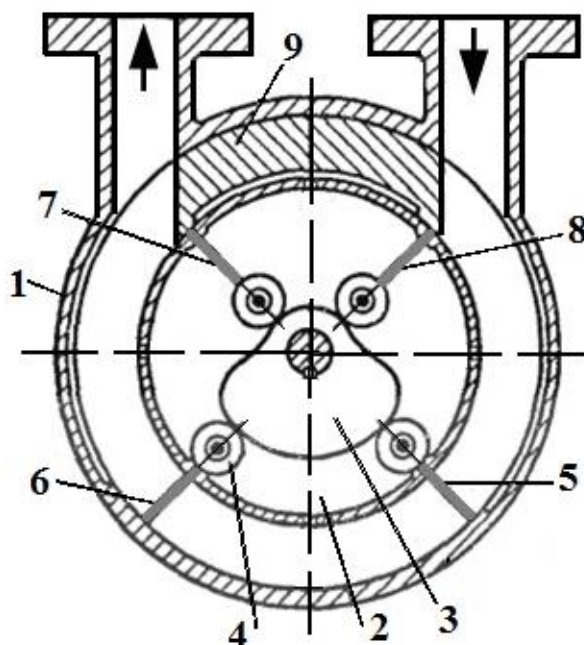
дорівнює сумарному об'єму камер I-IV. Затворною рідиною часто служить вода. При небезпеці замерзання її замінюють на гліцерин чи водний розчин хлориду магнію.

Барабанні лічильники газу є дуже точними приладами, їх похибка не перевищує 0,2 %. Однак вони рідко випускаються продуктивністю понад 3 м³/год. Барабанні лічильники використовують для вимірювання кількості газогенераторного, 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 (Рисунок 1.54) складається з циліндричної камери 1 (корпус) у середині якої обертається циліндр 2, і чотирьох лопатей 5, 6, 7, 8, що переміщаються в радіальних прорізах останнього.



1 – корпус; 2 – циліндр; 3 – кулачок; 4 – ролик; 5, 6, 7, 8 – лопаті; 9 – вставка

Рисунок 1.54 – Схема лопатевого лічильника

Вимірювана рідина рухається в просторі, що обмежений циліндричними поверхнями корпусу 1 й циліндра 2. 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 Рисунок 1.54 – 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.

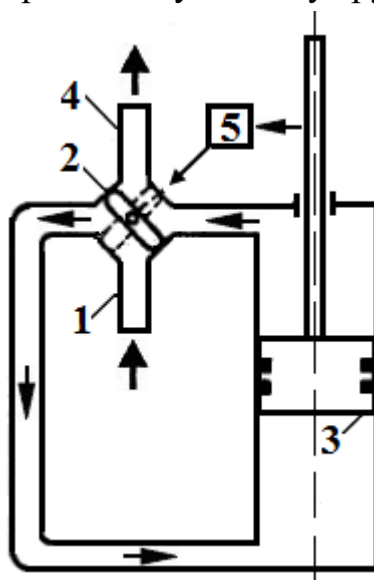
Таким чином, за повний оборот циліндра через лічильник проходить кількість рідини, що дорівнює об'єму вимірювальної камери (різниці об'ємів циліндричного корпусу й циліндра). Число обертів циліндра, фіксується рахунковим механізмом, і за ним визначають об'єм рідини.

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

Вони 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 Рисунок 1.55 показана схема поршневого лічильника з одним поршнем. Поршневі лічильники, що представляють собою циліндр, усередині якого під дією рідини, що протікає, переміщається поршень. Рідина надходить, а лічильник по трубі 1 і через золотниковий пристрій (іноді чотирьохходовий кран) 2 поступає під поршень 3. Під тиском рідини поршень переміщується вгору. Золотниковий пристрій 2 в робочому стані займає два сталіх 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.



1 – вхідна труба; 2 – золотниковий пристрій; 3 – поршень; 4 – вихідна труба; 5 – механізм

Рисунок 1.55 – Схема поршневого лічильника

Коли поршень досягне верхнього граничного положення, то за допомогою механізму 5, виконується перемикання золотникового пристрою (або

переміщення чотирьохходового крану) так, що і з вхідною трубою буде вже сполучатися верхня частина циліндру, а нижня – з вихідною трубою. Під тиском рідини поршень почне переміщуватись вниз. При досягненні поршнем граничного положення цикл повторюється. Таким чином, під дією напору поршень переміщується то вгору, то вниз і витісняє рідину на вихід кожен раз визначений об'єм рідини. Кількість переміщень поршня фіксується лічильником. Кількість рідини, що пройшла через поршневий лічильник визначається за кількістю ходів поршня.

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

Застосовуються тільки для рідини. Перекидні лічильники (лічильники з хитними судинами) складаються з двох камер (або ковшів), перекидання яких відбувається після заповнення однієї з камер певним об'ємом (Рисунок 1.56-а) або певної масою рідини (рис. Рисунок 1.56-б) в разі вантажного врівноваження.

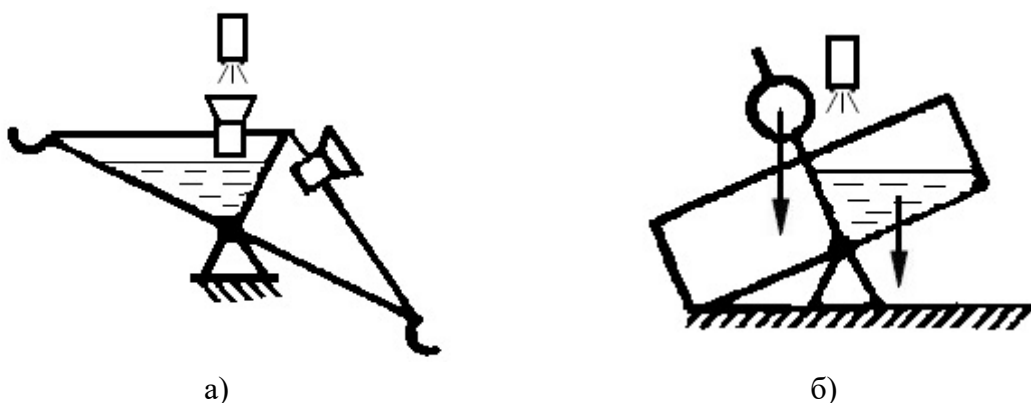
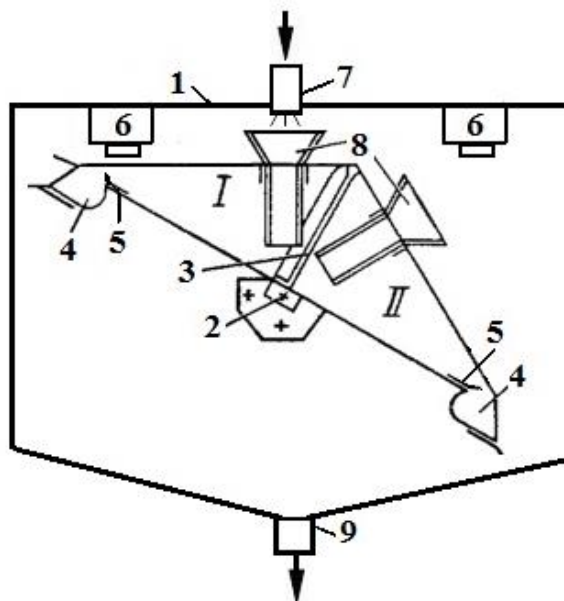


Рисунок 1.56 – Схема перекидних лічильників: а – перекидання відбувається за об'ємом; б – перекидання відбувається за масою.

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.

Схема перекидного лічильника з хитними судинами показана на Рисунок 1.57.



1 – корпус; 2 – опора; 3 – загальне ребро; 4 – жолоб; 5 – поріг; 6 – демпферні упори; 7 – вхідна труба; 8 – воронка; 9 – вихідна труба

Рисунок 1.57 – Схема перекидного лічильника

В корпусі 1 прилад має дві вимірювальні посудини I і II у виді призматичних ковшів трикутного перерізу з одним загальним ребром 3. Судини спираються на опору 2 і мають загальну вісь, щодо якої відбувається їх хитання. Кожна вимірювальна посудина забезпечена воронкою 8 для прийому рідини (горловина, що розширюється, оберігає рідину від розбризкування). Вимірювальні судини мають додаткові жолоби 4, що прикріплені до зовнішнього краю вимірювальних посудини. При заповненні однієї з посудин рідиною, що надходить в лічильник по трубі 7 до переливу рідини через поріг 5 в жолоб 4 центр ваги системи зміщується й вимірювальні посудини перекидаються. Рідина з заповненої посудини виливається, а та посудина, що випорожнилась, починає заповнюватись рідиною.

Таким чином, при роботі лічильника вимірювальні посудини поперемінно то наповнюються, то випорожнюються. При цьому вісь повертається і приводить в дію лічильний механізм. Кут качання посудин обмежений демпферними упорами 6.

Перекидні лічильники переважно застосовують при вимірюванні кількості мазуту. Їх також застосовують в будівельній і горнозбагачувальній промисловості для вимірювання кількості брудних рідин, суспензій, що мають значні тверді включення при невеликих витратах $0,18-6 \text{ м}^3/\text{год}$. Об'єм камер таких лічильників становить від 0,5 до 50л. Похибка показань в таких межах не перевищує 1 %.

1.3.2 Силові 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).

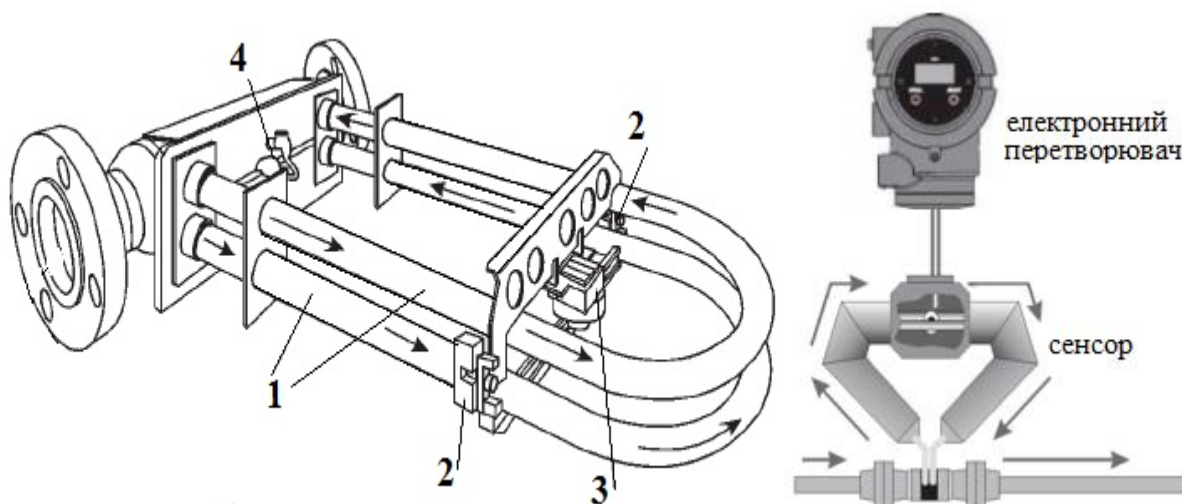
Прискорення потоку виникає в процесі зміни його первісного руху. Залежно від характеру цієї зміни й отриманого при цьому прискорення силові витратоміри поділяються на: 1) коріолісові; 2) гіроскопічні; 3) турбосилові.

Коріолісові витратоміри

Найбільшого поширення серед силових витратомірів набули коріолісові витратоміри. Перший витратомір, робота базується на основі сил Коріоліса був представлений компанією Micro Motion 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 ω , та направлена під прямим кутом до напрямку руху. Прискорення Коріоліса (прискорення обертання) – це частина повного прискорення тіла, яке з'являється при його русі в обертальній системі відліку. Дія сили Коріоліса проявляється в коливальних системах, коли рідина або газ переміщаються в напрямку вісі коливань (або в протилежному напрямку). При цьому 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 : $a=F/m$ (вираз справедливий для будь-яких сил будь-якої природи).

Коріолісовими називаються витратоміри, в перетворювачах яких під силовим впливом виникає коріолісове прискорення, яке пропорційне безпосередньо масовій витраті.

Витратомір коріоліса (Рисунок 1.58) складається з датчика 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 датчика 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.



1 – вимірювальні трубки; 2 – детектор швидкості; 3 – задавальна котушка;
4 – термоперетворювач

Рисунок 1.58 – Схема витратоміра Коріоліса.

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.

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 (Рисунок 1.59-а). Коливання трубок подібне коливанням камертону. Амплітуда коливань становить менше 1 мм, а частота – близько 100 Гц.

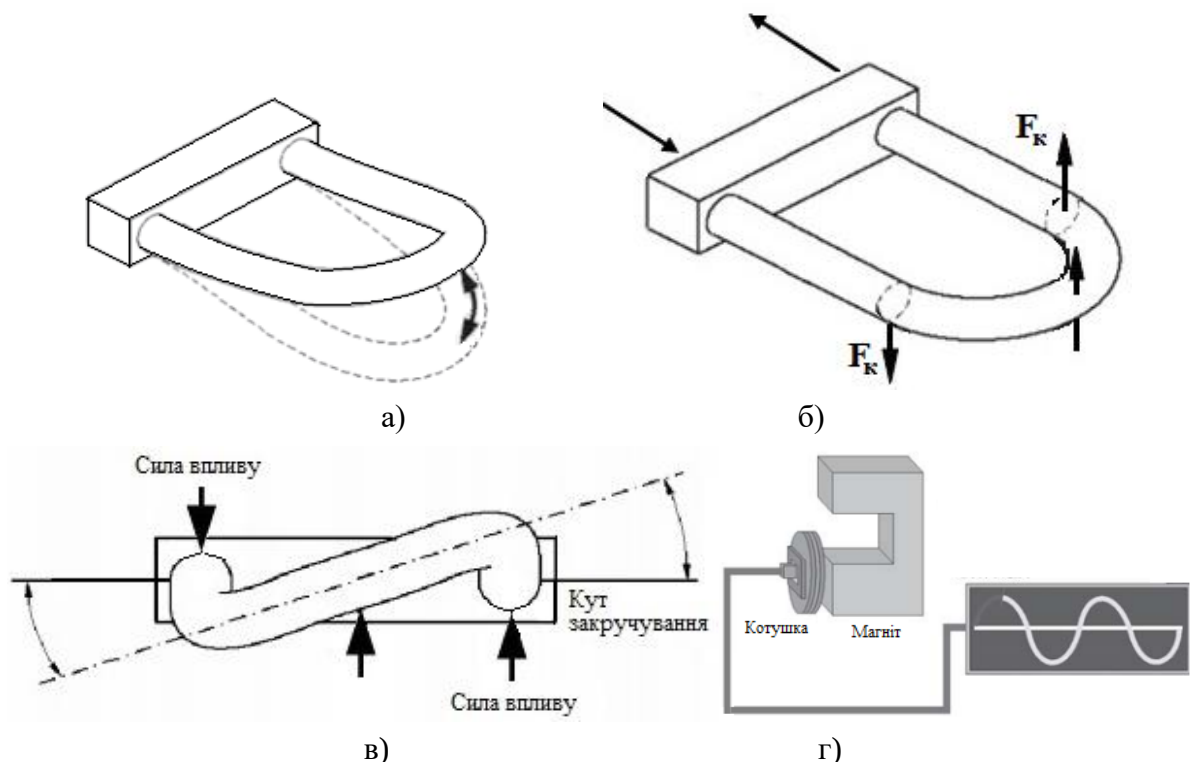


Рисунок 1.59 – Схема динамічних процесів у витратомірі Коріоліса: а – коливання трубки; б – напрямки дії сил на трубку при її русі вгору; в – закручування трубки сенсора під впливом сил; г – детектор.

На сенсорних трубках встановлені детектори 2 (лівий та правий), що складаються з магнітів і котушок-соленоїдів (Рисунок 1.59-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 (Рисунок 1.59-г). Порівняння цих сигналів показує рух однієї трубки відносно другої.

Під час проходження рідини через сенсорну трубку зі швидкістю V та масовою витратою Q_m , 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 при одночасному синусоїдальному коливанні площини трубки. Це приводить до виникнення коріолісового прискорення, яке свою чергу, приводить до появи сили Коріоліса F_k (Рисунок 1.59-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 вгору під час першої половини циклу коливання (рис. Рисунок 1.59-б) рідина, що втікає в трубку (перша половина трубки) створює опір руху трубки вгору даючи на трубку вниз (перешкоджає переміщенню трубки).

Поглинувши цей вертикальний імпульс при русі навколо вигину трубки, рідина при зворотному русі назад до трубопроводу, що витікає з трубки, вже опирається зменшенню вертикальної складової руху, штовхає трубку вгору (прискорює переміщення трубки).

Це призводить до деякої деформації (вигину) сенсорної трубки – її закручуванню (Рисунок 1.59-в). Коли в другій фазі вібраційного циклу трубка рухається вниз (друга фаза вібраційного циклу), 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 коливання. Згідно з другим законом Ньютона, кут закручування трубки (під дією сил) буде пропорційним кількості рідини, що проходить через трубку (Рисунок 1.59-в) за одиницю часу, тобто масовій витраті Q_m 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 (Рисунок 1.60-а). Коли потоку вимірюваної рідини у трубках немає, вони не вигинаються. При наявності витрати синусоїдальні сигнали, що надходять з детекторів, не співпадають за фазою (Рисунок 1.60-б), оскільки сигнал від вхідного боку трубок запізнюється відносно сигналу з вихідного боку (рахунок вигину сенсорних трубок). Різниця в часі між сигналами (ΔT) вимірюється в мікросекундах і прямо пропорційна масовій витраті. Чим більше масова витрата, тим більше ΔT .

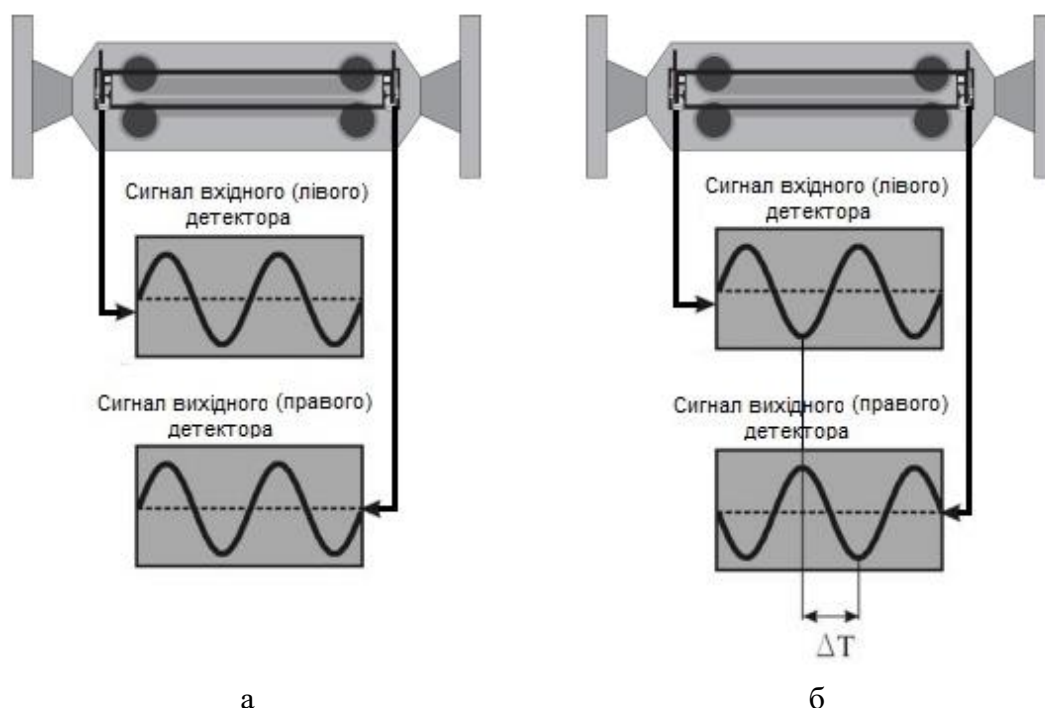


Рисунок 1.60 – Сигнали, що надходять з детектора: а – при відсутності витрати; б – при наявності витрати.

Частота коливань сенсорних трубок залежить від їх геометрії, матеріалу, конструкції і маси. Маса вимірювального елементу 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. Так як густина рідини залежить від її температури, то така зміна, яка спричинена коливаннями температури рідини, що проходить через витратомір, враховується за допомогою додаткового температурного сенсора 4 (наприклад, платинового термометра опору), який розміщується в сенсорі витратоміра.

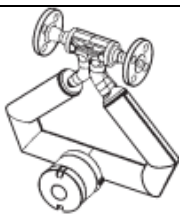
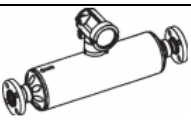
Сигнали від обох сенсорів, які пропорційні витратам, виміряне значення температури та частота збудження власних механічних коливань сенсорних трубок подаються на електронний перетворювач (мікропроцесорний перетворювач сигналів), де формуються стандартні вихідні сигнали витрати, температури та густини продукту.

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

Серійний ряд первинних перетворювачів (сенсорів витрати) і електронних перетворювачів своїми функціональними можливостями відповідають самим різним вимогам. Наприклад, сенсори компанії Micro Motion знайшли широке

використання завдяки своїм функціональним можливостям. Деякі моделі сенсорів наведені в таблиці 1.1 [13].

Таблиця 1.1. Сенсори витрати (короткі технічні характеристики моделей)

<i>Зображення</i>	<i>Коротка характеристика</i>
	Серія ELITE. Висока точність. Широкий діапазон вимірювань. Висока точність вимірювання густини. Нечутливість до змін тиску, температури, вібрації. Умовний прохід трубопроводу при фланцевому з'єднанні від 15 до 300 мм.
	Серія F. Універсальні сенсори широкого застосування. Умовний прохід трубопроводу при фланцевому з'єднанні від 15 до 100 мм. Серія R. Універсальні сенсори широкого застосування. Умовний прохід трубопроводу при фланцевому з'єднанні від 15 до 50 мм.
	Серія H. Сенсори для харчової, фармацевтичної та хімічної галузей, де дотримані санітарно-епідеміологічні норми. Гігієнічного Обладнання) для санітарних застосувань. Високоякісна обробка поверхонь трубок, що стикаються з вимірюваним середовищем. Фітингове приєднання до трубопроводу.
	Серія CNG (Compressed Natural Gas). Спеціально розроблений для вимірювання стисненого природного газу. Для використання на автомобільних і стаціонарних заправних станціях малої й великої потужності, пересувних цистернах.
	Серія T. Конструкція з прямолінійною трубкою. Атестовані для санітарних застосувань. Високоякісна обробка поверхонь трубок. Умовний прохід трубопроводу при фланцевому з'єднанні від 15 до 50 мм.

Більшість витратомірів Коріоліса забезпечені вигнутими сенсорними трубками різної конструкції. Однак 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 0,5-1,5. Наприклад, коріолісів витратомір із сенсорами компанії Micro Motion дозволяє вимірювати витрати від 55 до 680400 кг/год з похибкою 0,15 %.

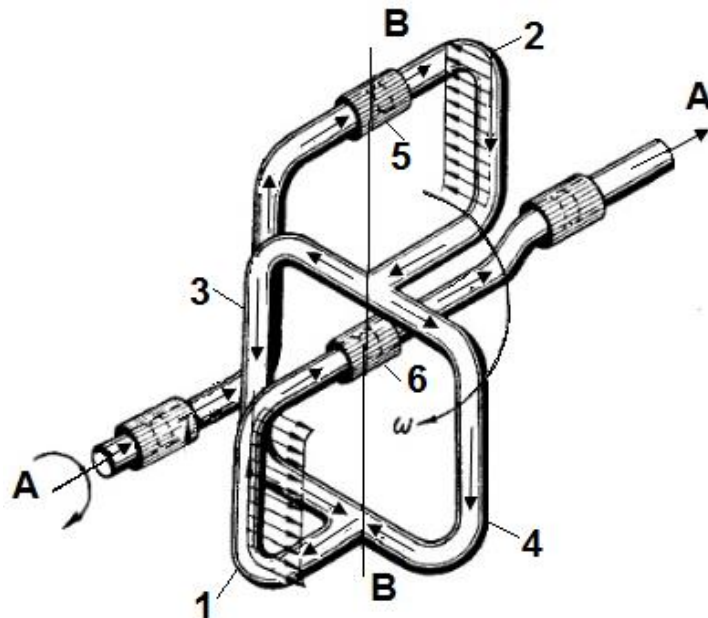
Основні переваги коріолісових витратомірів: висока точність вимірювання параметрів упродовж тривалого часу; можливість роботи незалежно від напрямку потоку; відсутність необхідності прямолінійних ділянок трубопроводу до і після витратоміра; надійна робота в умовах вібрації трубопроводу, змінюваності 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.

Гіроскопічні витратоміри

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.

У витратомірі рух рідини по петлі навколо вісі з кутовою швидкістю відповідає обертанню диску гіроскопа навколо тієї ж вісі. Тому при обертанні цієї петлі навколо вісі утворюються сили, що створюють момент, який намагається повернути цю петлю.

На Рисунок 1.61 показана схема гіроскопічного витратоміра, в якому вимірюваний потік речовини протікає по ділянці трубопроводу складної форми. Ця ділянка трубопроводу приводиться в обертання навколо осі А-А з постійною кутовою швидкістю ω .



1, 2, 3, 4 – трубки; 5, 6 – гнучкі з'єднання

Рисунок 1.61 – Схема гіроскопічного витратоміра

При русі рідини в трубках 1 та 2 виникає прискорення Коріоліса та утворюється зусилля Коріоліса, що створює момент, який намагається повернути ці трубки навколо вісі В-В. Замкнутий патрубок, у який входять трубки 3 та 4 служить для компенсації відцентрових зусиль. Завдяки гнучким

з'єднанням 5 та 6 система трубок 1, 2, 3 та 4, може повертатися навколо вісі В-В під впливом гіроскопічного моменту, що створюється силами Коріоліса.

З урахуванням того, що гіроскопічний момент виникає в результаті надання рідині прискорення Коріоліса, то можна розглядати гіроскопічні витратоміри як окремий випадок коріолісових витратомірів. Вимірюють цей момент по куту повороту петлі навколо вісі В-В (наприклад, по напрузі в торсіонному або іншому пружному елементі).

Для даних витратомірів характерний великий діапазон виміру, що є їх основною перевагою. Їх недоліком є наявність обертових з'єднань, ущільнювання та неперервне обертання рухомого елемента. Гіроскопічні витратоміри з неперервним обертанням рухомого елемента не мають широкого застосування. Більше використання знайшли вібраційні гіроскопічні витратоміри, в яких рухома система постійного обертання, замінена коливальною системою.

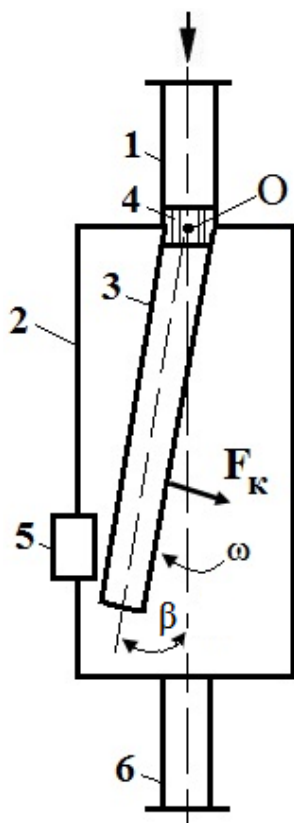
Вібраційні гіроскопічні витратоміри

Вібраційними називаються гіроскопічні витратоміри, в яких рухомий елемент перетворювача витрати не обертається, а лише робить безперервні коливання з постійною або періодично загасаючою амплітудою під впливом зовнішнього силового впливу.

У всіх вібраційних перетворювачах витрати в рухомому елементі виникає коріолісове прискорення та відповідні сили, які створюють момент, що пропорційний масовій витраті Q_m , і діє назустріч обертального моменту.

Схема перетворювача вібраційного витратоміра показана на Рисунок 1.62.

Вимірювальна речовина надходить по вертикальній входній трубі 1, що закріплена в корпусі 2. Труба 3 пов'язана гнучким з'єднанням 4 з трубою 1. Це дозволяє їй здійснювати коливальний рух, який викликається електромагнітною котушкою збудження 5 навколо точки О. Потік витікає через нижній кінець труби 3 і виходить з перетворювача по трубі 6. Абсолютний рух потоку в трубі 3 утворюється в результаті його відносного руху вздовж осі труби і переносного руху, що викликається коливаннями труби. При цьому в потоці виникає коріолісове прискорення й відповідні Коріолісові сили (їх рівнодіюча F_k показана на рисунку), що створюють момент M_k , спрямований протилежно обертального моменту.



1 – вхідна труба; 2 – корпус; 3 – труба;
4 – гнучке з'єднання; 5 – котушка
збудження; 6 – вихідна труба

Рисунок 1.62 – Схема вібраційного
гіроскопічного витратоміра.

можна визначити по куту повороту рухомої труби β і амплітуді її коливань (зменшуються зі зростанням масової витрати Q_m). А якщо амплітуду коливань підтримувати постійною, шляхом збільшення моменту M_v , то витрату Q_m можна визначити по значенню M_v або по силі струму в котушці збудження.

Рівняння руху трубки, яка коливається зі кутовою швидкістю ω , має вигляд:

$$J\omega + M_k + M_c + M_y = M_v,$$

де J – момент інерції трубки, заповненої вимірюваною речовиною;

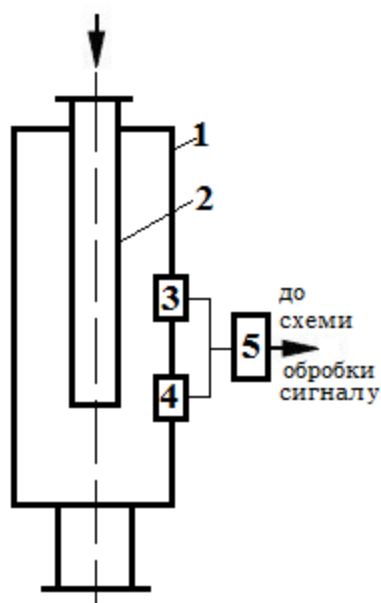
M_k – момент, створюваний коріолісовими силами;

M_c – момент опору обертанню при нерухомій рідині в трубці, обумовлений її в'язкістю;

M_y – момент опору, зумовлений пружними силами трубки;

M_v – крутний момент (пропорційний силі струму в котушці збудження).

Момент M_k , що створюється коріолісовими силами пропорційний масовій витраті. Якщо момент M_v та сила струму в котушці збудження постійні, то масову витрату Q_m



1 – корпус; 2 – труба; 3 – котушка; 4 – котушка збудження; 5 – підсилювач

Рисунок 1.63 – Схема вібраційного гіроскопічного витратоміра.

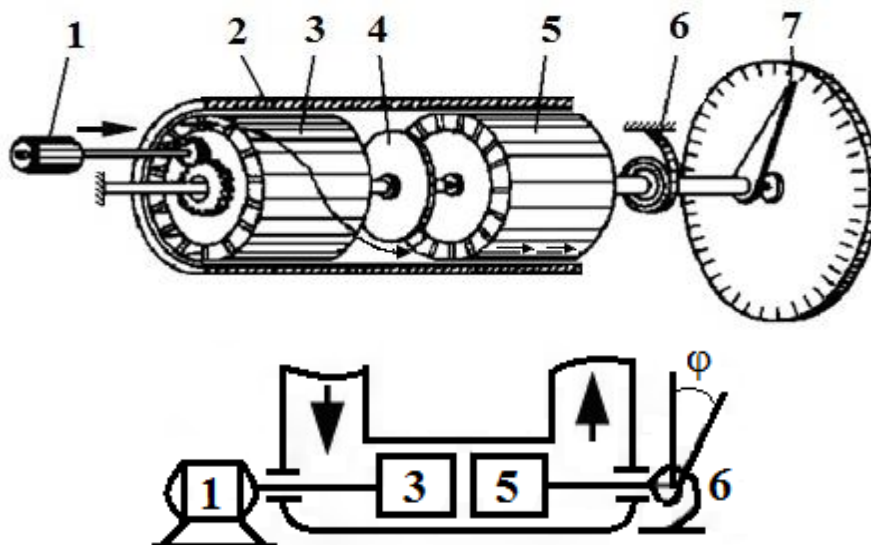
На Рисунок 1.63 показана схема вібраційного гіроскопічного витратоміра з однією трубкою.

Електромагнітна котушка збудження 4 заставляє неперервно коливатись трубку 2. Коливання трубки знімаються за допомогою котушки 3. Обидві котушки зв'язані між собою через підсилювач 5. При зміні масової витрати Q_m зростає момент опору, за рахунок сил Коріоліса, що приводить до зменшення амплітуди коливань трубки, за якою електронна схема обробки формує корисний сигнал.

Турбосилові витратоміри

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

На Рисунок 1.64 показана принципова схема турбосилового витратоміра при зовнішньому силовому впливі, що надається ззовні.



1 – електродвигун; 2 – трубопровід; 3, 5 – ротор; 4 – диск; 6 – пружина;
7 – відліковий пристрій

Рисунок 1.64 – Принципова схема турбосилового витратоміра (силовий вплив надається зовні).

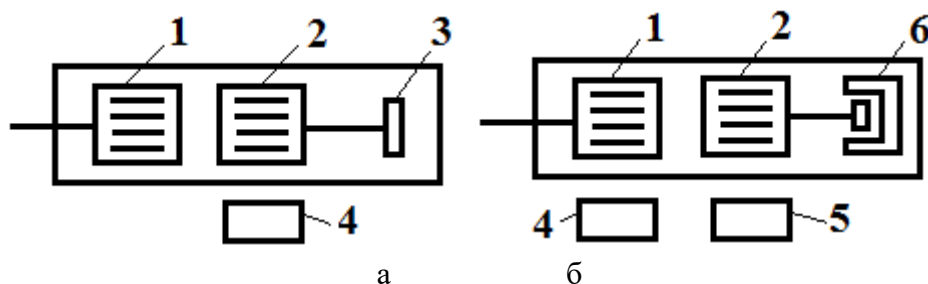
Герметизований електродвигун 1 поміщено всередині вхідного патрубку в обтікаємому кожусі. Всередині трубопроводу 2 встановлений ротор 3 з малим радіальним зазором, що має канали для проходу рідини, розділені перегородками, паралельними його осі, або ж виконаний у вигляді прямолопастної крильчатки. Ротор (через зубчасту передачу) обертається від

електродвигуна 1 з кутовою ω швидкістю і закручує рідину, яка набуває гвинтовий рух (показаний стрілками на рисунку). Далі рідина надходить на ротор 5, що закріплений на пружині 6, і закручує її на кут φ , який пропорційний масовій витраті Q_m , значення якої показує відліковий пристрій 7. Нерухомий диск 4 зменшує в'язкісний зв'язок між роторами.

При збільшенні зовнішнього радіуса роторів (а відповідно і його каналів) або лопатей крильчатки – чутливість витратомірів збільшується. Довжину лопатей обирають з умови забезпечення повного закручування потоку, що проходить через ротор, при найбільшій вимірюваній витраті.

Намагання позбавитися від пружини в конструкції витратоміра привело до розробки конструкцій, де вона не передбачена.

На відміну від попередньої схеми, де постійно обертається один ротор, схеми (Рисунок 1.65) відносяться до схем, де неперервно обертаються два ротора.



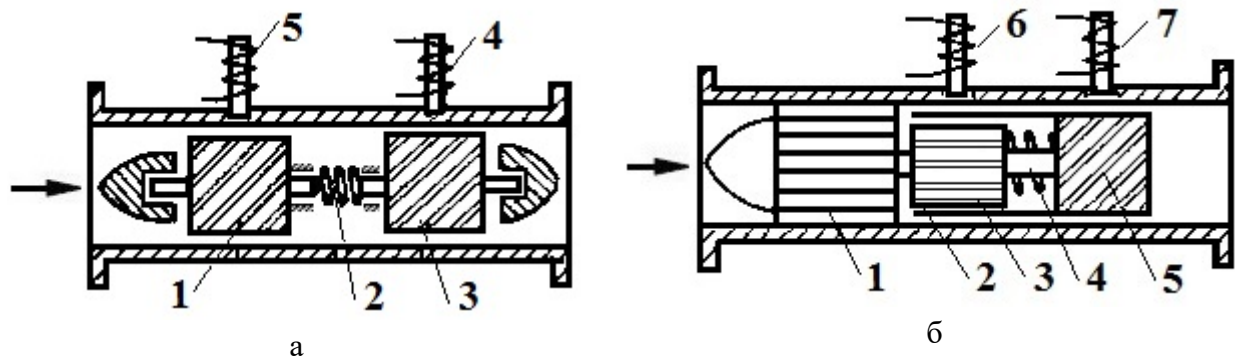
1, 2 – ротор; 3 – тормозний диск; 4, 5 – тахометричні перетворювачі; 6 – гістерезисна муфта

Рисунок 1.65 – Принципові схеми турбосилових витратомірів з роторами, що неперервно обертаються

На наведених схемах до ротора 3, який веде ротор 2, прикладені моменти M_p , що створюються тормозним диском 3 (Рисунок 1.65-а), що взаємодіє з постійними магнітами, або гістерезисною муфтою 6, яка створює постійний тормозний момент (Рисунок 1.65-б). В обох випадках швидкість обертання ротора 2 буде меншою за швидкість обертання ротора 1, і до ротору 2 зі сторони рідини буде прикладений момент M . У схемі, наведеній на Рисунок 1.65-а з використанням тормозного диска, за результатами вимірювання частоти обертання ротора 2 тахометричним перетворювачем 4, можна судити про витрату вимірюваного середовища. У випадку застосування гістерезисної муфти (Рисунок 1.65-б) можливо декілька вимірювальних схем. В одному з випадків можна обмежитися визначенням витрати вимірюваного середовища за результатами вимірювання частоти обертання ротора 2 тахометричним перетворювачем 5. Шкала такого приладу буде нелінійною і на його будуть накладатися певні умови. Більш доцільною буде схема, у якій вимірюється різниця частот обертання роторів 1 та 2 за допомогою тахометричних перетворювачів 4 та 5. За цією різницею частот і визначають витрату вимірюваного середовища.

Роботу турбосилових витратомірів можна організувати і без застосування електродвигуна. При цьому закручування потоку створюється спеціальними пристроями або іншим шляхом.

На Рисунок 1.66 показані принципові схеми турбосилового витратоміра, що мають дві (іноді три) крильчатки, що зв'язані пружиною.



1, 3 – крильчатки; 2 – пружина;
4, 5 – тахометричні перетворювачі

1 – струменевипрямлювач; 2 – втулка;
3, 5 – крильчатки; 4 – пружина; 6, 7 –
тахометричні перетворювачі

Рисунок 1.66 – Принципові схеми турбосилових витратомірів з рухомими крильчатками: а) з нахиленими лопатями рухомих крильчаток; б) з прямими лопатями та нахиленими лопатями рухомих крильчаток.

Якщо одну з крильчаток зробити з нахиленими або гвинтовими лопатями, то вона почне обертатись за рахунок внутрішньої енергії потоку (як і ротор, який ведуть). Відсутність електродвигуна спрощує конструкцію перетворювача й підвищує надійність його роботи.

Обидві крильчатки обертаються з однаковою частотою ω , а кут зсуву φ , що утворюється між ними буде дорівнювати куту закручування пружини. Момент, що закручує пружину буде пропорційний витраті. Зі зростанням масової витрати Q_m буде зростати й кут φ .

Перетворювач (Рисунок 1.66-а) складається з двох крильчаток 1 та 3, що зв'язані між собою пружиною 2. Кути нахилу лопатей крильчаток різні. При переміщенні потоку це викликає закручування пружини 2 кут φ , який пропорційний масовій витраті Q_m . Напрямок закручування залежить від того, яка з крильчаток 1 та 3 має більший кут нахилу лопатей. Кут φ вимірюється за допомогою тахометричних перетворювачів 4 та 5 за часом зсуву.

В перетворювачі, наведеному на Рисунок 1.66-б, передбачено струменевипрямлювач 1, після проходження якого, потік потрапляє на крильчатку 3 з прямими лопатями, а потім на крильчатку 5 з нахиленими лопатями, яка й буде ведучою. Крильчатки зв'язані між собою пружиною 2 обертаються з однаковою частотою ω . Для зменшення впливу в'язкості на точність вимірювань витрати на крильчатці 5 укріплена втулка 2, всередині якої обертається крильчатка 3 при дуже малому радіальному зазорі. Це

зменшує момент в'язкого тертя, яке викликає додаткове закручування пружини 4.

Різниця частот обертання крильчаток 3 та 5 вимірюється за допомогою тахометричних перетворювачів 6 та 7. За цією різницею частот визначають витрату вимірюваного середовища.

Існують й інші різновиди турбосилових витратомірів з приводом рухомих елементів від потоку.

Турбосилові витратоміри застосовуються частіше, ніж коріолісові та гіроскопічні, особливо для більш значних витрат. Максимальні вимірювані витрати для рідин від 6 до 300 т / год при діаметрах труб від 50 до 200 мм. Прилади більш компактні у порівнянні з коріолісовими та гіроскопічними. Їх похибка складає десь $(0,5 \div 2)\%$.

Порівняння різних типів силових витратомірів

До переваг силових витратомірів можна віднести: придатність для вимірювання пульсуючого потоку; порівняно малу залежність вимірювання від профілю швидкостей; відносно м'які вимоги в більшості випадків до прямих ділянок трубопроводу перед перетворювачем витрати.

Для вимірювання витрати однофазних речовин (рідини або газу) у більшості випадків найбільш доцільні турбосилові витратоміри (особливо при вимірюванні великих витрат). Гіроскопічні витратоміри придатні лише для вимірювання малих витрат у трубах, що мають діаметр менше 50 мм. Витратомір Коріоліса займають проміжне положення.

Перетворювачі турбосилових і коріолісових витратомірів, що не мають електроприводу, більш прості, компактні й надійні в роботі. Але кутова швидкість обертання їх залежить від витрати, вимірювальна схема складніше. Перетворювачі з зовнішнім електроприводом складні й нераціональні. Електропривод краще мати всередині перетворювача, коли їх ротори поєднані один з одним, а статор відділений діамагнітної втулкою. Відносно прості витратоміри з електроприводом, у яких витрата визначається вимірюванням потужності, що живить електродвигун. Але вони мають шкалу з пригніченим нулем (потужність при нульовій витраті), а пропорційність між потужністю (або силою струму живлення) і витратою зберігається лише в певних межах.

При зміні в'язкості вимірюваного речовини в широких межах, треба застосовувати турбосилові витратоміри з двома роторами або витратоміри Коріоліса з компенсацією в'язкості. При цьому ротори й зазори у них повинні бути абсолютно однакові, а також однаковими повинні бути й характеристики електродвигунів, що обертають ротори.

Доцільно застосовувати силові витратоміри для вимірювання витрати двофазних середовищ, зокрема нафтогазових потоків. Але при цьому виникає небезпека розшарування фаз при обертанні рухомого елемента перетворювача витрати, особливо в турбосилових витратомірах. У меншій мірі це явище спостерігається в коріолісових витратомірах, а також у

вібраційних гіроскопічних витратомірах з вібруючою трубою при невеликій частоті її вібрації, тому вони знайшли застосування для вимірювання витрати нафтогазових потоків.

Приклади промислового виконання коріолісових витратомірів



Витратомір Коріоліса YOKOGAWA RotaMass



Витратоміри Коріоліса Rosemount Micro Motion



Витратомір Коріоліса KROHNE OPTIMASS



Витратомір Коріоліса Endress + Hauser Promass



Масові (коріолісову) витратоміри ЭМИС-МАСС 260



Масові коріолісові витратоміри TME / UMC-4 (Heinrichs) Germany

1.4 Прилади, засновані на різних фізичних явищах

1.4.1 Теплові витратоміри

Принцип 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 по:

1. Способу 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.

2. Розташуванню нагрівача (зовні або всередині трубопроводу).

3. Характером функціональної залежності між витратою і вимірюваним сигналом.

За характером теплової взаємодії з потоком теплові витратоміри поділяються на:

- a. Калориметричні (при електричному омичному нагріванні нагрівач розташований усередині труби).
- b. Термоконвективні (нагрівач розташований зовні труби). Іноді їх називають квазікалориметричними.

Часто приладам груп а та б дають загальну назву калориметричні.

c. Термоанемометричні.

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 Рисунок 1.67 показана схема термоанемометру.

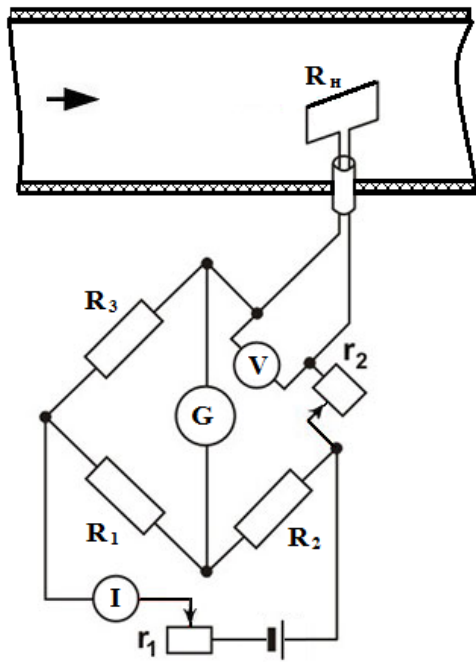


Рисунок 1.67 – Схема термоанемометру.

Основною частиною термоанемометра є вимірювальний міст в одне плече якого включений чутливий елемент (розігрітий терморезистор R_n) 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.

Оптимальні розміри чутливого елемента вибираються з наступних суперечливих міркувань. При зменшенні діаметра дроту нитки зменшується його механічна міцність і збільшується швидкість старіння. При збільшенні діаметра нитки збільшується інерційність приймача та потрібний більший струм для цього нагрівання. Температура термонитки чутливого елемента повинна бути по можливості високою; так як при цьому підвищується чутливість приладу і зменшується вплив коливань температури потоку. Однак значне підвищення температури дроту може викликати зміну його структури. Тому температура нагріву нитки зазвичай лежить в інтервалі 400-500 °С.

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 допомогою мостової схеми, за розбалансом якої визначається витрата вимірюваної речовини.

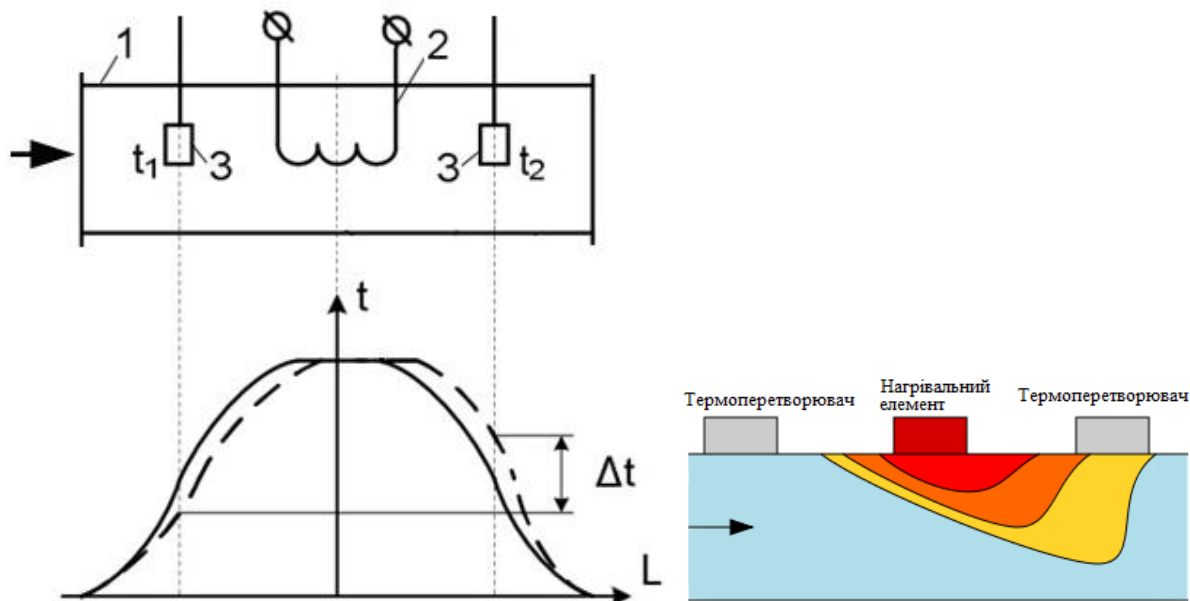
До переваг термоанемометрів можна віднести: великий діапазон вимірюваних швидкостей, високу швидкодію. До недоліків термоанемометрів відносять крихкість і зміна градування дроту нитки через старіння і перекристалізацію матеріалу дроту.

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 при вивченні руху речовин.

Калориметричні витратоміри

На Рисунок 1.68 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 2. На однакових відстанях від центру нагрівача розташовані термоперетворювачі 3, що вимірюють температуру потоку до і після нагрівача.



1 – трубопровід; 2 – нагрівач потоку; 3 – термоперетворювачі; t – температура;
 L – довжина ділянки трубопроводу

Рисунок 1.68 – Схема калориметричного витратоміра.

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 $\Delta t = t_2 - t_1 = 0$. При деякій малій швидкості потоку ця симетрія порушується і крива розподілу температури також несиметрична і дещо зміщується вправо (на графіку розподілу температури середовища це штрихова лінія). При малих витратах температура t_1 падає внаслідок надходження холодної речовини, а температура t_2 зростає, внаслідок чого Δt збільшується зі зростанням витрати.

З подальшим збільшенням витрати при постійній 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 Δt буде зменшуватися. Таким чином, при малих витратах різниця температур Δt прямо пропорційна витраті, а при великих – обернено пропорційна (Рисунок 1.69).

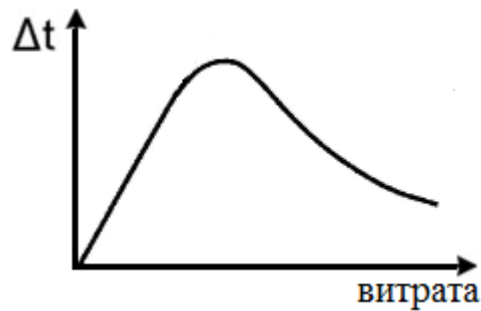


Рисунок 1.69 – Залежність перепаду температур від витрати

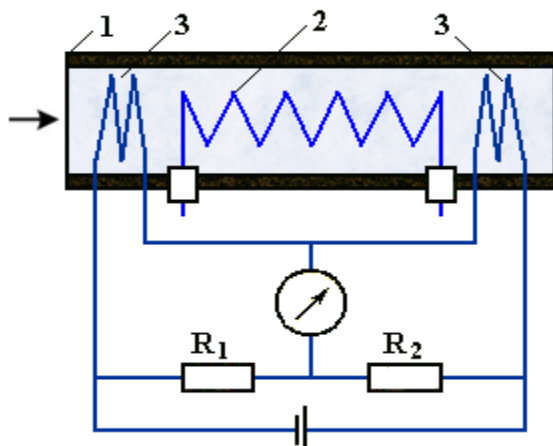
Малі швидкості потоку і відповідно малі витрати характерні переважно для трубопроводів малого діаметра. В таких трубопроводах часто важко розмістити нагрівач. Тому калориметричні витратоміри з внутрішнім нагріванням зазвичай працюють на спадаючій гілці залежності різниці температур від витрати (Рисунок 1.69). Залежність між масовою витратою G і різницею температур Δt при великих витратах визначається рівнянням теплового балансу:

$$G = \frac{N}{kc\Delta t}, \quad (1.31)$$

де N – потужність нагрівача; k – поправочний множник на нерівномірність розподілу температур по перерізу трубопроводу; c – теплоємність речовини при температурі $(t_1 + t_2) / 2$.

З виразу (1.31) витікає, що вимірювання масової витрати може бути здійснено двома способами:

- 1) при постійній потужності N нагріву за значенням різниці температур Δt ;
- 2) при підтриманні постійної різниці температур Δt за значенням потужності N нагрівача, що забезпечує цю постійну різницю температур.



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

Рисунок 1.70 – Схема калориметричного витратоміра

В якості первинних вимірювальних перетворювачів температури можуть бути застосовані дві термопари або два термометра опору. Включення термометрів опору в мостову схему, де в інші двох плечей моста ввімкнено резистори з постійними опорами R_1 і R_2 (Рисунок 1.70), дозволить за розбалансом визначити витрату вимірюваної речовини.

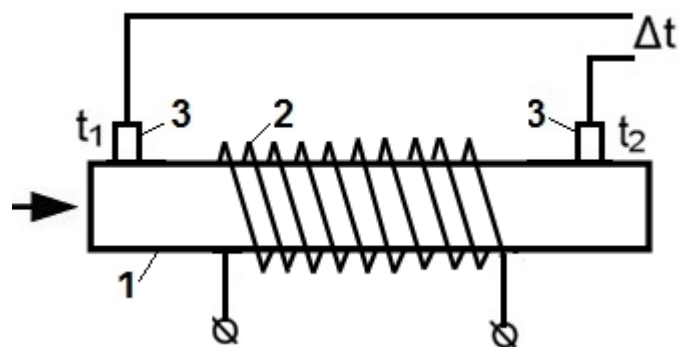
Якщо калориметричний

витратомір призначений для вимірювання великих витрат, то різницю температур Δt при максимальній витраті обмежують значенням $1-3^{\circ}\text{C}$, щоб уникнути великої витрати потужності на нагрівання. Калориметричні витратоміри знаходять застосування лише для вимірювання дуже малих витрат рідин, так як теплоємність у рідин значно більша, ніж у газів. В основному ці прилади застосовують для вимірювання витрати газу. Але при цьому калориметричні витратоміри з внутрішнім нагрівом не набули достатнього поширення в промисловості через малу надійність роботи в важких експлуатаційних умовах нагрівачів і термоперетворювачів, які розташовуються усередині трубопроводу. 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 $\pm (0.3-0.5)\%$. Основною перевагою цих витратомірів є вимірювання масової витрати газу без вимірювання його тиску і густини.

Існують теплові витратоміри, у яких нагрівач і термоперетворювачі розміщують на зовнішній стінці труби, і передача теплоти до потоку здійснюється через стінку труби.

Термоконвективні витратоміри

Термоконвективними називаються теплові витратоміри, у яких нагрівач і термоперетворювачі розташовуються зовні трубопроводу (Рисунок 1.71), 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).



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

Рисунок 1.71 – Схема термоконвективного витратоміра.

Витратомір є тонкостінною металевою трубкою малого діаметра, на зовнішню поверхню якої намотано дріт 2. 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. В схемах витратомірів із суміщеними нагрівачами (нагрівач суміщено з термометром опору) можливе застосування односекційного нагрівача (Рисунок 1.72-а) та двосекційного (Рисунок 1.72-б) .

Прилад з одним нагрівачем (Рисунок 1.72-а) має стабілізатор С температури нагрівача Т, і він працює в режимі $T = \text{const}$. Зі збільшенням витрати зростає кількість тепла, що віддається нагрівачем у потік. Щоб його температура не знижувалася, стабілізатор С збільшує напругу живлення U нагрівача. Ця напруга і є вихідним сигналом витратоміра.

В схемі, що наведена на Рисунок 1.72-б нагрівач складається з двох секцій, що є одночасно і терморезисторами R_1 і R_2 , що включені в мостову схему. Вони нагріваються струмом від стабілізованого джерела напруги U. Таким чином прилад працює в режимі $U = \text{const}$ (стабілізується напруга живлення нагрівача).

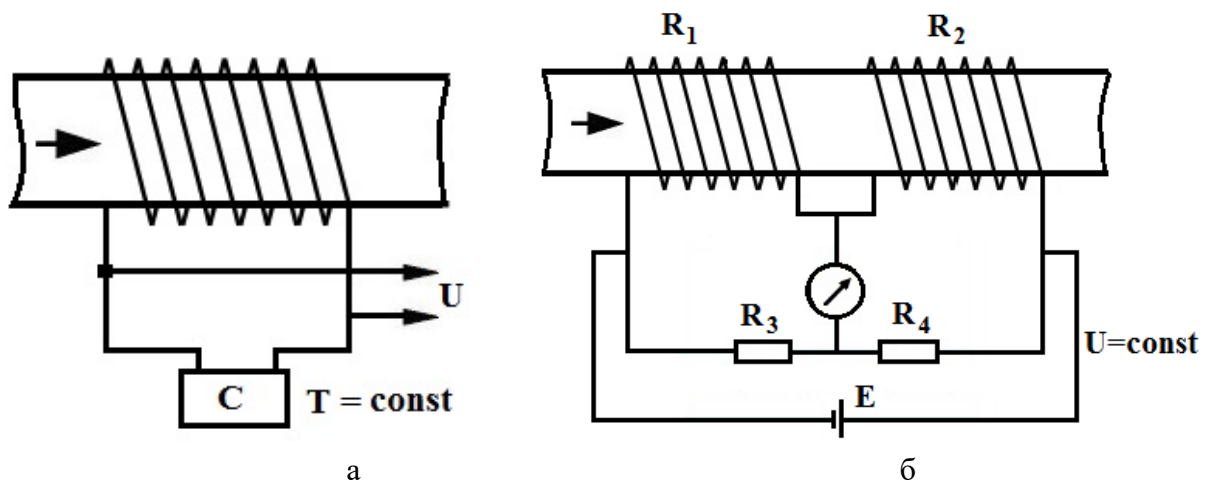


Рисунок 1.72 – Схема термоконвективних витратомірів із суміщеними нагрівачем: а – прилад з одним нагрівачем; б – прилад з двома нагрівачами

Мірою вимірюваної витрати є величина розбалансу мостової вимірювальної схеми. Так для нерухомого середовища (витрата дорівнює нулю) нагрівання симетричне, опори R_1 і R_2 рівні й мостова схема знаходиться в рівновазі. При деякій витраті ця симетрія порушується і крива розподілу температури також буде несиметричною (як було розглянуто вище). При витраті температура t_1 і опір R_1 будуть менші за температуру t_2 і опір R_2 . Величина розбалансу мостової вимірювальної схеми буде відповідати витраті контрольованого середовища.

Калориметричними та термоконвективними витратомірами вимірюють масову витрату за умови сталості теплоємності вимірюваної речовини, що є

їх перевагою. До переваг термоконвективних витратомірів відносять і відсутність контакту із вимірюваною речовиною. До недоліків їх велику інерційність.

Калориметричні витратоміри забезпечують високу точність (похибка $+0,3... 1\%$, для термоконвективних - $1,5...3\%$), великий діапазон вимірювання, вимірювання пульсуючих і малих витрат.

Теплові витратоміри можуть застосовуватися при вимірюванні невеликих витрат практично будь-яких середовищ при різних їх параметрах. Крім того, вони дуже перспективні для вимірювання витрати дуже в'язких матеріалів. Переваги: відносно висока точність (похибка $\pm 0,5 \div 1\%$), великий діапазон виміру, вимір пульсуючих і малих витрат.

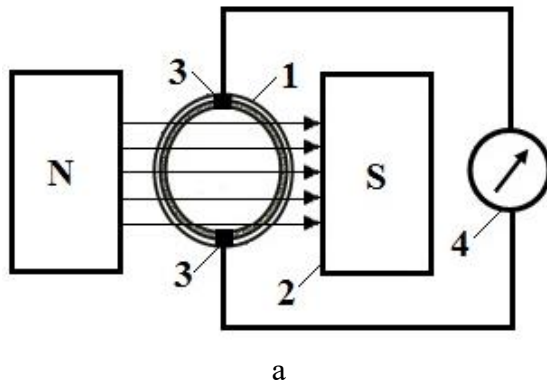
Недоліки: складність пристрою автоматичної підтримки заданої різниці температур і постійної витрати електроенергії на нагрів потоку.

1.4.2 Електромагнітні витратоміри

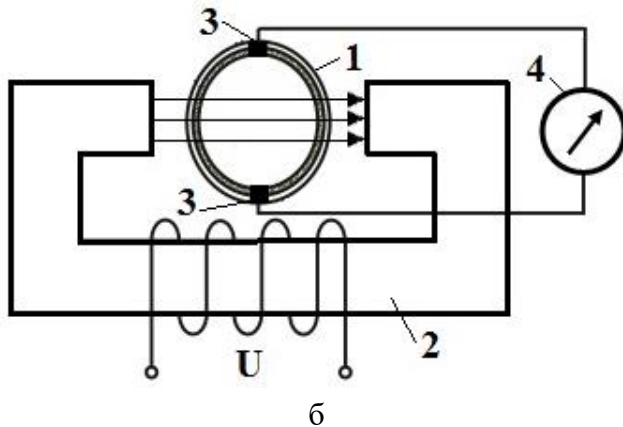
Принцип дії цих приладів ґрунтується на законі електромагнітної індукції (законі Фарадея), згідно з яким при русі провідника в магнітному полі, виникає електрорушійна сила (ЕРС), яка пропорційна швидкості руху провідника. При цьому напрямок струму, що виникає в провіднику, перпендикулярний до напрямку руху провідника та силовим лініям магнітного поля. В електромагнітних витратомірах роль провідника виконує електропровідна рідина, що протікає по трубопроводу між полюсами магніту і перетинає магнітне поле створене магнітом. При цьому в рідині буде наводитися ЕРС, що пропорційна швидкості її руху, і відповідно й 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 такі електромагнітні витратоміри, у яких вимірюється ЕРС, що індукована в рідині, при перетині нею магнітного поля. Принципові схеми електромагнітних витратомірів наведені на Рисунок 1.73.

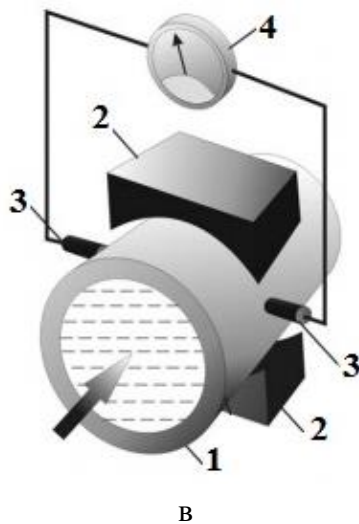
У таких приладах між полюсами магніту 2 (Рисунок 1.73-а) або електромагніту 2 (Рисунок 1.73-б) встановлюють ділянку трубопроводу 1 (перпендикулярно до напрямку магнітних силових ліній), яка виготовлена з немагнітного матеріалу і всередині покрита електроізоляційним матеріалом (наприклад, емаль, склопластик, фторопласт тощо) з потоком контрольованої рідини. У стінки трубопроводу діаметрально протилежно в одному поперечному перерізі 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.



а
1 – трубопровід; 2 – магніт; 3 – електроди;
4 – вимірювальний прилад;



б
1 – трубопровід; 2 – електромагніт;
3 – електроди; 4 – вимірювальний прилад



в
Рисунок 1.73 – Принципові схеми електромагнітних витратомірів:
а – з постійним магнітом;
б – з електромагнітом;
в – об'ємне зображення витратоміру

магнітної системи; можливість вимірювання витрат, що змінюються з високою частотою; відсутність численних перешкод, що виникають при застосуванні змінного магнітного поля; можливість вимірювання витрати

Різниця потенціалів E , що знімається на електродах визначається із рівняння:

$$E = BDV = 4BQ_0 / (\pi D), \quad (1.32)$$

де B – магнітна індукція; D – відстань між кінцями електродів, яка рівна внутрішньому діаметру трубопроводу; V і Q_0 – середня швидкість потоку та об'ємна витрата рідини (об'ємна витрата Q_0 та середня швидкість V зв'язані рівнянням $Q_0 = V \cdot S$, де $S = \pi D^2 / 4$ – площа поперечного перерізу трубопроводу).

При постійному значенні магнітної індукції B різниця потенціалів E , що знімається на електродах, прямо пропорційна об'ємній витраті вимірюваної рідини.

Неоднорідність магнітного поля та шунтувальна дія трубопроводу викликають циркуляційні потоки, що знаходяться в площині перпендикулярній магнітному полю, і які впливають на значення вимірюваної ЕРС. Для врахування цих крайових ефектів в рівняння $E = BDV = 4BQ_0 / (\pi D)$, (1.32) поправочні коефіцієнти (k_m та k_t), значення яких зазвичай дуже близькі до одиниці.

Постійне магнітне поле в електромагнітному витратомірі має ряд переваг, до яких можна віднести: відносну простоту пристрою

речовин з низькою електричною провідністю. Також витратомір з постійним магнітом може використовуватися там, де немає можливості підключитися до мережі змінного струму, і має абсолютну автономність. Крім того, відсутність електронних компонентів спрощує їх конструкцію, збільшує довговічність і надійність.

Але постійному магнітному полю властивий суттєвий недолік – поляризація електродів, при якій змінюється опір перетворювача, а отже, з'являються суттєві додаткові похибки, що порушує нормальну роботу витратоміра. Поляризацію зменшують, застосовуючи електроди зі спеціальних матеріалів (вугільні, з каломелі) або спеціальні покриття для електродів (платинові, танталові). У зв'язку з цим для вимірювання витрати рідин з іонною провідністю постійне магнітне поле не застосовують, а застосовують тільки для рідин з електронною провідністю.

Постійне магнітне поле може бути використано для вимірювання витрати розплавлених металів, що мають електронну, а не іонну провідність.

Також електромагнітні витратоміри з постійним магнітним полем застосовують в лабораторіях і дослідницькій практиці при короткочасних вимірах, коли явище поляризації практично не помітно, і при вимірюванні швидкозмінних витрат, вимірювання яких при змінному магнітному полі неможливе.

Змінне магнітне поле зводить до мінімуму поляризацію електродів, завдяки чому достатньо широко застосовується в витратомірах.

У разі живлення електромагнітів струмом промислової частоти f , поле змінюється за часом і має синусоїдальну форму, а ЕРС для трубопроводів круглого перерізу буде визначатись за формулою:

$$E = \frac{4Q_0}{\pi D} B_{max} \sin \omega t, \quad (1.33)$$

де $B = B_{max} / \sin \omega t$ – амплітудне значення магнітної індукції; $\omega = 2\pi f$ – кругова частота.

Ця ЕРС пропорційна витраті речовини.

При застосуванні змінного магнітного поля також присутні ефекти, що спотворюють корисний сигнал.

Трансформаторний ефект – в колі, що утворено рідиною в трубопроводі, електродами, з'єднувальними проводами і вторинними приладами наводиться трансформаторна ЕРС. Джерелом наведеної ЕРС є обмотка електромагніту або зовнішні синхронні наведення (наприклад, від сусідніх витратомірів). Для їх компенсації в вимірювальну схему приладу вводять компенсуючі ланцюги або живлять електромагніт постійним струмом.

Ємнісний ефект, що виникає через велику різницю потенціалів між системою збудження магнітного поля і електродами та паразитної ємності між ними (з'єднувальні дроти і т. п.). Засобом боротьби з цим ефектом є ретельне екранування.

В електромагнітних витратомірах є паразитна (шумова) ЕРС, що виникає від теплових шумів у внутрішньому опорі рідини між електродами. Це явище обмежує застосування електромагнітних витратомірів для рідин з великим питомим опором.

Електромагнітні витратоміри мають і значні переваги. До них відносять: 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 рідини з абразивом; менші довжини прямих ділянок труб порівняно з іншими витратомірами (ці витратоміри можна монтувати в будь-якому положенні на відстанях, що становлять 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.

Їх можна застосовувати для вимірювання витрати в межах $1...5000 \text{ м}^3/\text{год}$ у трубопроводах з діаметром $10...1000 \text{ мм}$ за лінійної швидкості потоку $0,6...10 \text{ м/с}$. Класи точності електромагнітних витратомірів становить $0,5...1,5$. Сучасні електромагнітні витратоміри характеризуються імпульсним живленням низької частоти для електромагнітів і застосуванням мікропроцесорних пристроїв для перетворення сигналів.

1.4.3 Акустичні (ультразвукові) витратоміри

Акустичні витратоміри – це прилади що ґрунтуються на вимірюванні того чи іншого ефекту, який залежить від витрати і виникає у разі проходження акустичних коливань через потік рідини або газу. 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 потоком і проти нього. Значно менше зустрічаються прилади, у яких акустичні коливання спрямовують перпендикулярно до потоку і вимірюють ступень відхилення цих коливань від початкового напрямку. Прилади, побудовані на ефекті Доплера, призначені в основному для вимірювання місцевої швидкості, але також їх 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 ультразвукового витратоміра, що ґрунтуються на вимірюванні різниці часу проходження акустичних коливань за потоком і проти нього пояснюється схемою наведеною на Рисунок 1.74. Ультразвукові коливання, що створені випромінювачем B_1 , проходять в трубопроводі крізь контрольовану рідину в напрямку руху потоку рідини і реєструється приймачем Π_2 . Джерело випромінювання (B) і приймач (Π) 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.

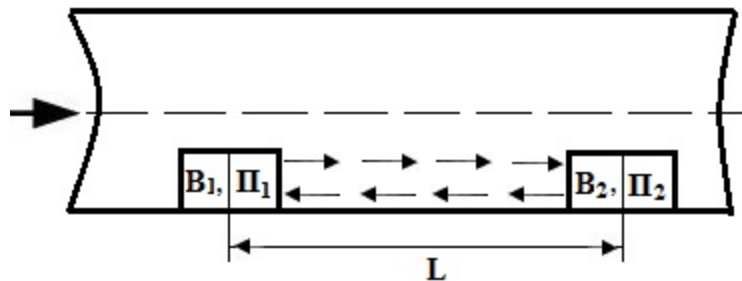


Рисунок 1.74 – Схема ультразвукового витратоміра

Час τ_1 поширення звукової хвилі у напрямі руху потоку від випромінювача B_1 до приймача Π_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 B_1 випромінювачем B_2 створюються коливання, що проходять крізь контрольовану рідину в напрямку протилежного руху потоку рідини. Час τ_2 поширення звукової хвилі у напрямі протилежного руху потоку від випромінювача B_2 до приймача Π_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 $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$:

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

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:

$$\Delta\tau = \frac{2LV}{c^2}. \quad (1.34)$$

Рівняння (1.34) 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 (Рисунок 1.75). Тоді акустичні коливання проходять в контрольованому середовищі відстань довжиною L під кутом до осі труби (нехай це кут β).

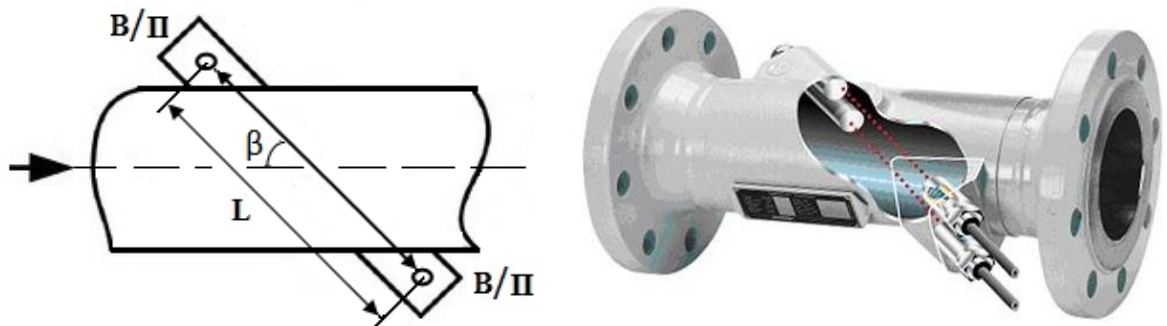


Рисунок 1.75 – Схема ультразвукового витратоміра з двома п'єзоелементами та приклад виконання ультразвукового витратоміра з чотирма п'єзоелементами.

В такому випадку формула (1.34) набуде вигляд:

$$\Delta\tau = \frac{2LV}{c^2} \cos \beta. \quad (1.35)$$

Ультразвуковий витратомір (Рисунок 1.75) складається з відрізка труби, на якому встановлені два (чи 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, а здебільшого їх розміщують в особливих западинах трубопроводу – кишнях. Порожнини кишень можуть бути незаповненими чи заповненими звукопроводом з металу чи органічного скла. Перетворювачі

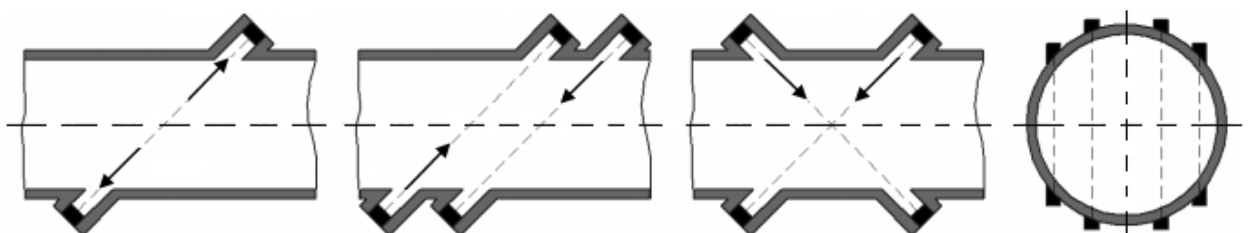
з незаповненими кишнями для запобігання засмічуванню використовують тільки для чистих і неагресивних рідин. Наявність незаповнених кишень може привести до небажаного вихроутворення і впливу на профіль швидкості. Але в них п'єзоелементи посиляють зондуючі імпульси безпосередньо в вимірюване середовище. При зовнішніх п'єзоелементах, що встановлюються на стінку трубопроводу, зондуючий імпульс посиляється в стінку трубопроводу і 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. Об'ємна витрата визначається за різницею часу проходження акустичних коливань. Метод вимірювання витрати, що заснований на безпосередньому вимірі різниці часу проходження коротких імпульсів ультразвуку по потоку і проти нього називають часоімпульсним, а витратоміри, що працюють за цим методом часоімпульсними витратомірами.

Крім цього існує кілька способів вимірювання Δt : фазовий, за яким вимірюється пропорційна Δt 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 прийому (Рисунок 1.76-а, Рисунок 1.75, Рисунок 1.74), перевагу котрих у відсутності просторової асиметрії акустичних каналів, яка може зумовити виникнення суттєвої похибки вимірювання;
- двоканальні (двопроменеві) – мають два випромінювача і два приймача, які створюють два незалежних акустичних канали (Рисунок 1.76-б, в); ці канали розташовані або паралельно, або перехрещуються один з одним;
- багатоканальні (багатопробіжні) – мають більше двох каналів і застосовуються для вимірювання витрати деформованих потоків з метою досягнення підвищеної точності.



а

б

в

г

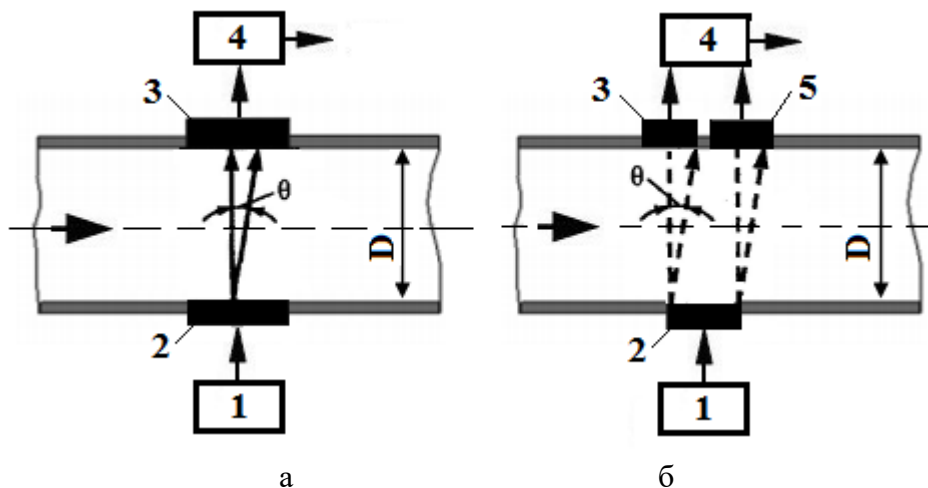
Рисунок 1.76 – Схеми ультразвукових витратомірів: а – одноканальний; б – двоканальний з паралельними каналами; в – двоканальний з каналами, що перехрещуються; г – багатоканальний

Одноканальні ультразвукові витратоміри зазвичай застосовують для вимірювання витрати газу з розвиненим профілем швидкості і в випадках, коли не потрібно високої точності. Двоканальні витратоміри застосовуються, як правило, на трубопроводах малого і середнього діаметрів, у випадках, коли точність одноканального витратоміра є недостатньою. Багатоканальні витратоміри застосовуються в трубопроводах великого діаметра і в випадках, коли профіль потоку істотно деформований і спотворений. Пристрої характеризуються підвищеною точністю вимірювань бо менш чутливі до асиметрії потоку, яка знижується зі збільшенням числа вимірювальних каналів. Сучасні промислові зразки ультразвукових витратомірів можуть мати до 8-ми вимірювальних каналів.

Ультразвукові витратоміри з перпендикулярним спрямуванням акустичних коливань

В основу роботи цих витратомірів покладено вимірювання зміщення потоком контрольованої рідини ультразвукової хвилі, що спрямована перпендикулярно до напрямку руху потоку.

Вони істотно відрізняються від розглянутих тим, що акустичні коливання не спрямовують за потоком і проти нього, а в них ультразвуковий промінь направлений перпендикулярно до руху потоку (Рисунок 1.77), і вимірюється величина відхилення променя від перпендикулярного напрямку, яка залежить від швидкості V контрольованої речовини.



1 – генератор; 2 – випромінювальний п'єзоелемент; 3, 5 – приймальні п'єзоелементи; 4 – підсилювач

Рисунок 1.77 – Схеми ультразвукових витратомірів з випромінюванням, перпендикулярним до осі труби: а – з одним приймальним п'єзоелементом; б – з двома приймальними п'єзоелементами

Ультразвукові хвилі випромінюються в вимірюване середовище по нормалі до напрямку руху потоку п'єзоелементом 3. Сприймаються ці коливання одним 3 або двома п'єзоелементами 3,5.

Кут відхилення θ коливань від перпендикулярного напрямку визначають за рівнянням:

$$\tan \theta = x/D = V/c, \quad (1.36)$$

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 (Рисунок 1.77-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. Так, наприклад, для діаметра п'єзоелементів 20 мм і частоти 10 МГц сигнал стає нульовим уже за швидкості $V = 15$ м/с [2].

При використанні двох приймальних п'єзоелементів 3, 5, розміщених симетрично відносно випромінювача 2 (Рисунок 1.77-б), вихідний сигнал диференціального підсилювача 4 зі збільшенням швидкості V буде зростати.

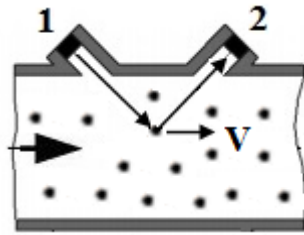
Два приймальні 3, 5 п'єзоелемента встановлюються поруч таким чином, щоби при нерухомому вимірюваному потоці (швидкість $V = 0$) інтенсивності коливань, прийняті кожним п'єзоелементом були рівні, і тоді вихідний сигнал диференціального підсилювача 4 дорівнюватиме нулю завдяки рівності акустичної енергії, що надходить на увімкнені зустрічно приймальні п'єзоелементи. При русі вимірюваного потоку ультразвукові хвилі поширюються і в напрямку потоку, при цьому інтенсивність ультразвукових коливань на приймальних п'єзоелементах буде різна. Виміряна різниця сигналів на приймальних п'єзоелементах є мірою витрати потоку речовини.

Метод застосовується для вимірювання в трубопроводах великих діаметрів і при великих швидкостях потоків. За своєю суттю даний метод відрізняється від описаного вище тим, що вимірюється не час, а геометричний зсув променя. Схеми витратомірів, що працюють за даним методом прості, однак точність вимірювання не висока.

Витратоміри, що побудовані на ефекті Допплера

Даний метод використовує ефект Допплера, який базується на зміні частоти хвилі під час її відбивання від рухомого об'єкту. У доплерівських ультразвукових витратомірах використовується відбиття ультразвукових коливань рухомими частинками потоку. Зміна частоти відбитого сигналу дозволяє визначити швидкість потоку. Об'єктами, що відбивають зондуючий сигнал в потоці рідини, є різноманітні домішки, включення та бульбашки газу, швидкість яких відслідковується витратоміром.

Перетворювач, що працює за цим методом (Рисунок 1.78), 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.



1 – випромінювальний п'єзоелемент;
2 – приймальний п'єзоелемент

Рисунок 1.78 – Схема доплерівського ультразвукового витратоміра.

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:

$$f_1 - f_2 = f_1 (\cos \alpha' - \cos \alpha'') V / c \quad (1.37),$$

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

При симетричному розташуванні випромінювального і приймального п'єзоелементів відносно осі труби кути α' і α'' дорівнюють один одному і формула $f_1 - f_2 = f_1 (\cos \alpha' - \cos \alpha'') V / c$ (1.37), дещо спрощується.

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 $0,12 D$ від стінки труби, де швидкість відповідає середній швидкості потоку. В іншому випадку необхідна індивідуальне градуювання витратоміра.

У більшості випадків п'єзоелементи у доплерівських витратомірах поміщають зовні труби. Це особливо необхідно в разі вимірювання забруднених і абразивних речовин для захисту п'єзоелементів, але при цьому треба зважати на додаткові похибки, зумовлені, зокрема, заломленням променя в стінці труби.

У порівнянні з іншими ультразвуковими витратомірами доплерівські мають найменшу точність з огляду на те, що вихідний сигнал є цілим спектром частот, що виникають внаслідок зсуву вихідної частоти не однієї часткою - відбивачем, а також частинок, що мають різні швидкості. Тому відносна похибка вимірювання витрати зазвичай не менше 2-3%.

Доплерівські 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. При їх відсутності рекомендується вдувати в потік повітря або газ через спеціальну трубку на деякій відстані перед перетворювачем витрати. Витрата газу становить 0,005- 0,1% від витрати вимірюваної речовини.

З розглянутих різновидів акустичних витратомірів найбільше застосування отримали прилади з ультразвуковими коливаннями, що направляються по потоку і проти нього. Ультразвукові витратоміри зі знесенням (випромінюванням, перпендикулярним до осі труби) застосовуються дуже рідко. Вони значно менш чутливі, ніж перші. Доплерівські прилади слугують переважно для вимірювання місцевих швидкостей потоку. Ультразвукові витратоміри зазвичай слугують для вимірювання об'ємної витрати речовини, бо ефекти, що виникають під час проходження акустичних коливань через потік рідини або газу, пов'язані з їх швидкістю.

Показання ультразвукових витратомірів залежать від швидкості потоку, усередненої по ходу променя, а не середньої швидкості потоку вимірюваної речовини, що визначає найбільш істотну складову похибки вимірювання. На точність вимірювання впливає і та обставина, що швидкість поширення ультразвуку залежить від фізико-хімічних властивостей середовища (температури, тиску та інших), і ця швидкість значно більша за швидкість руху контрольованої речовини (наприклад, різниця часу проходження ультразвуку становить $10^{-6} \dots 10^{-7}$ с і навіть при швидкостях потоку 10 ... 15 м/с вони суттєво відрізняються, вимірювання потрібно проводити з похибкою $10^{-8} \dots 10^{-9}$ с). Ці обставини обумовлюють необхідність застосування складних електронних схем в поєднанні з мікропроцесорною технікою, що забезпечують компенсацію впливу вказаних факторів.

При цьому ультразвукові витратоміри набувають дедалі більшого застосування в промисловості, оскільки мають низку значних переваг: відсутність рухомих частин і частин, що виступають у потік; відсутність додаткових витрат напору; висока точність вимірювання, що становить 0,1...2,5 %; мала інерційність; можливості вимірювання витрат будь-яких середовищ в діапазоні від 0,03 до 40 000 м³/год; широкий діапазон температур і тисків; широкий діапазон діаметрів трубопроводів від 10 мм і вище.

Незважаючи на очевидні переваги цих приладів, до недоліків слід віднести: необхідність значних довжин лінійних ділянок до і після перетворювача; вплив на показання бульбашок повітря в потоці; обмеження за мінімальною швидкістю потоку; необхідність контролю відкладень у трубопроводі на його робочій ділянці; складність і висока вартість приладів, яка за інших рівних умов у 3-4 рази перевищує вартість тахометричних і електромагнітних витратомірів.

1.4.4 Оптичні витратоміри

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

- 1) доплерівські витратоміри, засновані на вимірі різниці частот, що виникає при відображенні світлового променя рухомими частинками потоку;
- 2) 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;
- 3) витратоміри, засновані на особливих оптичних ефектах, наприклад, залежність оптичних властивостей волоконного світловода від швидкості оточуючого його потоку;
- 4) інші.

Різновиди оптичних витратомірів: витратоміри, що засновані на вимірі часу переміщення на певній ділянці шляху оптичної мітки, введенної в потік, та кореляційні оптичні витратоміри є одночасно і окремими випадками міткових та кореляційних витратомірів, які розглянуті у відповідних розділах.

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.

Допплерівські витратоміри

Основні групу оптичних приладів складають доплерівські витратоміри. Вони застосовуються головним чином для вимірювання місцевих швидкостей рідини і газу при різних дослідженнях з вивчення турбулентності, зняття поля швидкостей та інше. Для вимірювання витрати вони застосовуються рідко.

Принцип дії доплерівських оптичних витратомірів аналогічний принципу роботи акустичних (ультразвукових) витратомірів. В цих використовується відбиття світлового променя рухомими частинками потоку, а за зміною

частоти відбитого сигналу відносно зонduючого (різниця частот) визначають швидкість потоку.

Різниця частот $f_1 - f_2$, що виникає при відбитті світлового променя неоднорідностями потоку визначається з рівняння:

$$\Delta f = f_1 - f_2 = f_1 (\cos \alpha' - \cos \alpha'') V / c, \quad (1.38)$$

де f_1, f_2 – частоти коливань світлового променя відповідно випромінювача і відбита від частинки, яка сприймається приймальним п'єзоелементом; α' – кут між напрямком зонduючого променя і вектором швидкості V частинки, яка відбиває сигнал; α'' – кут між напрямком відбитого променя і вектором швидкості; V, c – швидкості потоку і світла відповідно.

З урахуванням того, що швидкість світла в контрольованому середовищі дорівнює c/n (n – показник заломлення для даної речовини), а відношення $f/c = 1/\lambda_0$, де λ_0 – довжина світлової хвилі в порожнині, отримаємо:

$$\Delta f = f_1 - f_2 = (Vn/\lambda_0) (\cos \alpha' - \cos \alpha'')$$

Звідки:

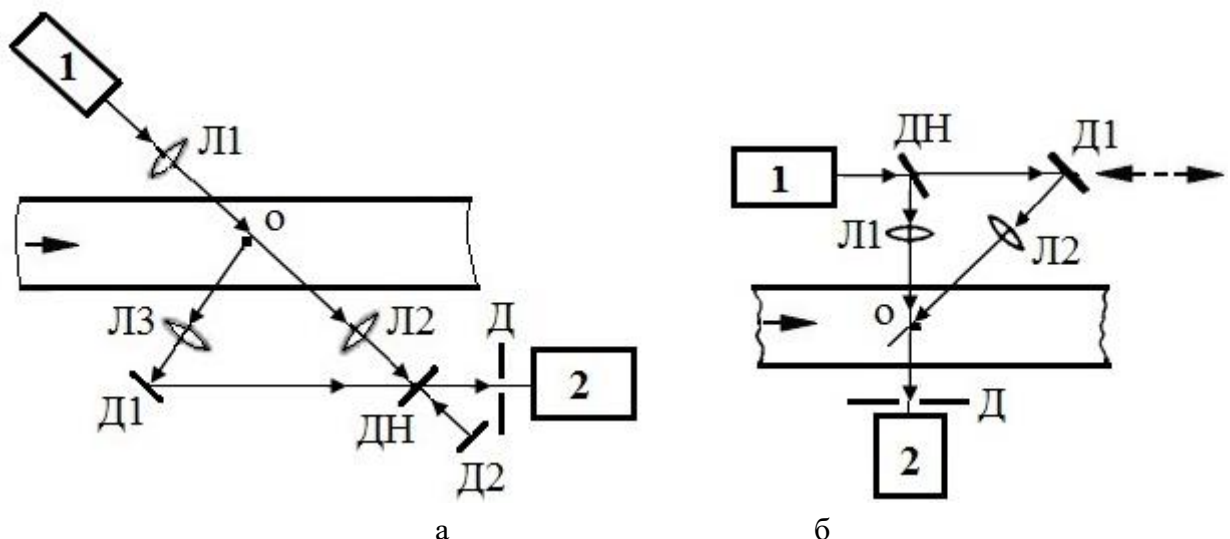
$$V = k \Delta f, \quad (1.39)$$

де k – коефіцієнт $k = \frac{\lambda_0}{(\cos \alpha' - \cos \alpha'')n}$.

Таким чином, вимірювана різниця частот може служити для визначення швидкості V частинки, яка відбиває сигнал, тобто для вимірювання місцевої швидкості потоку (а відповідно і витрати).

Швидкість світла в рідині або газі та частота коливань світлового променя (від джерела монохроматичного випромінювання – лазера) мають високу стабільність, що забезпечує стабільність показника заломлення n та довжини світлової хвилі λ_0 .

Схема доплерівського оптичного витратоміра Ієха і Каммінгса показана на Рисунок 1.79-а.



1 – оптичний квантовий генератор; 2 – фотоелектричний помножувач;
Л1, Л2, Л3 – лінза; Д1, Д2 – дзеркало; ДН – напівпрозоре дзеркало; Д – діафрагма
Рисунок 1.79 – Схеми доплерівських оптичних витратомірів: а – схема Ієха і
Каммінгса; б – модифікована вимірювальна схема

Промінь, утворений оптичним квантовим генератором (ОКГ) – лазером 1 фокусується лінзою Л1 в точку О (на рухомий об'єкт). Відбита частина енергії променя збирається лінзою Л3 і проходить на дзеркало Д1, і відбиваючись від якого через напівпрозоре дзеркало ДН та діафрагму Д потрапляє на фотокатод фотоелектронного помножувача (ФЕП) – 2. Невідбитий промінь проходить через лінзу Л2, напівпрозоре дзеркало ДН і відбиваючись від дзеркала Д2 також надходить на ФЕП. В цьому блоці формується вихідний сигнал. Недолік цієї схеми – складність регулювання положення робочої точки О.

Схема, що зображена на Рисунок 1.79-б, позбавлена цього недоліку. В схемі поділ променя відбувається до введення в потік, що дозволяє легко змінювати положення робочої точки. Промінь світла після виходу з ОКГ падає на напівпрозоре дзеркало ДН і частково відбивається останнім, утворюючи опорний промінь, що проходить через лінзу Л1, потім через рідину перпендикулярно руху останньої без доплерівського зсуву, і через діафрагму Д надходить на фотокатод ФЕП. Інша ж частина променя, що йде з ОКГ, проходить через напівпрозоре дзеркало ДН, відбивається дзеркалом Д1, фокусується лінзою Л2 в робочій точці О, де частково розсіюється, утворюючи робочий промінь, що проходить через діафрагму Д і також надходить на фотокатод. Пересуванням дзеркала Д1 можна регулювати положення робочої точки О.

Вимірювання доплерівського зсуву частоти засноване на вимірювання частот двох оптичних сигналів, один з яких є опорним, а другий – розсіяний – неоднорідностями рухомої речовини. Обидва промені необхідно подати на фотоприймальний пристрій паралельно, для чого використовуються спеціальні регулювальні пристрої. На першій ділянці вимірювальної схеми, яка визначає різницю частот $f_1 - f_2$ застосовуються фотоелектричні помножувачі – ФЕП, які виконують функцію прийому, змішування і перетворення сигналів, які надходять. Вони мають високу чутливість, малий поріг реагування та задовільну полосу пропускання.

Як видно з наведених схем, доплерівські оптичні витратоміри (оптичні анемометри) складаються з джерела випромінювання, оптичного пристрою, що утворює разом з опорним і робочий промінь з доплерівським зсувом частот, і приймально-вимірювального пристрою, який за значенням цього зсуву формує корисний сигнал.

Схеми оптичних пристроїв у доплерівських витратомірів можуть бути дуже різними. У більшості випадків джерело випромінювання і фотоприймальний пристрій розташовуються на протилежних сторонах труби, незважаючи на те, що при цьому потрібна досить жорстка опорна конструкція, що забезпечує незмінність положення оптичної системи. Але

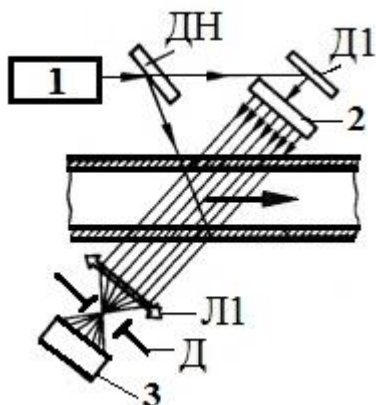
при необхідності вся система може перебувати і з одного боку. Однак в такому випадку потрібні більш потужне джерело випромінювання і більш чутлива вимірювальна схема, тому що тут на фотоприймач надходять відбиті промені, що спрямовані в бік, протилежний руху потоку. Їх інтенсивність в сотні і тисячі разів менша за промені, що відображаються у напрямку потоку.

Для вимірювання витрати оптичними засобами, що використовують ефект Доплера застосовують два методи. Перший метод полягає у вимірюванні за допомогою лазерного доплерівського анемометра середньої швидкості потоку і множенні результату вимірювання на площу потоку для визначення витрати. Тут вимірюється місцева швидкість (при відомому її співвідношенні з середньою швидкістю потоку). Швидкість вимірюють у центрі труби або на відстані $0,758r$ (де r – внутрішній радіус труби) від осі труби. Вимірювання у центрі труби потребує меншої довжини прямих ділянок трубопроводу перед витратоміром.

При другому методі застосовуються лазерні доплерівські витратоміри особливої конструкції. Тут необхідні пристрої, що дозволяють або одночасно вимірювати доплерівський зсув частот в декількох точках, розташованих на різних відстанях від осі труби, або ж робити цю операцію послідовно, наприклад за допомогою двигуна, який з постійною швидкістю пересуває фокусуючу лінзу і, отже, переміщує робочу точку [2].

На Рисунок 1.80 показана схема приладу, що вимірює доплерівський зсув частот в декількох точках.

Світловий промінь від лазера 1 падає на напівпрозоре дзеркало ДН. Частина променя відбивається від дзеркала ДН і направляється безпосередньо в потік, а інша частина надходить на дзеркало Д1 і потім на розщеплювач 2, з якого виходить у вигляді ряду пучків променів. Останні



1 – лазер; 2 – розщеплювач; 3 – фотоприймач; Л1 – лінза; Д1 – дзеркало; ДН – напівпрозоре дзеркало; Д – діафрагма

Рисунок 1.80 – Схема багатопроменевого доплерівського оптичного витратоміра

інтерферують з прямим пучком в окремих точках потоку, проходять через лінзу Л1 і діафрагму Д та надходять на протяжний фотоприймач 3.

Для отримання вимірювальної інформації застосовується багатоканальний швидкодіючий аналізатор спектру. Застосування його можна уникнути в разі установки багатопроменевого доплерівського вимірювача з частотним зсувом пучків, і в якому здійснюється не тільки просторове, але і частотне розділення світлових пучків за допомогою обертової дифракційної решітки.

Витратоміри, засновані на ефекті Фізо-Френеля

Прилади, які засновано на ефекті Фізо-Френеля, головним чином використовуються для вимірювання витрат.

Швидкість світла в прозорій речовині дорівнює c/n (де c – швидкість світла в порожнині, n – показник заломлення для даної речовини). Швидкість світла c_n в речовині, що рухається зі швидкістю V , залежить від величини і напрямку останньої. Швидкість світла c_n більша за c/n , якщо її напрям співпадає з напрямом V , а менша при протилежному напрямку. Швидкість світла c_n визначається за рівнянням Френеля, яке було підтверджено експериментальними дослідженнями Фізо:

$$c_n = c/n \pm V(n^2 - 1)n^{-2}. \quad (1.40)$$

Для вимірювання швидкості V речовини на відрізку шляху довжиною L потрібно пропускати світло за потоком и проти нього і вимірювати різницю часу проходження світлом даного відрізку шляху. Для цього створюється замкнений контур довжиною L , на якому світло циркулює в протилежних напрямках. Обидва світлові потоки після проходження відрізку довжиною L надходять на фотоприймач, за допомогою якого вимірюється зсув інтерференційних смуг Δx , або частотний зсув Δf світлових коливань. Причому, як Δx так і Δf пропорційні швидкості V контрольованої речовини.

Залежність зсуву Δx інтерференційних смуг від швидкості V визначають за формулою:

$$\Delta x = (4L\pi V/c\lambda)[(n^2 - 1)/n^2] \cos \theta, \quad (1.41)$$

де λ – довжина світлової хвилі; θ – кут між світловим променем та віссю труби. Зміна фотоструму Δi на фотоприймачі пропорційна Δx .

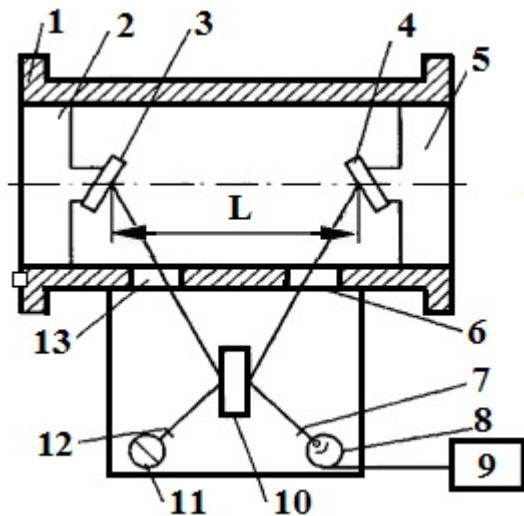
Залежність частотного зсуву Δf від швидкості V визначають за формулою:

$$\Delta x = (2LV/c\lambda)((n^2 - 1) \cos \theta). \quad (1.42)$$

Схема інтерференційного витратоміра, заснованого на вимірюванні величини зсуву Δx інтерференційних смуг, показана на Рисунок 1.81-а.

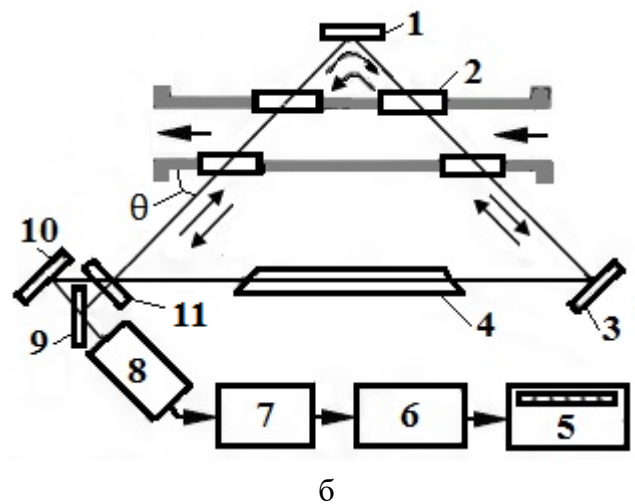
Світло від джерела 11 після проходження через світлофільтр 12 і за допомогою напівпрозорого дзеркала 10 ділиться на два потоки. Потоки проходять через прозорі вставки 6 і 13, що встановлені в корпусі 1, і падають на дзеркала 3 і 4. Після відбиття від дзеркал 3 і 4 (укріплених в трубі за допомогою струменевипрямлювачей 2 і 5) один світловий промінь проходить шлях L за напрямом потоку вимірюваної речовини, а інший проти нього. Потім вони знову відбиваються від дзеркал 3 і 4 і повертаються до дзеркала 10, де змішуються і утворюють інтерференційну картину. Частина інтерференційної смуги проходить через діафрагму 7 і надходить до фотоприймача 8. Фотострум вимірюється приладом 9.

Величина зсуву Δx інтерференційних смуг прямо пропорційна швидкості середовища.



а

1 – корпус; 2, 5 – струменевипрямляч; 3, 4 – дзеркало; 6, 13 – прозорі вставки (вікна); 7 – діафрагма; 8 – фотоприймач; 9 – вимірювальний прилад; 10 – напівпрозоре дзеркало; 11 – джерело світла; 12 – світлофільтр



б

1 – трубопровід; 2 – прийомний отвір обводу; 3 – водомір; 4 – труба обводу; 5 – вихідний отвір обводу 11 – гелій-неоновий лазер; 12 – підсилювач; 13 – електронний фільтр

Рисунок 1.81 – Схеми витратомірів Фізо-Френеля: а) – інтерференційний; б) – частотний.

Схема оптичного витратоміра, заснованого на вимірюванні величини частотного зсуву Δf світлових коливань, показана на Рисунок 1.81-б.

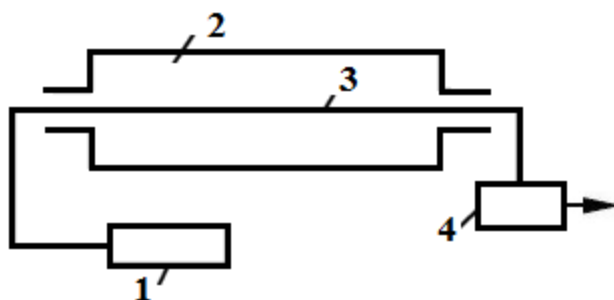
Джерело випромінювання – гелієво-неоновий лазер 4 разом з трьома дзеркалами 1, 3 та 11 утворює замкнутий світловий контур, який завдяки чотирьом прозорим вікнам 2 два рази перетинає трубопровід 12. При цьому один світловий промінь рухається за напрямом потоку вимірюваної речовини, а інший проти нього. Обидва світлові промені, пройшовши весь контур в протилежних напрямках, а потім і дзеркало 11, направляються дзеркалами 10 і 9 на фотоприймач 8 і далі через підсилювач 7 та електронний фільтр 6 на вимірювальний прилад 5, що вимірює частотний зсув Δf .

Величина частотного зсуву Δf прямо пропорційна швидкості середовища.

Витратоміри, засновані на особливих оптичних ефектах

До особливих оптичних витратомірів можна віднести прилади, засновані на залежності від витрати оптичних властивостей волоконного світловода, який знаходиться в потоці вимірюваної речовини.

Схема оптичного витратоміра з волоконним світловодом показана на Рисунок 1.82.



1 – неонов-гелієвий лазер; 2 – волоконний світловод; 3 – мідна трубка; 4 – фотоперетворювач

Рисунок 1.82 – Схема оптичний витратоміра з волоконним світловодом, розташованим по осі труби.

У даному витратомірі неонов-гелієвий лазер 1 з'єднаний з волоконним світловодом 2. Даний світловод прокладений уздовж осі мідної трубки 3 (діаметром 30 мм і довжиною 500 мм), по якій рухається вимірювана контрольована рідина. Протилежний кінець світловода 3 з'єднаний з фотоперетворювачем 4. Течія рідини викликає невелику вібрацію волоконного світловода, завдяки чому виникають фазові зміни світлового променя. Сигнал з фотоперетворювача 4 через підсилювач, електронний фільтр та інтегратор надходить до вимірювального приладу. Головною перевагою даного витратоміра є простота його конструкції. Але при цьому точність цього приладу невисока.

Оптичні витратоміри в основному використовуються в трубах малих діаметрів. Застосовуються в широкому діапазоні вимірювання швидкостей потоку (0,1 ... 100 м/с).

1.4.5 Іонізаційні витратоміри

Іонізаційними витратомірами називаються прилади, засновані на вимірі того чи іншого ефекту, який залежить від витрати ефекту, і виникає в результаті безперервної або періодичної іонізації потоку газу (рідше рідини).

Іонізаційні витратоміри поділяються на дві істотно відмінні одна від одної групи:

- 1) 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;
- 2) 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).

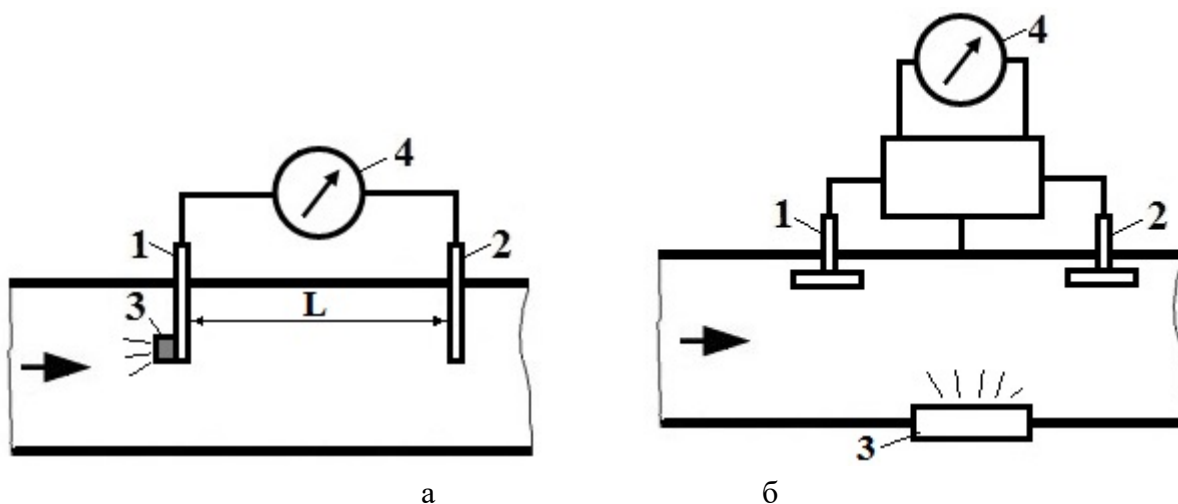
Похибка приладів, які засновано на вимірюванні іонізаційного струму, є доволі великою (5%), і застосовуються вони порівняно рідко, переважно для вимірювання швидкостей газових потоків. Існують розробки іонізаційних приладів, які призначені для вимірювання витрат рідин-діелектриків і мають

похибку вимірювання в межах $2\div 4\%$. 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 α -або β -випромінювання, може перебувати як усередині, так і зовні труби. Це випромінювання іонізує потік газу, що рухається в трубі. 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 (Рисунок 1.83-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 (Рисунок 1.83-б).



1, 2 – електрод; 3 – джерело випромінювання; 4 – вимірювальний пристрій

Рисунок 1.83 – 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 Рисунок 1.83-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 .

При 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 буде пропорційно 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. При подальшому зростанні швидкості газу спостерігається навіть невелике зменшення сили струму, яке пояснюється тим, що частина іонізованих молекул проноситься вздовж електродів.

У схемі наведеній на Рисунок 1.83-б є два прийомних електрода 1 і 2, що розташовані на стінці труби симетрично щодо джерела випромінювання 3 (випромінюючого електроду), яке знаходиться на протилежній стінці. Електроди 1 і 2 включені назустріч один одному. У схемі при 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 напруг, прикладених до електродів. Із зростанням напруги збільшується швидкість переміщення іонів уздовж силових ліній електричного поля.

У схемі з протилежним розташуванням джерела випромінювання і прийомних електродів може бути використаний тільки один приймальний електрод. У такій схемі при відсутності витрати сила струму буде максимальною. Зі збільшенням витрати сила струму буде зменшуватися тому, що при цьому все більше число іонізованих молекул буде виноситися потоком речовини з зони між електродами.

При розташуванні радіоактивного джерела випромінювання (зазвичай β -випромінювання) зовні труби його поміщають в захисному контейнері. β -випромінювання проходить в газопровід через спеціальне вікно, яке закрито мідною фольгою, і надходить всередину першого кільцевого електроду. Другий електрод теж кільцевий знаходиться на відстані L від першого. Стінка труби такого витратоміра виконується з ізоляційного матеріалу.

Іонізація потоку газу може відбуватися під дією електричного розряду того чи іншого виду. Іонізація діелектричної рідини відбувається в результаті виникнення в ній електричних зарядів під дією зовнішнього електричного поля. При іонізації газу електричним розрядом проміжок між електродами дуже малий (кілька міліметрів або навіть частки його). Тому відповідні прилади знаходять застосування переважно в якості анемометрів для вимірювання місцевих швидкостей повітря. Розрізняються анемометри з жевріючим, дуговим і іскровим розрядами.

1.4.6 Ядерно-магнітні витратоміри

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

Ядерно-магнітний резонанс це резонансне поглинання електромагнітної енергії речовиною, яка містить ядра з нульовим спіном, в зовнішньому магнітному полі, що обумовлене переорієнтацією магнітних моментів ядер. Ядро, що поміщене в магнітне поле з індукцією B , завдяки взаємодії поля з магнітним моментом і спіном ядра, буде рухатися навколо вектору B з кутовою частотою ω (її називають ларморова частота). За відсутності зовнішнього магнітного поля магнітні моменти ядер будуть орієнтованими у різних напрямках. Під час накладання магнітного поля з індукцією B відбувається орієнтація магнітних моментів ядер уздовж осі поля B і розподіл ядер за різними енергетичними рівнями (чим нижчий останній, тим більше ядер розташовується на ньому). Надлишок числа ядер у нижньому рівні в порівнянні із сусіднім верхнім визначає значення намагніченості речовини.

Основні різновиди ядерно-магнітних витратомірів: амплітудні, частотні, нутаційні і міткові (вони розглянуті у відповідному розділі).

Амплітудні витратоміри – це витратоміри в яких вимірюється безпосередньо амплітуда резонансного сигналу, що залежить від витрати речовини. Амплітудний витратомір є найбільш простою реалізацією ідеї вимірювань витрати на основі явища ЯМР. Витратомір складається з поляризатора, резонатора і ділянки труби, по якій протікає рідина. Резонатор включає в себе магніт, одну або дві котушки модуляції, котушку, пов'язану з високочастотним генератором, що збуджує в ній змінне магнітне поле, і котушку, що сприймає сигнал ЯМР. Котушка зазвичай намотується на трубопровід і включається в контур, налаштований на резонансну частоту. Котушка ж збудження робиться сидлоподібною. Її вісь нормальна індукції поля магніту резонатора і осі приймальної котушки. Між котушками розташовані гребенеподібні екрани. Все це сприяє зменшенню наводок з котушки збудження до приймальної котушки. Існує і більш проста модифікація перетворювача амплітудного витратоміра, в якій обидві ці котушки замінені однією, намотаною на трубопровід. Вона збуджує резонансне магнітне поле, і вона ж сприймає сигнал ЯМР. У найбільш простому випадку резонатор може складатися лише з однієї подібної котушки.

До переваг амплітудних витратомірів відносять: простота устрою і лінійність шкали приладу. Але похибка вимірювання у них є значною (5-7%), тому що амплітуда сигналу ЯМР залежить від багатьох причин, в тому числі від часу релаксації, температури рідини і її складу, сталості та однорідності магнітного поля. Амплітудні витратоміри знаходять застосування при лабораторних і медичних дослідженнях.

Частотні витратоміри – це витратоміри, що засновані на принципі вимірювання зсуву частоти, який пропорційна об'ємній витраті. При несиметричному розташуванні відносно площини, що паралельна зовнішньому полю котушки, яка створює змінне резонансне поле, і траєкторії руху рідини ядерно-магнітний резонанс спостерігається при частоті ω , яка

трохи відмінна від ларморової частоти ω_L . Частотний зсув $\Delta\omega = \omega - \omega_L$ буде пропорційний об'ємній витраті.

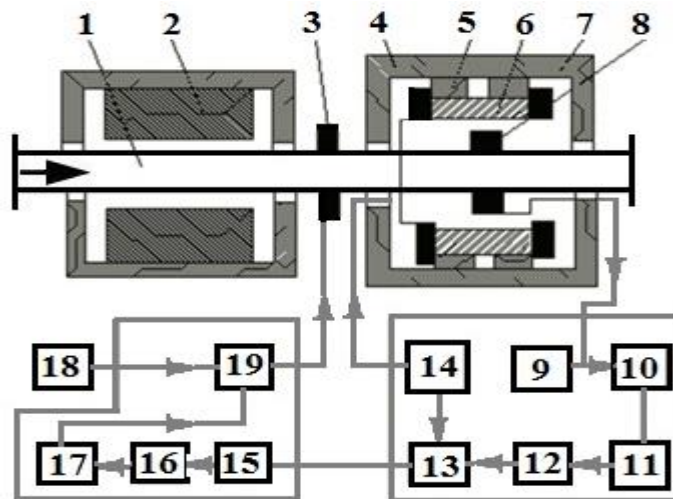
Зразки таких приладів застосовувалися для вимірювання витрат нафти та інших речовин у польових умовах, в трубопроводах, які розташовано далеко від джерел місцевого збурення магнітного поля землі.

Похибка частотних витратомірів знаходиться в межах $1 \div 6\%$.

Іноді до частотних витратомірів відносять міткові і нутаційні витратоміри, в яких вихідною вимірюваною величиною також є частота. За рекомендаціями [2] подібні витратоміри слід називати мітково-частотними і нутаційно-частотними.

Нутаційні витратоміри – це витратоміри у яких між поляризатором і «резонатором» на трубопроводі, в середині якого протікає рідина, розташовується особлива котушка, яку називають котушкою нутації. Така котушка призначена для відхилення вектору намагніченості ядер від напрямку магнітного поля, у якому вона знаходиться, на деякий кут і тим самим змінити проекцію ядерної намагніченості. Для цього котушка нутації живиться змінним струмом, що створює магнітне поле з амплітудою індукції B . Кутова частота цього поля дорівнює ларморовій, у відповідності тому магнітному полю, в якому знаходиться котушка. При рівномірному магнітному полі витрата прямо пропорційний амплітуді індукції поля B , а значить і силі струму в котушці нутації. При нерівномірному полі показання приладу будуть залежати від градієнта індукції поля $\text{grad } B$, спрямованого паралельно швидкості рідини.

Схема нутаційного ядерно-магнітного витратоміра показана на Рисунок 1.84.



1 – трубопровід; 2 – поляризатор; 3 – котушки нутації; 4, 5, 6 – резонатор з магнітною системою (циліндричне ядро 4, два осердя 5, два полюсних наконечника 6); 7 – котушки модуляції; 8 – котушка прийому сигналу; 9 – генератора високої частоти; 10 – підсилювач високої частоти; 11 – детектор; 12 – підсилювач низької частоти; 13 – синхронний детектор; 14 – генератор низької частоти; 15 – віброперетворювач; 16 – підсилювач; 17 – реверсивний двигун; 18 – генератор; 19 – потенціометр

Рисунок 1.84 – Схема нутаційного ядерно-магнітного витратоміра.

Витратомір складається з трубопроводу 1, поляризатора 2, котушки нутації 3 і «резонатора», що включає в себе магнітну систему 4-6, котушки модуляції 7 і котушки 8 прийому сигналу ЯМР. Магнітна система поляризатора має форму замкнутого циліндра. Магнітна система резонатора складається з циліндричного ярма 4, двох осердь 5 у вигляді кільцевих керамічних постійних магнітів, двох полюсних наконечників 6 у вигляді усічених конусів, що повернуті більшими основами в бік робочого зазору.

Вимірювальна частина складається з вимірювача магнітної індукції 13 та самописного електронного потенціометра 19.

Котушки модуляції живляться від генератора низької частоти 14, а приймальня котушка – від генератора високої частоти 9. При зміні витрати в приймальну котушку 8 надходить рідина, що намагнічена позитивно або негативно. При цьому виникає сигнал ЯМР, який проходить через підсилювач високої частоти 10, детектор 11, підсилювач низької частоти 12 і надходить в синхронний детектор 13. При цьому на його виході з'являється напруга, знак якої залежить від напрямку зміни витрати. Ця напруга у віброперетворювачі 15 перетворюється в змінну напругу з частотою 50 Гц, посилюється підсилювачем 16 і подається на реверсивний двигун 17, який через редуктор з'єднаний з потенціометром 19, що регулює вихідну напругу генератора 18, який підключеного до котушки нутації 3. Витрата визначається за положенням стрілки або пера потенціометра. Крім того, її можна вимірювати за амплітудою напруги генератора 18.

Нутаційні ядерно-магнітного витратоміри доцільно застосовувати для вимірювання малих витрат та мікровитрат. Їх недоліком є нерівномірність шкали.

Ядерно-магнітні витратоміри застосовують для речовин у складі яких є ядра з досить великими значеннями магнітних моментів (наприклад, ядра водню). Область застосування ядерно-магнітних витратомірів обмежується практично лише рідинами, оскільки у них концентрація резонуючих ядер досить значна. В принципі можливо їх застосування для вимірювання витрат газів при високому тиску, коли щільність газів велика.

Найбільш перспективним є використання ядерно-магнітних витратомірів для середовищ з дуже низькою питомою електропровідністю (менш ніж 10^3 - 10^5 См/м), що недоступно для промислових електромагнітних витратомірів. З підвищенням електричної провідності рідини у ядерно-магнітних витратомірів зменшується відношення корисного сигналу до шуму.

Ядерно-магнітні витратоміри мають обмежені можливості для вимірювання великих витрат через труднощі створення магнітного поля з достатньою індукцією в великих трубах. При вимірюванні малих витрат необхідно забезпечити досить швидке проходження рідиною вимірювальної ділянки. Цього можна досягти шляхом відповідного вибору діаметра труби. Тому ядерно-магнітні витратоміри застосовують для вимірювання витрати в трубах діаметром не більше 100-150 мм.

1.5 Концентраційні витратоміри

1.5.1 Концентраційні витратоміри

Концентраційні витратоміри

Концентраційні витратоміри засновано на залежності від витрат кратності розбавлення речовини індикатора, який вводиться в потік. 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.

Використання концентраційного методу є доцільним при разових вимірах великих витрат в закритих і відкритих каналах, а також під час перевірки інших витратомірів (наприклад, труб Вентурі), так як при цьому не потрібен їх демонтаж. 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.

Витратоміри з безперервним введенням речовини-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 такого, 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:

$$Q_0 c_0 + Q_i c_i = (Q_0 + Q_i) c_x, \quad (1.43)$$

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

Розв'язавши рівняння (1.43) відносно об'ємної витрати Q_0 отримаємо:

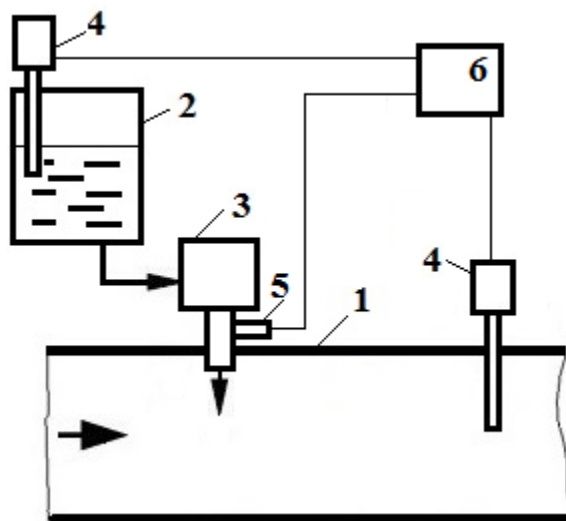
$$Q_0 = Q_i (c_i - c_x) / (c_x - c_0). \quad (1.44)$$

З урахуванням того, що $c_0=0$ і $c_x \ll c_i$ формула (1.44) прийме вигляд:

$$Q_0 = Q_i c_i / c_x. \quad (1.45)$$

Звідси витікає, що для точного визначення витрати Q_0 необхідне точне визначення малих концентрації c_x (а при необхідності і концентрації c_0 , якщо вона відрізняється від нуля), що часто викликає певні труднощі. Для цієї мети в залежності від індикатора застосовують різні методи: хімічна 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.

Концентраційний витратомір складається з пристрою для введення індикатора в потік при одночасному вимірі його витрати Q_i (або кількості) і пристрої для вимірювання концентрації c_x в потоці після його перемішування. Для введення рідинних, в тому числі і радіоактивних розчинів індикатора, застосовують поршневі або ротаційні насоси дозатори. Нерідко розчин з дозатора вводять не безпосередньо в потік, а в проміжну ємність (або трубу) з водою, де розведення індикатора доводять до співвідношення 1: 1000. Цей розбавлений розчин і подається в потік. В результаті скорочується необхідна довжина якісного перемішування.



1 – трубопровід; 2 – посудина; 3 – насос дозатор; 4 – кондуктометричний перетворювач; 5 – лічильник;

6 – вимірювальний блок

Рисунок 1.85 – Скелетна схема концентраційного витратоміра з безперервним введенням індикатора

Скелетна схема концентраційний витратоміра з безперервним введенням індикатора показана на Рисунок 1.85.

Розчин індикатора з посудини 2 за допомогою насоса дозатора 3 подається в потік, що протікає по трубопроводу 1. Об'ємна витрата індикатора Q_i , введенного в потік контрольованої речовини контролюється лічильником 5, а його концентрація c_i кондуктометричним перетворювачем 4, що встановлений в посудині 2. 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 концентрація 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 ($L \approx 30-50D$) можна досягти рядом заходів (наприклад, з використанням місцевих опорів, введенням індикатора проти потоку з великою швидкістю тощо). В стандартах ІСО наведені формули теоретичного визначення відносної довжини ділянки L/D .

Витратоміри з короткочасним (залповим) введенням речовини індикатора

Принцип дії у цих витратомірів такий же, як і 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 при великих витратах вимірюваної речовини. Він може бути рекомендований при вимірюваннях, які не потребують особливо високої точності. Залповий метод можна реалізувати за допомогою компактною і малогабаритною вимірювальною установкою.

1.5.2 Міткові витратоміри

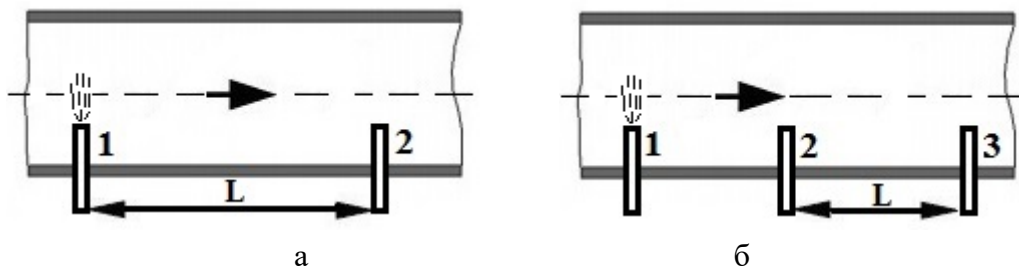
Мітковими називають витратоміри, засновані на вимірі часу переміщення будь-якої характерною частини (мітки) потоку на контрольній ділянці шляху.

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 при високій частоті утворення міток можна говорити про практично безперервне вимірювання витрати. 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 $(2-3) \%$ 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 (Рисунок 1.86- а) контрольною відстанню L вважається відстань від місця введення мітки 1 до детектора 2, у другому (Рисунок 1.86-б) – відстань між двома детекторами 2 і 3.



1 – місце введення мітки; 2, 3 – детектори

Рисунок 1.86 – Схеми міткових витратомірів: а – з одним детектором; б – з двома детекторами.

Швидкість мітки визначається з виразу: $V=L/\Delta\tau$ (де $\Delta\tau$ – вимірний час проходження міткою контрольної ділянки L).

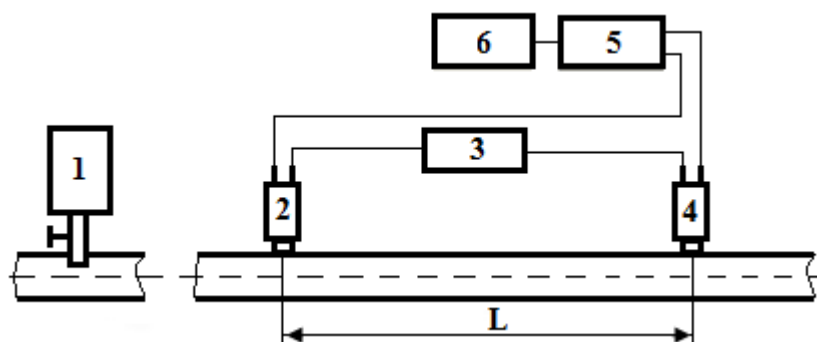
Об'ємну витрату визначають за формулою:

$$Q_0 = kLS / \Delta\tau, \quad (1.46)$$

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

Прилади з радіоактивними мітками

Радіоактивні мітки у вимірюванні речовини створюють шляхом введення в неї того чи іншого ізотопу. Зазвичай використовують γ -випромінювання, що добре проникає через стінки труби. Це дозволяє легко проконтролювати прохід мітки через перерізи контрольної ділянки. Схема витратоміра для рідин з радіоактивними мітками показана на Рисунок 1.87.



1 – пристрій для введення радіоактивного ізотопу; 2, 4 – детектор; 3 – схема; 4 – труба обводу; 5 – підсилювач; 6 – вимірювальний прилад

Рисунок 1.87– Схема витратоміра для рідин з радіоактивними мітками

У вимірювану рідину ізотопи вводять вигляді розчинів за допомогою пристрою 1. Проходження мітки через контрольну ділянку довжиною L фіксується детекторами 2, 4. Зазвичай в якості детекторів мітки застосовують лічильники. При незначних діаметрах D трубопроводу детектори встановлюють зовні трубопроводу на кінцях контрольної ділянки. При великому ж діаметрі D доцільно проводити безперервний відбір проб з контрольних перерізів через спеціальні трубки.

Прилади з радіоактивними мітками застосовують для вимірювання витрати як рідин і газів, навіть коли останні іонізовані.

Витратоміри з фізико-хімічними мітками

Витратоміри з фізико-хімічними мітками також можуть служити для вимірювання витрати як рідин, так і газів, але вибір індикаторів в цьому випадку обмежений. Так, для вимірювання витрати води зазвичай застосовують лише сольові мітки. Існує ряд досліджень щодо застосування сольових міток для вимірювання витрати води в трубопроводах діаметром 200 і 1000 мм, в лініях подачі води до гідравлічних турбін круглого діаметру (3500, 4000, 6000 мм) і в лініях подачі води прямокутного перерізу (площа перерізу від 31 до 59 м²).

При вимірювання витрати газу фізико-хімічні мітки застосовують дуже рідко, але при цьому асортимент міток більший (фреон, гелій, чотирьох хлористий вуглець, галоїдні мітки тощо).

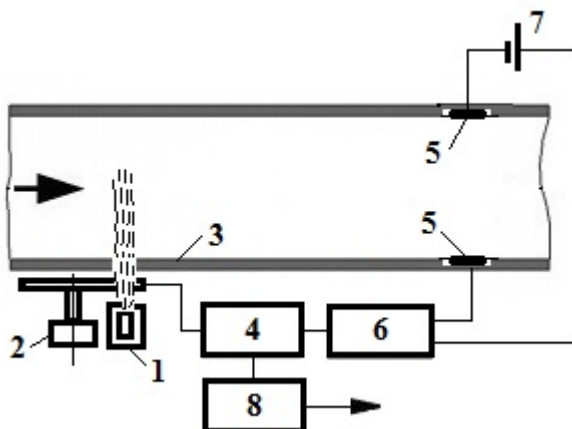
Витратоміри з іонізаційними мітками

Ці витратоміри застосовують переважно для вимірювання витрати або швидкості газу, в якому мітки створюються шляхом періодичної або, рідше, безперервної його іонізації. Мітки створюються або іонізуючим випромінюванням, зазвичай за допомогою радіоактивного ізотопу, або ж електричним розрядом. У першому випадку мітки виникають по всьому перерізу потоку, і вони призначені лише для вимірювання витрати газу. В іншому випадку мітки утворюються в обмеженій частини потоку, і вони слугують для вимірювання місцевої швидкості або витрати. Значно рідше

зустрічаються прилади для вимірювання витрати рідкого діелектрика. В цьому випадку мітка створюється шляхом поляризації рідини в електричному полі.

Іонізаційні мітки внаслідок дифузії і особливо рекомбінації іонів мають досить короткий термін існування. Тому довжина контрольної ділянки та час переміщення по ньому повинні бути малими. Зазвичай довжина контрольної ділянки приблизно дорівнює 1 м і менше. У зв'язку з цим частіше застосовують схему з одним а не з двома контрольними перерізами (детекторами).

Схема витратоміра з ізотопом, що розміщений зовні трубопроводу показана на Рисунок 1.88.



1 – контейнер з ізотопом; 2 – обтюратор; 3 – трубопровід; 4 – мультивібратор; 5 – електроди; 6 – підсилювач; 7 – джерело живлення; 8 – схема оброблення сигналу

Рисунок 1.88 – Схема витратоміра з ізотопом, що розміщений зовні трубопроводу.

У контейнері 1 поміщений ізотоп. Обтюратор 2, що обертається з постійною швидкістю, періодично пропускає через стінку 3 трубопроводу пучок β -променів, які утворюють в газі іонні мітки. Одночасно обтюратор посилає імпульс на мультивібратор 4. Останній відмикається, і починається відлік часу. На кінці контрольної ділянки знаходяться два електроди 5. Електроди 5 включені послідовно в ланцюг джерела живлення 7 і підсилювача 6. Джерело живлення 7 створює на електродах різницю потенціалів (ця різницю обирають з урахуванням максимальної швидкості руху газу в трубопроводі). При проходженні мітки між електродами в ланцюзі виникає імпульс струму, який, пройшовши через підсилювач 6, замикає мультивібратор 4, повертаючи його в початкове положення (відлік часу закінчився). Очевидно, що тривалість імпульсів на виході мультивібратора дорівнює часу переміщення мітки на контрольній ділянці від місця її утворення до електродів. Подальше перетворення цих імпульсів відбувається за допомогою схеми оброблення сигналу 8, яка і формує корисний сигнал.

Значно рідше зустрічаються міткові витратоміри з ізотопом, що розташований в середині трубопроводу. Мітки також можуть створюватись і електричним розрядом.

Витратоміри з іонізацією потоку електричним полем застосовуються для вимірювання швидкостей та витрат газів, а також діелектричних рідин. У газів іонізаційна мітка створюється іскровим або коронним електричним розрядом, а у діелектричній рідині – її поляризацією в електричному полі. При електричному розряді утворюється невелика іонна хмарка, сумарний заряд якої позитивний. Вимірюючи швидкість переміщення цієї хмарки, можна судити про місцеву швидкість потоку. При іскровому розряді частіше застосовують схему з двома контрольними перерізами, при коронному розряді – схему з одним контрольним перерізом.

Витратоміри з тепловими мітками

Витратоміри з тепловими мітками можна застосовувати для вимірювання витрати як рідини, так і газу. Вони складаються з нагрівача, що створює теплову мітку, і термоперетворювачів для вимірювання часу переміщення мітки на контрольній ділянці. Іноді нагрівач відсутній. В цьому випадку термоперетворювачі служать для вимірювання часу переміщення випадкових теплових неоднорідностей, що наявні в потоці. Є витратоміри, у яких нагрівач розташований як зовні, так і всередині трубопроводу.

Запропоновано декілька різновидів витратомірів з зовнішнім розташуванням нагрівача. В них теплова мітка створюється випромінювачем інфрачервоного діапазону або надвисокочастотного діапазону, що розташовані на зовнішній поверхні труби. Іноді застосовують витратоміри, у яких теплова мітка створюється нагрівальним елементом, зазвичай дрововим, що знаходиться всередині вимірюваної речовини. Якщо струм подається на нагрівач у вигляді окремих імпульсів, то утворюються мітки, швидкість яких дорівнює місцевій швидкості потоку. Якщо ж струм змінюється за синусоїдальним законом, то виникає температурне поле, що рухається зі швидкістю потоку. На контрольній відстані L знаходиться малоінерційний термоперетворювач, що фіксує момент приходу мітки. У деяких випадках в трубопроводі утворюється теплова мітка шляхом введення в нього порції рідини або газу, що нагріваються в особливій ємності, розташованій поза даним трубопроводом.

Розвиток безконтактного теплового методу в напрямку синтезу інтелектуальних багатоканальних теплових витратомірів дозволило істотно підвищити їх метрологічні характеристики при вирішенні складних завдань вимірювання витрати.

Витратоміри з оптичними мітками

За оптичні мітки можна використати або речовини-індикатори, що вводяться в потік, або ж частинки, що присутні в потоці, і відмінні за своїми оптичними властивостями від решти вимірюваної речовини.

У великих і середніх трубопроводах оптичні мітки займають лише деяку частину потоку. У малих трубах (діаметром менше 10 мм) кожна мітка може цілком перекривати переріз потоку.

Речовинами-індикаторами, що створюють оптичні мітки, можуть бути алюмінієва стружка, плексігласовий або алебастровий порошок, полістиролові частинки сферичної форми діаметром близько 1 мм і тому подібні. Крім того, для цієї ж мети можуть слугувати пофарбовані рідини і різні емульсії, наприклад емульсія з вазелінового масла і хлорбензолу, яка в потоці води перетворюється в кульки діаметром 2-2,5 мм. важливо, щоб густини індикатора і вимірюваної речовини були близькі. Наприклад, частинки полістиролу після обробки їх ацетоном мають густину, майже рівну густині води.

Існують різні способи утворення оптичних міток саме у вимірюваній речовині. Якщо потік містить флуоресцентні частинки, то мітки в ньому можуть бути створені періодичним випромінюванням через прозорі вікна у трубопроводі.

Запропоновано також різні оптико-механічні системи для контролю за оптичними мітками. Так, за допомогою лазера і оптичної системи, що утворює в газопроводі два світлових променя на близькій відстані один від одного, можна контролювати час перетину цих променів механічними частинками, що містяться в газі.

Витратоміри з електромагнітними мітками

У цих витратомірах є котушка-лічильник, розташована поруч з трубопроводом або намотана на нього, яка в залежності від властивостей вимірюваного речовини створює струмову або магнітну мітку. При проході мітки через контрольне переріз, де розташована друга котушка, в останній виникає імпульс струму. Час переміщення мітки на контрольній ділянці визначається за різницею між часом появи імпульсу в другій котушці і часом подачі збудливого імпульсу в першу котушку.

У розглянутих приладах є котушка, яка створює мітку, і розташована поруч з трубопроводом або намотана на нього. Ця котушка, в залежності від властивостей вимірюваної речовини, створює струмову або магнітну мітку. При проходженні мітки через контрольний переріз, де розташована друга котушка, в останній виникає імпульс струму. Час переміщення мітки на контрольній ділянці визначається за різницею між часом виникнення імпульсу в другій котушці і часом подачі збудливого імпульсу в першу котушку.

Витратоміри з ядерно-магнітними мітками

Прилади з ядерно-магнітними мітками засновані на явищі ядерно-магнітного резонансу. Їх застосовують для рідин, що мають велике гіромагнітне відношення, і лише для труб, діаметр яких не більше 100 -150 мм.

1.5.3 Кореляційні витратоміри

Методи визначення витрати, які отримали назву кореляційних, інтенсивно розвиваються останнім часом для вимірювання витрати різних однофазних і багатофазних середовищ. Кореляційний витратомір є подальшим розвитком міткового витратоміра, принцип дії якого заснований на залежності визначення часу переміщення на заданій ділянці шляху мітки, що введена в потік контрольованої речовини, і який залежить від витрати рідини. Принцип дії цих витратомірів полягає у визначенні швидкості потоку, як відношення довжини ділянки L до часу його проходження міткою Δt . Відмінність цих витратомірів в наступному:

- в кореляційному витратомірі, на відміну від міткового мітка не створюється штучно, а є випадковою величиною (носить випадковий характер);
- в 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.

Особливо близькі до міткових ті кореляційні витратоміри, у яких випадкові процеси створюються штучним шляхом.

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).

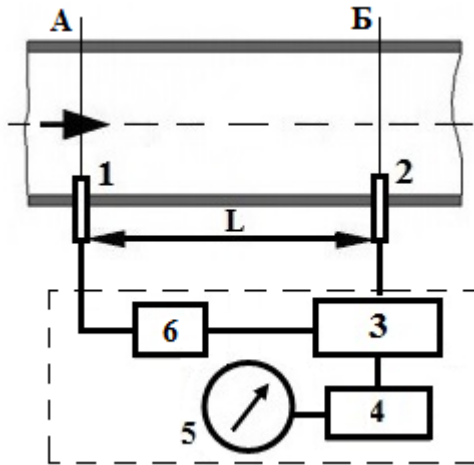
Більшість однофазних потоків, не кажучи вже про багатофазні, не строго однорідні. Тому ті або інші властивості або параметри потоку (густина, електрична провідність, температура і т. п.) безперервно змінюються випадковим чином. Якщо за допомогою корелометра визначити абсцису максимальної ординати взаємної 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 Δt переміщення потоку на вказаній відстані.

Об'ємну витрату Q можна визначити за формулою: $Q_0 \approx SL / \Delta t$. Насправді середній час руху елементарних об'ємів рідини від одного перетворювача до іншого може відрізнятися від Δt . Тому витрати визначають, вводячи

калібрувальний (поправочний) коефіцієнт k і отримують наступну залежність: $Q_o = kSL / \Delta t$.

Схему кореляційного витратоміра показано на Рисунок 1.89.

На трубопроводі в двох перерізах А і Б уздовж по напрямку потоку встановлені два перетворювача витрати. Випадково розподілені фізичні неоднорідності потоку рідини сприймаються перетворювачами витрати 1 та 2 і перетворюються в електричні сигнали $x(t)$ і $y(t)$, що надходять на корелометр 3-6. Сигнали $x(t)$ і $y(t)$, що вироблені перетворювачами, зображено на Рисунок 1.90- а.



1, 2 – перетворювачі витрати; 3 – помножувальний блок; 4 – блок інтегрування; 5 – вимірювальний прилад; 6 – блок часового зсуву

Рисунок 1.89 – Схема кореляційного витратоміра.

Відстань L між перерізами А і Б становить зазвичай від одного до п'яти діаметрів трубопроводу. Сигнали, що вироблені цими перетворювачами $x(t)$ і $y(t)$ носять випадковий характер, але, завдяки порівняно невеликій відстані між перерізами А і Б, вони мають взаємозв'язок (кореляційний зв'язок). Цей взаємозв'язок носить не детермінований, а випадковий характер.

Форма сигналу $x(t)$ випереджає форму сигналу $y(t)$ на час Δt , необхідний для переміщення частинок потоку від перерізу А до перерізу Б. Для вимірювання цього часу слугує корелометр 3-6, який включає блоки 3, 4, 6 та вимірювальний прилад 5. Блок 6 перетворює сигнал $x(t)$ у сигнал $x(t-\tau)$.

Він має регульовальний пристрій, який дозволяє змінювати час затримки τ . Блок множення 3 формує добуток сигналів $x(t-\tau)$ $y(t)$. Блок 4 інтегрує цей добуток і обчислює його середнє значення $R_{xy}(\tau)$ за певний період часу T . Значення кореляційної функції $R_{xy}(\tau)$ визначається рівнянням:

$$R_{xy}(\tau) = \lim(1/T) \int_0^T x(t-\tau) y(t) dt \quad (1.47)$$

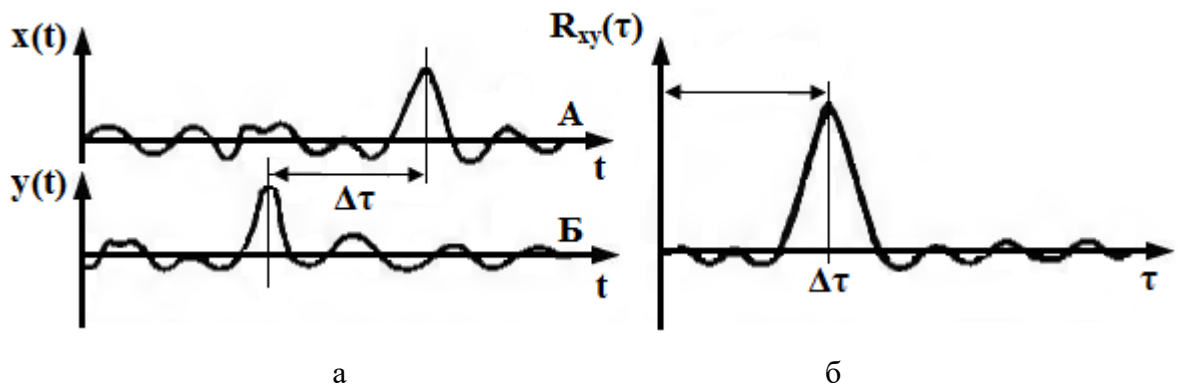


Рисунок 1.90 – Вигляд сигналів $x(t)$ і $y(t)$ від перетворювачів витрати (а) та кореляційної функції $R_{xy}(\tau)$ (б) кореляційного витратоміра.

Значення кореляційної функції $R_{xy}(\tau)$ слугує мірою лінійного статистичного взаємозв'язку цих сигналів, яка є математичним очікуванням добутку двох випадкових функцій $x(t)$ і $y(t)$. Оцінка математичного очікування обчислюється в корелометрі за формулою (1.47).

При певному значенні τ взаємна кореляційна функція $R_{xy}(\tau)$ досягає максимального значення (Рисунок 1.90-б). Координата максимуму по осі часової затримки τ (це $\Delta\tau$) інтерпретується як час проходження потоком відстані L між перетворювачами витрати 1 та 2 (від перерізу А до перерізу Б). Вимірюючи цю часову затримку, відповідну максимуму, можна знайти витрату.

Для обчислення кореляційної функції $R_{xy}(\tau)$ і визначення часу $\Delta\tau$ застосовують також схему корелометра, що ґрунтується на трансформації сигналів $x(t)$ і $y(t)$ у ряди Фур'є та одержанні взаємного спектра цих сигналів.

Кореляційні витратоміри можна застосовувати для вимірювання витрати забруднених середовищ, багатофазних потоків і розплавлених металів, вони не призводять до втрати тиску, у більшості випадків не контактують із вимірюваною речовиною, що є їх суттєвими перевагами.

Недоліки кореляційних витратомірів: вимушена збільшена тривалість процесу вимірювання (зі зменшенням часу вимірювання похибка вимірювання зростає); обмежена точність (зазвичай похибка вимірювання витрати не менша за 1.5...2 %). Перед перетворювачами кореляційного витратоміра треба мати пряму ділянку труби, довжина якої після коліна має бути не меншою за (5... 10) D (D – діаметр трубопроводу).

Залежно від виду і способу вимірювання параметрів, випадкові коливання яких контролюються, існує багато різних варіантів їх конструкцій.

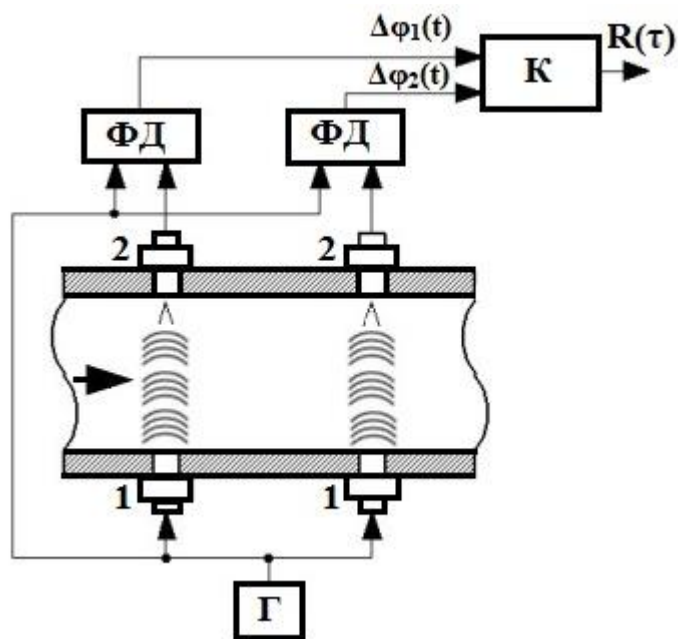
Один із найбільш розповсюджених промислових кореляційних витратомірів є **ультразвуковий кореляційний витратомір**.

В обох контрольних перерізах зовні або всередині трубопроводу встановлюють випромінювачі акустичних коливань частотою 0,3-1 МГц. Ці коливання спрямовані перпендикулярно до осі труби й сприймаються п'єзоперетворювачами, що знаходяться на протилежному боці труби. Присутність в рідині різних неоднорідностей у вигляді твердих частинок або газових бульбашок викликає в результаті поглинання і розсіяння ослаблення акустичних коливань, що надходять на приймальні перетворювачі, які через інші пристрої (фазові детектори, підсилювачі, демодулятори, фільтри тощо) сполучені з корелометром. Турбулентність зміщує промінь, це модулює по фазі сигнал приймача.

Схема ультразвукового кореляційного витратоміра показана на Рисунок 1.91.

Витратомір має два акустичні випромінювачі 1 та два приймачі 2. Сигнали ультразвукової частоти надходять від генератора Г на випромінювачі 1. Ультразвукові коливання спрямовані перпендикулярно до осі трубопроводу й сприймаються приймачами 2, що знаходяться на протилежному боці труби.

Прийняті ультразвукові сигнали демодулюються і обробляються, з використанням кореляційного алгоритму. Вторинні коливання, які накладаються на основні, через фазові детектори ФД поступають в корелометр К, що керований мікропроцесором.



1 – випромінювач; 2 – приймач; Г – генератор;
ФД – фазовий детектор; К – корелометр

Рисунок 1.91 – Схема ультразвукового кореляційного витратоміра.

можуть знаходитись іззовні трубопроводу. Це пов'язано з тим, що при застосування накладних ультразвукових перетворювачів для вимірювання витрати газу є труднощі передачі ультразвукового сигналу: через стінку металевої труби, через газ і потім назад через стінку труби до приймача, що приймає цей сигнал. У газах тільки $4,9 \cdot 10^{-7}\%$ переданої звукової енергії реально приймається традиційними ультразвуковими перетворювачами. Цього недостатньо для виконання надійних вимірювань.

Накладні ультразвукові перетворювачі для газів нового покоління створюють в 5-10 разів більш потужні сигнали (та з мінімальним рівнем фоновому шуму), ніж у традиційних ультразвукових перетворювачів, що сприяє їх широкому використанню. Крім того, накладні ультразвукові перетворювачі не створюють перешкод руху потоку і їх установка не призводить до втрат тиску, а також не дають можливості накопичуватися забрудненням в місцях їх установки. При цьому операції з їх технічного обслуговування спрощуються.

Іонізаційний кореляційний витратомір складається з джерел радіоактивного випромінювання, що встановлюються з одного боку труби, і приймачів – зазвичай сцинтиляційних лічильників, що розташовуються з іншого боку. Подібні витратоміри придатні для вимірювання газу, що містить тверді частки, але застосовуються порівняно рідко, так як вимагають

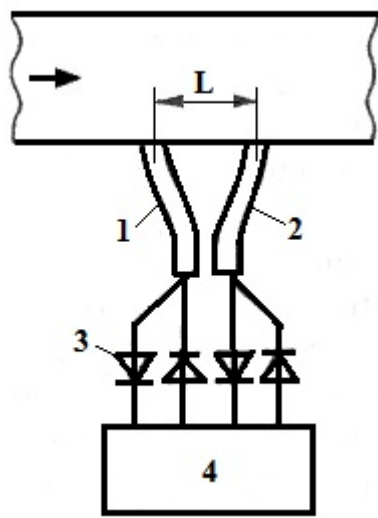
В результаті забезпечується отримання сигналу, пропорційного витраті.

Такі витратоміри можуть встановлюватися в трубопроводах діаметром від 50 до 4000 мм при швидкості середовища від 0.1 до 10 м/с, відносна похибка в межах 1,5-2%.

Ультразвукових перетворювачів можуть встановлюватись як всередині трубопроводу так іззовні (накладні ультразвукові перетворювачі). Раніше вважалося, що ультразвукові перетворювачі у випадку вимірювання витрат газу не

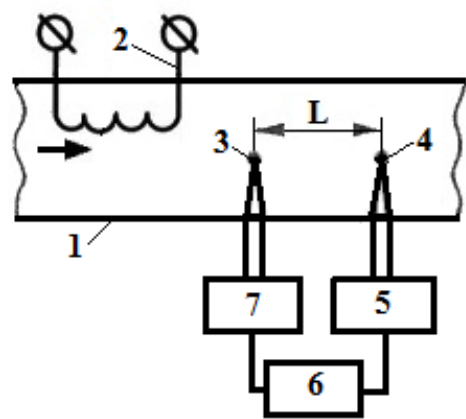
потужних джерел радіації, щоб приймальний пристрій міг реагувати на високочастотний вимірювальний сигнал.

Оптичні кореляційні витратоміри є різновидом приладів, в яких сторонній промінь, що пронизує трубопровід, модулюється неоднорідностями потоку. Прилади знайшли переважне застосування для вимірювання витрати рідини у відкритих потоках, де світлові промені відбиваються від нерівностей, що наявні на поверхні рідини. Але їх з успіхом можна застосовувати і для вимірювання витрати гідросумішей, що рухаються в трубопроводах, наприклад целюлозної пульпи. Схема оптичного кореляційного витратоміра показана на Рисунок 1.92-а.



а:

1, 2 – світловод; 3 – світлодіоди;
4 – вимірювальна схема



б:

1– трубопровід; 2 – нагрівач; 3, 4–
термодатчики; 5, 7 – підсилювачі;
6 – корелометр

Рисунок 1.92 – Схема оптичного кореляційного витратоміра (а) та теплового кореляційного витратоміра (б).

У контрольних перерізах, що розміщені близько один від одного, поміщають волоконно-оптичні світловоди 1 і 2 виконані з волоконної оптики. Світлодіоди 3 посиляють через ці світловоди промені світла, які відбиваються частинками речовини (наприклад, целюлози). Відбиті промені повертаються цими світловодами і сприймаються фотоперетворювачами, сигнали яких після проходження через попередній підсилювач надходять у вимірювальну схему 4. Прилад призначений для вимірювання витрати целюлозної пульпи за її температури до 100 °С і тиску до 1 МПа. Похибка становить 1 %. Досягненню високої точності вимірювання сприяє, як показує досвід, рівномірний профіль скоростей пульпи.

Діелектричні кореляційні витратоміри – це витратоміри що реагують на зміну ємності. Такі витратоміри мають в кожному контрольному перерізі по електроду у вигляді тонкого півкільця, яке ізольоване від труби і не виступає за її поверхню. Заземлений трубопровід сам утворює протилежні електроди.

Такі витратоміри доцільні для вимірювання витрати повітряних потоків, що переносять порошкоподібні (цемент, борошно тощо), гранулометричні (зерно, гранульовані міндобрива тощо) та кускові матеріали.

Кондуктометричні кореляційні витратоміри – це витратоміри засновані на вимірюванні зміни електропровідності і мають в кожному контрольному перерізі по електроду. Вони придатні для вимірювання витрати різних пульп, а також сумішей двох рідин за умови, що компоненти мають різну електричну провідність. Їх вимірювальні схеми прості, і вони простіші та дешевші, за ультразвукові витратоміри, які також придатні для вимірювання витрати пульп. Але кондуктометричні кореляційні витратоміри не можна застосовувати, якщо у контрольованій рідині випадають осади, що заліплюють електроди, чим змінюють їх опір.

Електростатичні кореляційні витратоміри – це витратоміри, засновані на детектуванні електростатичних зарядів, які є у твердих частинок, що рухаються в повітряному потоці. Вони мають приймальні пластини (як у діелектричних витратомірах), і їх можна використовувати для вимірювання витрати газу при дуже малому вмісті в ньому твердих частинок. Для рідин з низькою електропровідністю є кореляційні витратоміри, засновані на вимірі пульсацій густини електричних зарядів, які зносить турбулентний потік.

Для розплавлених металів можливе застосування кореляційних витратомірів, заснованих на вимірі переміщення гідродинамічних неоднорідностей типу вихорів, що виникають в місцевих опорах. Детекторами можуть слугувати два електромагнітні перетворювача витрати, перший з яких установлений поблизу місцевого опору, а другий – на відстані 5-10 діаметрів трубопроводу.

У всіх розглянутих варіантах кореляційних витратомірів контролюються випадкові процеси, що виникають за рахунок неоднорідностей, наявних в вимірюваному речовині. Поряд з ними є кореляційні витратоміри, в яких ці неоднорідності створюються штучно. До них відносять **теплові** і **електролітичні** кореляційні витратоміри. Вони призначені для вимірювання витрати строго гомогенних однофазних речовин.

Схема теплового кореляційного витратоміра показана на Рисунок 1.92-б.

У трубопроводі 1 поміщений нагрівач 2, струм у якому змінюється випадково (наприклад, через зміну напруги живлення або шляхом частого вимикання через різні проміжки часу генератора псевдовипадкових сигналів). Далі за напрямом потоку встановлені дві термопари 3 і 4 на відстані L одна від одної. Вони через підсилювачі 5 і 7 зв'язані з корелометром 6.

Поряд з розглянутим приладом є теплові кореляційні витратоміри без джерела, що створює штучну неоднорідність потоку (нагрівач). Для однієї з таких виявилася достатньою невелика неоднорідність температурного поля після теплообмінника, що викликала різницю температур від 0,01 до 1°C. Як

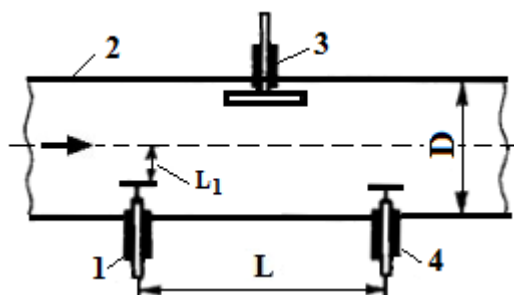
термоперетворювачі використовували малоінерційні термопари (віддалені одна від одної на 100-150 мм) . Похибка вимірювання становить (3-5)%.

В іншій схемі в контрольних перерізах були встановлені дротяні перетворювачі термоанемометрів, що нагріваються струмом, який пропускали через них. Випадкові зміни швидкості повітряного потоку, наприклад турбулентні вихорі, мінятимуть теплопередачу від перетворювачів термоанемометрів (і відповідно сигнал, що виробляється ними). При діаметрі труби 94 мм відстань між перетворювачами становила від 100 до 500 мм.

Є також теплові кореляційні витратоміри, де в контрольних перерізах встановлені терморезистори.

Теплові кореляційні витратоміри знайшли застосування на атомних електростанціях.

Схема електролітичного кореляційного витратоміра, призначеного для вимірювання витрати електропровідних однофазних рідин, зображена на Рисунок 1.93.



1, 4—електроди; 2 – скляна труба; 3 – загальний електрод

Рисунок 1.93 – Схема електролітичного кореляційного витратоміра

Електроди 1 і 4 встановлені в скляній трубі 2 діаметром D ($D=25\text{мм}$) на відстані L ($L=27\text{ мм}$) один від одного та на відстані L_1 від осі труби ($L_1=0,85R$, R – радіус труби). На протилежному боці труби поміщений загальний електрод 3. Випадкові турбулентні вихорі при проходженні повз електроди 1 і 4 будуть зривати на них шари газових бульбашок, які утворюються при проходженні струму через електроди, чим змінювати опір ланцюга. Щоб уникнути поляризації електродів їх живлять змінним струмом. За зміною опору електричного ланцюга і визначається витрата.

1.5.4 Інші витратоміри

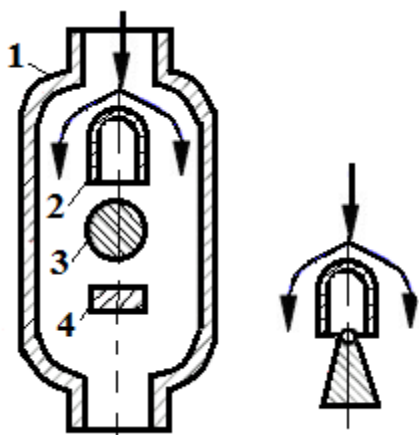
До групи приладів, що засновані на особливих методах, також відносять [2, 14] наступні: з тілом, що автоколивається; з рухомою ділянкою трубопроводу; струменеві витратоміри.

Витратоміри з тілом, що автоколивається

Витратоміри з тілом, що автоколивається, засновані на вимірюванні частоти коливань тіла, які викликаються при обтіканні його потоком рідини

або газу. Ці прилади можна розглядати і як окремий випадок приладів з безперервно рухомим тілом.

Схему витратоміра з тілом, що автоколивається, показано на **Рисунок 1.94**.



1 – корпус; 2 – обтічник; 3 – кулька; 4 – опора

Рисунок 1.94 – Схема витратоміра з тілом, що автоколивається

Перетворювач витрати складається з прямокутного корпусу 1, обтічника 2, кульки 3 і опори 4. Рідина, яка надходить зверху в корпус 1, розділяється обтічником 2 на два прямокутних потоки. Якщо зазори між кулькою 3 і корпусом 1 досить малі, то кулька 3 під дією оточуючого його потоку починає коливатися в площині, перпендикулярній до напрямку потоку. В цьому випадку частота коливань зростає з ростом витрат. У початковому положенні кулька не займає якогось строго визначеного. Нехай з цього початкового положення під дією

випадкових причин при обтіканні її рідиною кулька зміститься, наприклад, вліво. Це призведе до звуження лівого зазору, а отже і до зростання тиску в ньому. Під дією тиску, що підвищився, кулька зміститься вправо і звужить тепер правий канал. Тиск в правому каналі підвищиться і перемістить кульку вліво, після чого кулька прийде в коливальний рух. Перетворення частоти коливань кульки в електричний сигнал здійснюється за допомогою індуктивного перетворювача. Цей сигнал буде пропорційний витраті, що протікає через трубопровід.

Перетворення частоти коливань кульки або призми в електричний сигнал здійснюється за допомогою індуктивного перетворювача переміщення.

У першому витратомірі, побудованому на даному принципі, тілом що здійснює коливальні рухи була тригранна призма (Рисунок 1.94), яка була підвішена до осі в своїй верхній частині. Перетворення частоти коливань призми відповідало витраті речовини.

Об'ємна витрата Q_0 визначається за формулою:

$$Q_0 = k \cdot f,$$

де f – частота коливань тіла; k – коефіцієнт, який залежить від геометрії проточної частини, маси тіла, що коливається, густини і в'язкості рідини. Порушення лінійної залежності між Q_0 та f спостерігається під впливом в'язкості в початковій частині діапазону вимірювання. Чим менше в'язкість рідини тим відхилення буде меншим. В іншій частині діапазону вимірювання коефіцієнт k зберігає постійне значення.

До переваг цих приладів відносять: високу точність; малу інерційність; невелику похибку, що не перевищує 0,5% від верхньої межі вимірювання.

Мінімальні витрати, що вимірюють приладом з кулькою діаметром 1,6 мм, складають $(0,3 - 0,5) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 / \text{с}$. Нормальне розташування перетворювачів витрати вертикальне. При кутах нахилу осі щодо вертикалі не більше 10° градування не змінюється, але при великих нахилах спостерігається паралельне зміщення градування. Найбільше зміщення буде при горизонтальному положенні перетворювача.

Область застосування витратомірів з тілом, що автоколивається: дані витратоміри насамперед призначені для вимірювання витрати рідини, але можливе створення аналогічних приладів і для вимірювання витрати газу. При цьому кульку доцільно виконувати порожнистою або ж з пластмаси, для того, щоб знизити її густину.

Витратоміри з рухомою ділянкою трубопроводу

Принцип дії витратоміра даного типу заснований на вимірюванні залежного від витрати зусилля, з яким рухомий потік впливає на закруглену ділянку трубопроводу.

Це зусилля може вимірюватися двома способами:

- за значенням компенсаційної сили, що утримує закруглену ділянку трубопроводу від переміщення;
- довжиною переміщення цієї ділянки, що має гнучкий зв'язок з трубопроводом.

Ділянку, що має гнучкий зв'язок з трубопроводом, роблять в двох конструктивних виконаннях (Рисунок 1.95): в вигляді подвійного S-подібного коліна або ж у вигляді горизонтально спрямованої петлі U-подібної форми. Така петля за допомогою сильфонів (Рисунок 1.95-в) зв'язана з трубопроводом і переміщається в горизонтальному напрямку, при виникненні витрати.

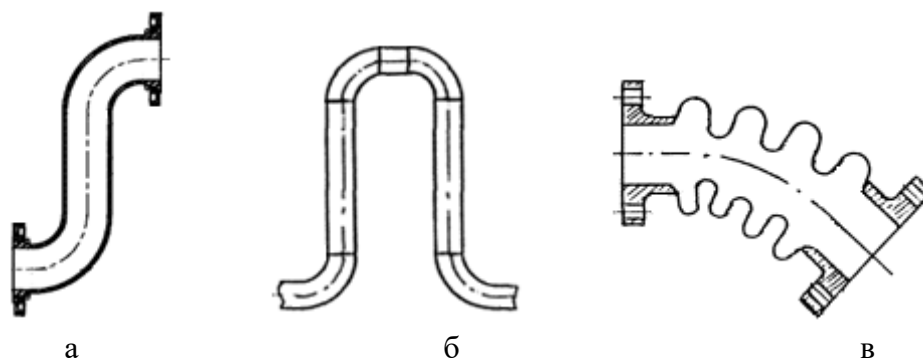


Рисунок 1.95 – S-подібне коліно (а), петля U-подібної форми (б) та елемент гнучкого з'єднання за допомогою сильфону

Подвійне S-подібне коліно при виникненні витрати повертається навколо центральної точки. Гнучку ділянку труби з'єднано з рухомим елементом перетворювача лінійного переміщення (наприклад, диференціально-трансформаторного) або перетворювача кута повороту (наприклад, сельсина). Вихідний сигнал цих перетворювачів найчастіше слугує для безпосереднього визначення витрати потоку. Гнучкі елементи, які пов'язують

рухому ділянку з трубопроводом, повинні мати високі пружні властивості, тому що їх сили пружності повинні врівноважувати тиск потоку на закругленій ділянці трубопроводу.

Вихідний сигнал можна використовуватися і для управління компенсаційною схемою, яка за допомогою додаткового джерела енергії створює силу, що компенсує силовий вплив потоку на закруглену ділянку трубопроводу. Врівноваження досягається за допомогою цієї компенсуючої сили.

Такі витратоміри кращі. В одному з таких витратомірів при повороті S-подібного подвійного коліна включається механізм, який закручує протидіючу спіральну пружину, поки S-подібне коліно не повернеться в практично початкове положення. У комплект такого витратоміра входить і радіоізотопний густиномір, завдяки якому прилад показує масову витрату в межах від 0,3 до 33 кг/хв. Похибка приладу 0,75%. Цей прилад цілком підходить для вимірювання витрати багатофазних агресивних і радіоактивних речовин.

У більшості випадків похибка вимірювання у витратомірів з рухомою ділянкою труби без компенсаційної схеми більша.

Існують витратоміри з рухомою ділянкою трубопроводу, які складаються з двох послідовних U-подібних петель. Перша петля по ходу потоку, розташована у вертикальній площині, і яка впливає на мембранно-гідрравлічний перетворювач. Друга петля – додаткова, яка перебуває в горизонтальній площині, передає свою вагу на розташований під нею динамометричний перетворювач маси вимірюваної речовини. Дослідження показали, що похибка вимірювання витрати такими приладами складає близько 5%.

Також існують витратоміри, в яких вимірюється зусилля, що виникає на заокругленій ділянці труби при переході з більшого діаметру на менший. Таку ділянку труби виконують рухомою.

Струменеві витратоміри

Витратоміри даного виду служать для вимірювання витрати або швидкості. Головним елементом перетворювача у таких приладів є витікаючий струмінь рідини або газу. Саме тому ці витратоміри називають струменевими.

Струменеві витратоміри поділяють на три групи, в кожній з яких функція витікаючого струменя різна.

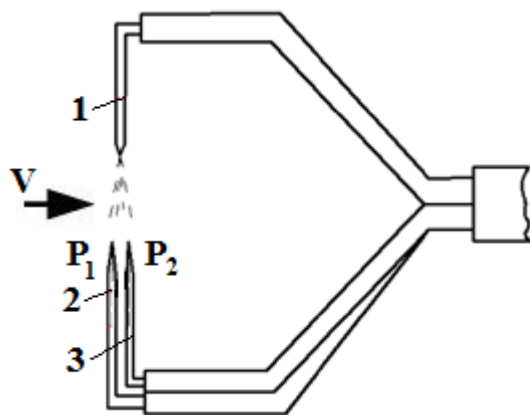
Прилади першої групи – витратоміри з осцилючим струменем, які є одним з різновидів вихрових витратомірів. Частота коливань даних приладів пропорційна об'ємній витраті. Цей метод вимірювання недостатньо поширений.

Прилади другої групи – витратоміри ударно-струменеві, які вимірюють залежний від витрати перепад тиску, що виникає при ударі струменя рідини

або газу. Вони є частинним випадком витратомірів змінного перепаду тисків і застосовуються лише для вимірювання малих витрат.

Прилади третьої групи – витратоміри з відхиленням витікаючого струменя. Принцип роботи такого приладу заснований на залежності перепаду тиску від швидкості вимірюваної рідини або газу вимірюваної, що виникає при відхиленні струменя допоміжного газу або рідини.

Схема перетворювача такого приладу показана на Рисунок 1.96.



1 – трубка; 2, 3 – приймальні трубки

Рисунок 1.96 – Схема струменевого витратоміра з відхиленням витікаючого струменя.

Швидкість V дорівнює нулю, то струмінь допоміжного газу (або рідини) з трубки 1 не відхиляється від свого напрямку, і тоді тиски в трубках 2 і 3 будуть рівні – $P_1 = P_2$. З появою швидкості V струмінь, що витікає з трубки 1, буде відхилятися вправо, і внаслідок чого тиск P_1 в трубці 2 зростатиме, а тиск P_2 в трубці 3 буде падати. Різниця тисків $P_1 - P_2$ буде збільшуватися зі збільшенням швидкості V струменя. Залежність $P_1 - P_2$ від швидкості v близька до лінійної.

При вимірюванні швидкості газу в якості допоміжної речовини використовують повітря або інший газ, а при вимірюванні швидкості рідини – вода або інша рідина.

Прилад, призначений для вимірювання порівняно невеликих швидкостей від 3 см/с до 3 - 6 м/с газу та від 0,3 до 30 см/с рідини переважно у потоків, що мають рівномірний профіль швидкостей.

Витратоміри даного виду володіють низьким порогом чутливості, що дозволяє вимірювати малі витрати газу і рідини. Струменеві витратоміри знаходять застосування в теплоенергетиці, паливній та хімічній промисловості, медицині та інших для комерційного, метрологічного та технологічного контролю потоків рідини, газу та пари.

1.6 Вимірювання витрати та кількості сипких речовин

Більшість однофазних потоків, не кажучи вже про багатозфазні, не строго однорідні. Тому ті або інші властивості або параметри потоку (густина тощо), будуть відповідати часу Δt переміщення потоку на вказаній відстані.

Потреба вимірювати витрати сипких речовин є не тільки в промисловості, але і в інших господарських галузях. Існує багато різновидів сипких речовин, які розрізняються різними властивостями й, насамперед, розмірами окремих частинок, що визначило назву різних сипких речовин: речовини із частинками середніх розмірів понад 10 мм називають кусковими, із частинками розмірів 0,5-10 мм – зернистими, із частинками розмірів 0,05-0,5 мм – порошкоподібними, а з частинками, розміри яких менші за 0,05 мм, – пилоподібними.

Крім крупності, сипкі речовини характеризуються формою частинок і гранулометричним складом. Розрізняють округлені, кутасті та гострі форми, що залежить від співвідношення між довжиною та іншими розмірами частинки. Гранулометричний склад показує вміст у сипкій речовині частинок різної крупності у відсотках від загальної маси. Якщо відношення розмірів найбільших і найменших частинок не велике (наприклад, не більше 2,5), то такі сипкі речовини вважають однорідними (за розмірами) або сортованими. В іншому випадку речовини вважають неоднорідними (за розмірами) або рядовими.

Пористістю сипкої речовини називають виражене у відсотках відношення пор і проміжків між частинками до загального об'єму речовини, а коефіцієнтом пористості – відношення об'єму пор і проміжків до об'єму твердої речовини. Об'ємна вага сипкої речовини визначається питомою вагою частинок, пористістю й ступенем заповнення пор водою (вологістю). Вологість сипких матеріалів впливає і на інші їх фізичні властивості, зокрема, електричні. Також ці властивості залежать і від того, чи сипка речовина складається з одного, чи з декількох компонентів. Сипкі матеріали є абразивними, а їх абразивність залежить від форми частинок та їх шорсткості.

Сипкі речовини можуть переміщуватися як у трубопроводах, так і відкритим способом (наприклад, за допомогою стрічкових транспортерів). Від цього залежить вибір методу вимірювання витрат. Рух речовини в трубопроводі може бути самопливним, тобто під дією сили тяжіння, або ж примусовим (за допомогою стисненого повітря). Тут трубою рухається двофазне середовище, що складається із твердої та газової фаз.

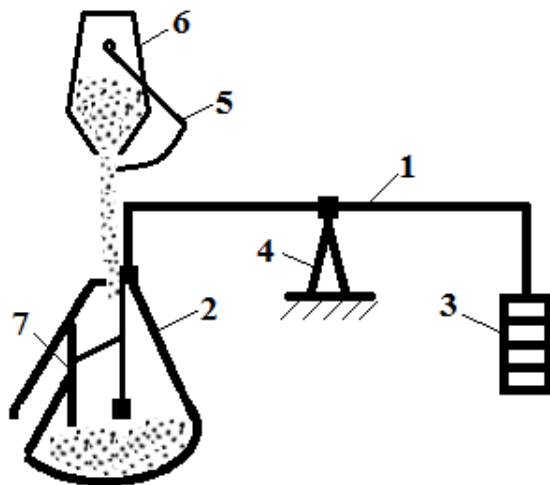
Для визначення масової витрати сипких речовин застосовують різні методи вимірювання. До найбільш поширених відносять такі методи:

1. **Ваговий** метод полягає в періодичному чи неперервному вимірюванні сили тяжіння, що утворюється вагою окремих порцій або ділянок потоку сипких речовин.

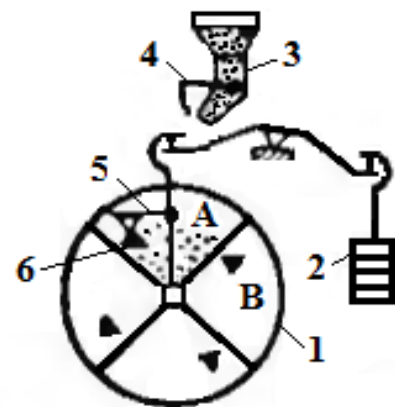
Витратоміри, що реалізують цей метод поділяють на **ковшові** (прилади періодичної дії – порційне зважування) та **стрічкові** (неперервної дії). Порційні вагові пристрої в залежності від способу врівноваження діляться на важільні, пружинні, комбіновані, з тензометричними і пневматичними чутливими елементами. У важільних вагах урівноваження контрольованого вантажу здійснюється еталонним вантажем на важелі або систему важелів, встановлених на призматичних опорах. Зазвичай застосовуються багатоважельні ваги з нерівними плечами із загальним відношенням плечей від 1:10 до 1:10⁵, які дозволяють зважувати тверді сипучі і кускові матеріали від сотень до тисяч кілограм. Порційне зважування не завжди задовольняє вимогам технології, так як часто потрібна рівномірна безперервна подача речовини в технологічний агрегат.

Ковшові ваги вимірюють вагу послідовних порцій сипкої речовини. Їх цикл роботи складається з періодів заповнення і спустошення ковша. В залежності від пристрою спустошення ковша бувають: з перекидним ковшем, з обертним ковшем та з дном, таким, що відкривається. Спрощену схему витратоміра з **перекидним ковшем** показано на Рисунок 1.97-а.

На плечах рівноплечого коромисла 1 підвішені з однієї сторони ківш 2, а з іншої – противага 3 з еталонним вантажем, за допомогою якої може регулюватися вага ковша з сипким матеріалом. Коромисло спирається на призматичну опору 4. Якщо ківш пустий, то центр тяжіння ковша знаходиться справа від вертикалі. Ківш знаходиться зверху від горизонталі, а противага – знизу. При цьому заслінка 5 з механізмом закривання-відкривання бункера 6 з матеріалом відкрита. А заслінка 7 ковша закрита. Матеріал поступає з бункера в ківш і він поступово заповнюється. При заповненні ковша центр тяжіння зміщується вліво і коромисло повертається проти часової стрілки.



а



б

1 – коромисло; 2 – ківш; 3 – противага; 1 – ківш; 2 – противага; 3 – бункер;
4 – призматична опора; 5 – заслінка бункера; 4 заслінка бункера; 5 – клямка; 6 – упор
бункера; 6 – бункер; 7 – заслінка ковша

Рисунок 1.97 – Спрощена схему витратомірів сипких матеріалів а – з перекидним ковшем; б – з обертним ковшем.

При досягненні рівноваги між ковшем з матеріалом і противагою заслінка 5 повертаючись перекриває вихід матеріалу з бункера і його подача в ківш припиняється. Одночасно з цим відкривається заслінка 7 ковша (який перекидається) і матеріал висипається з нього. Під дією противаги ківш підіймається вгору, заслінка 7 закривається, заслінка 5 відкривається і починається новий цикл заповнення ковша.

У вагах з **дном ковша, таким, що відкривається** також на плечах рівноплечого коромисла підвішені з однієї сторони ківш, а з іншої – противага з еталонним вантажем. Якщо ківш пустий, то він поступово заповнюється матеріалом з бункера. При цьому заслінка бункера відкрита, а дно ковша закрито. При заповненні ковша центр тяжіння зміщується і коромисло повертається. При досягненні рівноваги між ковшем з матеріалом і противагою коромисло прийме горизонтальне положення, заслінка бункера перекриває вихід матеріалу з бункера, а дно ковша відкривається. Після виходу матеріалу з ковша починається новий цикл його заповнення.

Ваги з дном ковша, таким, що відкривається, більш розповсюджені. Вони працюють більш плавно і мають вищу точність. Існує багато різновидів цих вагів.

Спрощену схему витратоміра з **обертовим ковшем** показано на Рисунок 1.97-б. У вагах з обертовим ковшем також на плечах рівноплечого коромисла підвішені з однієї сторони ківш 1, який може обертатися навколо своєї вісі, а з іншої – противага з еталонним вантажем 2. Якщо ківш пустий, то центр тяжіння ковша знаходиться справа від вертикалі. Ківш знаходиться зверху від горизонталі, а противага – знизу. При цьому заслінка 4 з механізмом закривання-відкривання бункера 3 з матеріалом відкрита. Матеріал поступає з бункера в сектор ковша А і він поступово заповнюється. При заповненні ковша центр тяжіння зміщується вліво і коромисло повертається проти часової стрілки. При досягненні рівноваги між ковшем з матеріалом і противагою коромисло займе горизонтальне положення, заслінка 3 перекриває вихід матеріалу з бункера 3. Надходження матеріалу в ківш припиняється, але він продовжує опускатись під впливом сил інерції і відводить клямку 5 від упору 6. Це дозволяє ковшу перекинутися. При цьому він повернеться на 90° і місце сектор А займе сектор В. Тоді спрацьовує запірний механізм 5-6 і ківш припиняє обертання. При висипанні матеріалу з сектора А ківш піде вгору. В верхньому положенні відкривається заслінка 4 і починається новий цикл заповнення ковша. Тільки тепер заповнюється сектор В. За сектором В буде заповнюватись наступний сектор і т.д.

Ці прилади мають обмежене застосування.

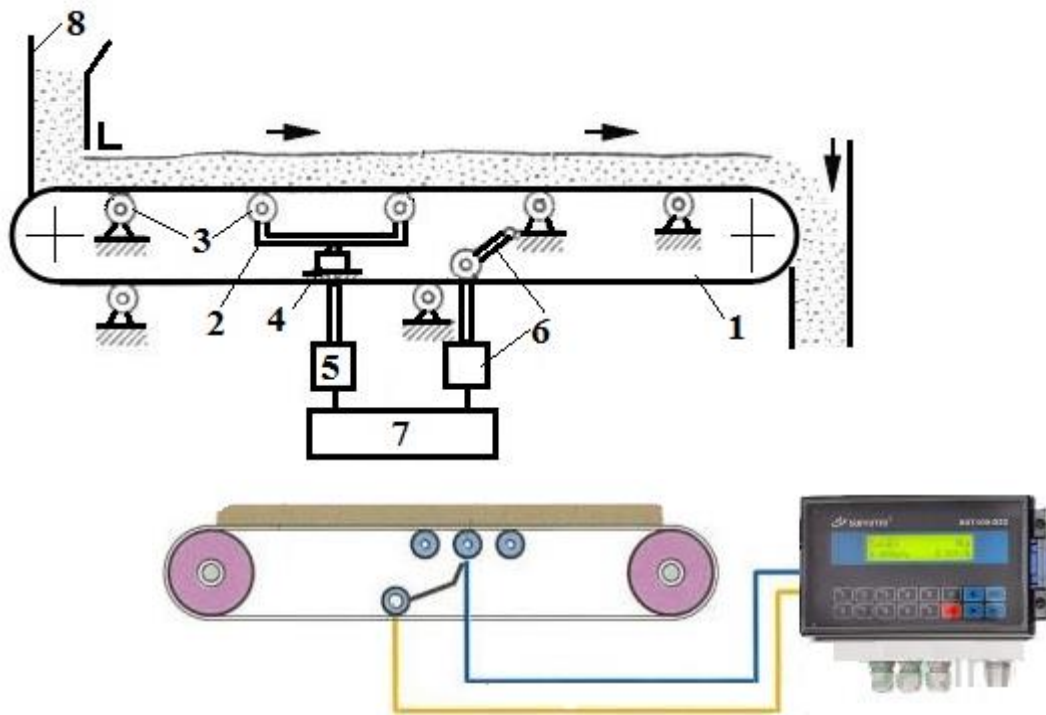
Стрічкові автоматичні ваги вимірюють вагу сипкої речовини, що знаходиться на ділянці стрічки конвеєра, який рухається.

Є кілька різновидів конструкцій стрічкових ватів (конвеєрних ватів). Насамперед це ваги, що сприймають навантаження ділянки стрічки завдовжки 1,5-2 м із сипким або кусковим матеріалом на ній. Ця ділянка стрічки спирається на декілька роликів, закріплених на рамі, яка підвішена до

важелів, з'єднаних із маятниковою противагою (квадрантом). Кут повороту квадранта пропорційний навантаженню на раму. У подібних вагах наявні два основні різновиди дії механізму, який враховує сумарну вагу матеріалу, що перейшов через них. В одному з цих різновидів обчислювальний механізм працює циклічно. Час циклу відповідає часові проходження ділянки стрічки, що дорівнює теоретичній довжині платформи ваг. Час обертання обчислювального механізму наприкінці кожного циклу пропорційний навантаженню на платформу в цей момент. Такий спосіб будови обчислювального механізму називають способом циклічного інтегрування.

Поряд з розглянутим способом використовують спосіб неперервного інтегрування, згідно з яким показання працюючого безупинно обчислювального механізму пропорційні добутковій швидкості стрічки на її навантаження. При цьому інтегратори бувають як механічні фрикційного типу, так і безконтактні фотоелектричні. В останніх час освітлювання фотоелемента залежить від навантаження на стрічку.

Одна з різновидів конструкцій стрічкових (конвеєрних) вагів показана на Рисунок 1.98.



1 – стрічковий транспортер; 2 – рама вантажопідйомного пристрою; 3 – роликоопори; 4 – тензорезистивний перетворювач; 5 – підсилювач; 6 – тахометричний перетворювач; 7 – електронний блок з цифровим індикатором

Рисунок 1.98 – Схема стрічкових вагів

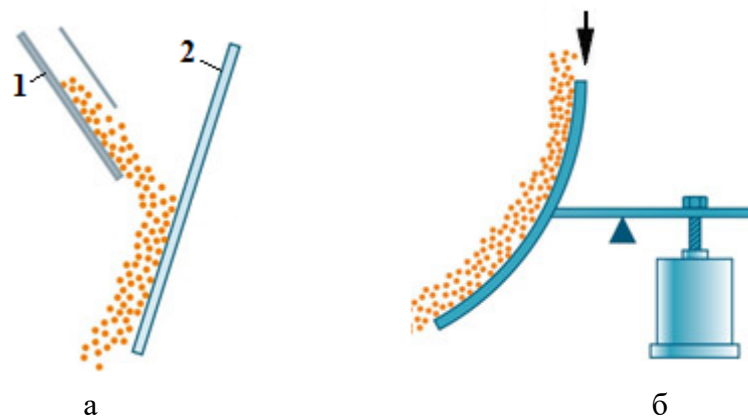
Ваги мають чутливу систему у вигляді рами 2, на якій змонтовані роликоопори 3 для стрічки транспортера 1. Навантаження на раму 2 вантажопідйомного пристрою визначається за допомогою тензорезистивного перетворювача 4 в основному з електричним вихідним сигналом,

пропорційним миттєвому значенню погонного навантаження на стрічку (тобто силі тяжіння, що створюється матеріалом на ділянці стрічки, що впливає на раму ваги, віднесеної до довжини цієї ділянки). Сигнал з перетворювача через підсилювач 5 подається на вхід електронного блоку 7, до якого приєднаний також тахометричний перетворювач 6, що приводиться в обертання стрічкою транспортера. У електронному блоці 7 змонтована схема обробки отриманих сигналів з тензорезистивного та тахометричного перетворювачів, яка формує вихідний сигнал пропорційний масовій витраті. Сигнал надходить на стрілочний показчик і далі на лічильник, який показує кількість матеріалу, що пройшла через транспортер за певний час. Ця інформація може бути передана на інші пристрої.

Похибка стрічкових або конвеєрних ватів зазвичай становить 1-1,5%.

2. **Динамічно-ваговий** метод ґрунтується на вимірюванні сили тиску потоку сипкої речовини на лоток або інше тіло, розміщене на шляху руху потоку (реалізується лотковими витратомірами);

Схема роботи такого витратоміра показана на Рисунок 1.99.



1 – направляюча труби; 2 – нахилена пластина

Рисунок 1.99 – Схема роботи лоткового витратоміра

За допомогою направляючої труби (жолоба) 1 створюється спеціальна траєкторія руху матеріалу, що спрямовується на нахилену плоску чутливу пластину 2 і вдаряється об неї, а потім переміщується під дією власної ваги. Платину часто називають лоток. Переміщення лотка і є вимірюваною величиною, за якою визначають витрату. Вплив матеріалу на лоток вимірюється за допомогою датчиків ваги, одноточкових підвісних тензодатчиків, лінійного-диференціального перетворювача. Ці прилади вимірюють тільки горизонтальну складову ударної сили. Тому будь яка додаткова вага, що налипає на поверхню сенсора, не впливає на вихідний сигнал системи.

Видозміною ударного витратоміра (лоткового) є відцентровий витратомір (Рисунок 1.99-б). Відцентровий витратомір сипучих речовин вимірює витрату через вимірювання сили впливу середовища на вигнуту пластину, до якої приєднані датчики ваги. Потік речовини повинен бути спрямований

паралельно пластині, і коли матеріал починає рухатися по кривій, то починає діяти тангенціальна сила, яка передається на інтегратор, дозволяючи перевести силу впливу у витрату. З правильним потоком матеріалу і правильно визначеними характеристиками, відцентрові рішення можуть бути надзвичайно точні. Проте, якщо матеріал липкий і якимось чином починає налипати на чутливу пластину, то виникає значна похибка.

3. Силовий метод використовує залежність від масової витрати силового впливу, що надає потокові різних прискорень. Такі вимірювання реалізується коріолісовими витратомірами, а також витратомірами з клиноподібними та радіально розташованими лопатками.

4. Тахометричний метод ґрунтується на вимірюванні швидкості обертання турбіни, лопаті чи іншого обертального елемента під дією тиску потоку сипкої речовини.

Турбінні витратоміри широко застосовуються при вимірюванні рідин та газів. Для сипких речовин використовуються рідко. Форма турбінок або крильчаток при таких вимірюваннях інша. Швидкість обертання турбінок невисока. Встановлюються такі витратоміри, як правило вертикально.

Крім наведених, використовують також і особливі методи вимірювання витрат сипких речовин: флуктуаційний (метод ґрунтується на визначенні кореляційної залежності між витратою та інтенсивністю флуктуації окремих компонентів контрольованого матеріалу), іонізаційний (метод ґрунтується на залежності ступеня поглинання іонізаційного випромінювання рухомим сипким матеріалом від його витрати), кореляційний, оптичний та мітковий.

1.6.1 Дозатори

У багатьох галузях промисловості (хімічній, сільському господарстві, харчовому виробництві тощо) необхідні пристрої і технології, які забезпечують розподіл загальної маси матеріалів на рівні менші частини, що використовуються в подальших операціях.

Дозуванням є відмірювання і видача порції (доз) якої-небудь речовини. Залежно від виду продукту можуть використовуватися різні способи дозування і, відповідно, різні види і конструкції дозаторів, кожен з яких має свої переваги і недоліки.

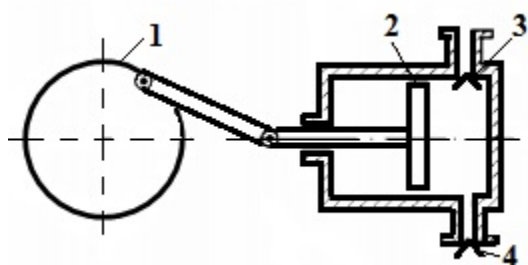
Дозатор – це пристрій, призначений для відмірювання і видачі порцій (доз) різних речовин. Дозатори бувають різних видів і конструкцій але зупинимось тільки на тих дозаторах, які здатні в промислових масштабах ефективно дозувати сипучі продукти об'ємним або ваговим способом.

Ваговий спосіб дозування заснований на вимірюванні ваги речовини і відмірювання його за даним критерієм з використанням стандартних одиниць ваги (кілограм, грам). Ваговий метод можна застосовувати практично до будь-яких видів речовин і є найбільш поширеним.

Об'ємний спосіб дозування заснований на принципі заповнення продуктом певного вільного простору і використовує для вимірювання стандартні одиниці заходів об'єму (м^3 , см^3 або літри). В основному спосіб, застосовується для дозування рідин, паст і газів, але може також використовуватися для дозування різних сипких матеріалів. При цьому, об'ємне дозування сипких матеріалів передбачає подальший перерахунок об'ємних одиниць в більш звичні вагові.

Об'ємний дозатор призначений для дозування речовин об'ємним способом. Конструктивно, складається з набору ємностей, шляхом заповнення і спустошення яких і відбувається дозування. Відповідно, розмір дози дорівнює внутрішньому об'єму дозуючої ємності. На такому принципі працює ряд розглянутих раніше приладів, наприклад, поршневі лічильники, перекидні лічильники тощо.

Насоси-дозатори (Рисунок 1.100) зі зворотно-поступальним рухом поршня використовуються для дозування різних хімічно активних рідин.



1 – електропривод; 2 – поршень; 3 – вхідний клапан; 4 – вихідний клапан

Рисунок 1.100 – Схема насоса-дозатора

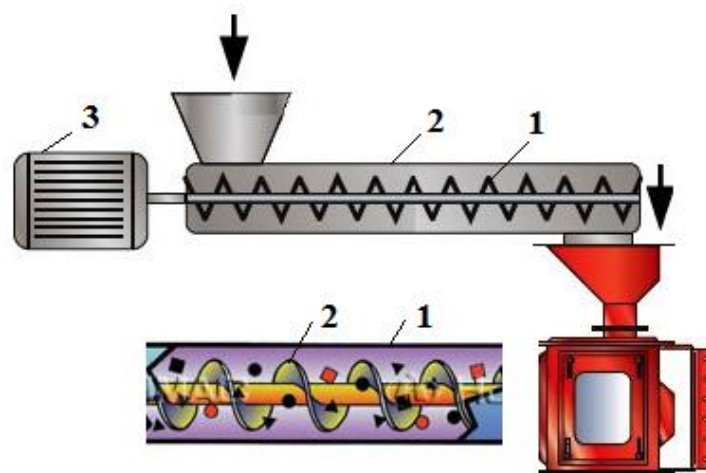
На всмоктувальній і нагнітаючій лініях встановлені клапани 3 та 4. Коли електропривод 1 переміщує поршень 2 справа наліво, відбувається наповнення циліндру через вхідний клапан 3 (вихідний клапан 4 при цьому закритий). Коли поршень досягне крайнього положення, почнеться його переміщення у зворотному напрямі – зліва направо.

При цьому клапан 3 закривається, а клапан 4 відкривається і доза рідини витісняється в приймальний пристрій.

Вагові дозатори призначений для дозування речовин ваговим способом. На такому принципі працює ряд розглянутих раніше приладів, наприклад, ковшові та стрічкові прилади.

Розповсюдженим приладом для дозування сипкі речовини є шнековий дозатор. Він використовується переважно для дозування порошкоподібних продуктів, що порошать (цементу, гіпсу, борошна, крохмалю тощо), але може також використовуватися і для інших сипких матеріалів. Залежно від конструкції приладу, дозування може здійснюватися як об'ємним, так і ваговим способом. У другому випадку в конструкцію дозатора додається ваговий елемент (ваги).

Шнековий дозатор (Рисунок 1.101) складається з металевої труби 1 (тубуса), всередині якої розташований шнек 2, електроприводу 3 шнека і блоку управління (на схемі не показаний).



1 – направляющая труба; 2 – шнек; 3 – электропривод

Рисунок 1.101 – Схема шнекового дозатора

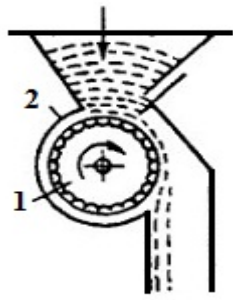
Речовина в поступає з бункера в тубус. При обертанні шнека речовина, що дозується, переміщується по трубі і поступає в приймальний апарат, ємність або безпосередньо в упаковку. Зупинка шнека приводить до припинення подачі продукту. Доза речовини визначається кількістю обертань шнека. Установка і контроль дози відбувається зазначенням на блоці управління або кількості оборотів шнека (для об'ємного способу) або необхідної ваги (для вагового способу).

Проблемними для дозування таким дозатором можуть бути маслянисті порошкоподібні речовини, які здатні злипатися або налипати на шнек.

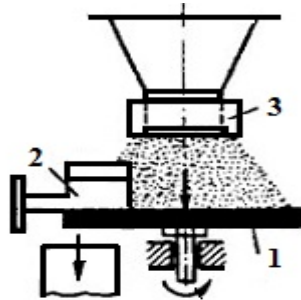
За типом подачі сипкого матеріалу дозатори ділять на:

- Неперервні дозатори, що влаштовані за принципом рівномірної і безперервної подачі сипких матеріалів. Кількість матеріалу можна контролювати шляхом зміни швидкості і часу подачі. Даний принцип дозволяє домогтися найбільш точного дозування сипких матеріалів.
- Дискретні дозатори подають матеріал рівними порціями через задані проміжки часу. В даному випадку контролювати кількість дозованого матеріалу можна регулюючи кількість порцій в одиницю часу або об'ємом самої порції. Цей тип дозаторів є менш точним, але має такі переваги як простота обслуговування та надійність при роботі у важких умовах.

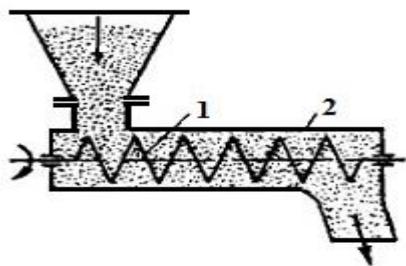
Схеми найпоширеніших дозаторів для сипких речовини наведені нижче.



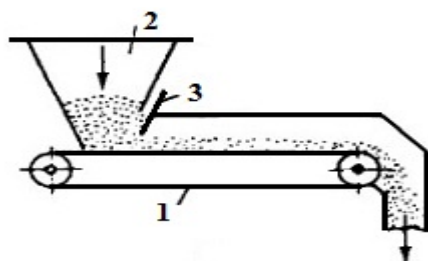
а – барабанний тип робочого органу:
1 – барабан; 2 – корпус.



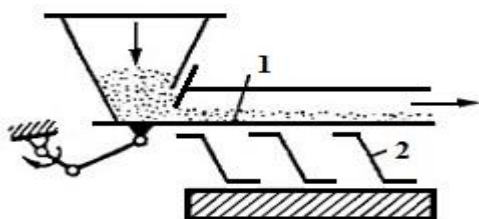
б – тарільчастий робочий орган: 1 – диск; 2 – скребок; 3 – пересувна манжета.



в – шнековий дозуючий орган: 1 – шнек; 2 – направляюча труба.



г – стрічковий дозатор: 1 – стрічка транспортера; 2 – бункер; 3 – заслінка.



д – вібраційний дозатор: 1 – лоток; 2 – гнучкі опори.

У корпусі 2 дозатора (Рисунок 1.102-а) обертається робочий орган 1 у вигляді барабана з декількома кишенями, які заповнюються сипучим матеріалом під його власною вагою. Регулювання величини доз регулюється зміною об'єму кишень і частоти обертів барабана.

У тарільчастому дозаторі (Рисунок 1.102-б) у горизонтальній площині обертається диск 1 (тарілка) утворюючи зрізаний конус з шару вихідної речовини. Скребки 2 скидає матеріал, ділячи його на дози. Об'єм порцій залежить від товщини шару в конусі і регулюється розташуванням пересувної манжети 3.

Шнековий дозатор (Рисунок 1.102-в) ділить вихідну сипучу речовину на дози за рахунок обертання гвинта (шнеку) черв'ячного типу 1 в кожусі 2. Дозування регулюється зміною швидкості обертання валу гвинта.

Стрічковий дозатор (Рисунок 1.102-г) регулює дозування зміною швидкості руху стрічки транспортера 1. Зміна параметрів доз можлива шляхом зміни об'єму подачі сипучого матеріалу з бункера 2 на стрічку заслінкою 3.

Лоток 1, що коливається дозатор на гнучких опорах 2, вібраційного дозатора (Рисунок 1.102-д) переміщує сировину в поздовжньому напрямку. Регулювання ведеться зміною частоти коливання лотка.

Рисунок 1.102 – Схеми дозаторів для сипких речовини

Найбільшу ефективність при дозуванні сипучих компонентів дає використання автоматичних регуляторів, які компенсують вплив зовнішніх чинників, дозволяють не відхилятися від заданої програми, а так само забезпечують інтуїтивно-зручне управління і надання оператору звітів про технологічний процес.

2 Приклади розв'язання задач

Приклад 1. При установці діафрагми в трубопроводі передбачалося, що максимальна витрата середовища становитиме $Q_{\text{МАКС}} = 300$ т/год, а дифманометр – на $\Delta p_{\text{МАКС}} = 4$ кПа. Однак в процесі експлуатації з'ясувалося, що максимальна витрата становитиме 500 т/год. Замінити діафрагму у даних умовах неможливо. Необхідно підібрати дифманометр, за допомогою якого можна було б виміряти витрату 500 т/год.

Розв'язання.

Розрахункове рівняння витрати для звужуючих пристроїв має вигляд:

$$Q = K \sqrt{\Delta p}, \quad (2.1)$$

де K – постійний для даної діафрагми коефіцієнт.

Визначимо K для умов $Q_{\text{МАКС}} = 300$ т/год і $\Delta p_{\text{МАКС}} = 4$ кПа:

$$K = \frac{Q_{\text{МАКС}}}{\sqrt{\Delta p_{\text{МАКС}}}}. \quad (2.2)$$

При збільшенні максимальної витрати до $Q'_{\text{МАКС}} = 500$ т/год необхідно підібрати дифманометр, розрахований на тиск

$$\Delta p'_{\text{МАКС}} = \left(\frac{Q'_{\text{МАКС}}}{K} \right)^2 \quad (2.3)$$

Підставимо (2.2) у (2.3) і отримаємо значення тиску, на який має бути розрахований дифманометр:

$$\Delta p'_{\text{МАКС}} = \left(\frac{Q'_{\text{МАКС}}}{Q_{\text{МАКС}}} \right)^2 \Delta p_{\text{МАКС}} = 11,1 \text{ кПа}.$$

Дифманометри підбирають таким чином, щоб верхня межа вимірювання була найближчою більшою до розрахункової. Межу вимірювання манометра визначають з ряду: $(1; 1,6; 2,5; 4; 6) \cdot 10^n$, де n – ціле додатне або від'ємне число.

Отже, верхня межа вимірювання дифманометра, за допомогою якого можна було б виміряти витрату 500 т/год, має дорівнювати 16 кПа.

Приклад 2. У трубі діаметром $D = 50$ мм рухається потік рідини з середньою швидкістю $v_c = 0,21$ м/с. Визначте об'ємну витрату рідини.

Розв'язання.

Об'ємна витрата дорівнює добутку середньої швидкості на площу перетину потоку:

$$Q_o = v_c \frac{\pi D^2}{4} \quad (2.4)$$

Отже, об'ємна витрата дорівнює 29,7 м³/год.

3 Варіанти завдань до розрахункової роботи

1. У трубі діаметром $D=100$ мм рухається потік рідини з середньою швидкістю $v_c = 1,5$ м/с. Визначте масову витрату рідини, якщо її густина $\rho=990$ кг/м³.

2. Визначте перепад тиску, який створюється напірними трубками, якщо потік води рухається зі швидкістю $0,1$ м/с, густина води $\rho=985$ кг/м³, коефіцієнт трубки $k_T = 0,97$.

3. Визначте витрату димових газів через циліндричний трубопровід, якщо перепад тиску на напірній трубці $\Delta p = 50$ кгс/м². Діаметр трубопроводу $D=200$ мм, коефіцієнт трубки $k_T = 0,98$, густина газів $\rho = 0,405$ кг/м³. Трубка встановлена на відстані $23,8$ мм від стінки трубопроводу. Кінематична в'язкість газів $\nu = 93,6 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

4. При установці діафрагми в трубопроводі передбачалося, що номінальна витрата середовища становитиме 230 т/год, діафрагма була розрахована на $Q_{\text{макс}} = 250$ т/год, а дифманометр - на $\Delta p_{\text{макс}} = 4$ кПа. Однак у процесі експлуатації з'ясувалося, що витрата середовища буде дорівнює 380 т/год. Замінити діафрагму у даних умовах неможливо. Підберіть дифманометр, за допомогою якого можна було б виміряти витрату 380 т/год.

5. Витрата води в трубопроводі діаметром $D=80$ мм вимірюється бронзовою діафрагмою з отвором діаметром $d=58$ мм. Температура води 150°C , тиск води 2 МПа, перепад тиску на діафрагмі $0,04$ МПа. Визначте, як зміниться дійсне значення витрати, якщо температура води знизиться до 20°C . При розв'язанні задачі прийняти, що діаметр трубопроводу, коефіцієнт витрати і перепад тиску на діафрагмі – сталі величини, а $k'_T = 1,0023$.

6. Сопло Вентурі (довге) використовується на насосній станції у схемі регулювання витрати води. Розрахункова температура води 20°C , однак у денний час температура води піднімається до 27°C . Визначте, на скільки відсотків буде збільшуватися або зменшуватися дійсне значення витрати в денний час. При розв'язанні задачі прийняти, що тиск води постійний і становить $0,6$ МПа, відносна площа сопла $m=0,25$; автоматичний регулятор підтримує постійний перепад тиску на соплі, який дорівнює 35 кПа.

7. Сопло Вентурі (довге) використовується на насосній станції в схемі регулювання витрати води. Розрахункова температура води 20°C , однак вночі температура води знижується до 10°C . Визначте, на скільки відсотків буде збільшуватися або зменшуватися дійсне значення витрати вночі. При розв'язанні задачі прийняти, що тиск води постійний і становить $0,6$ МПа, відносна площа сопла $m=0,25$; автоматичний регулятор підтримує постійний перепад тиску на соплі, який дорівнює 35 кПа.

8. Визначте розміри розділових посудин для поплавкового дифманометра. Діаметри поплавкової і змінної посудин дорівнюють $D_{\text{п}}=78$ мм і $D_{\text{см}}=13,83$ мм відповідно. Вимірюване середовище – соляна кислота ($p = 108$ кПа; $t = 20^\circ\text{C}$ і $\rho_c = 1560$ кг/м³). Розділова рідина – трансформаторне масло ($\rho_{\text{пр}} = 880,3$ кг/м³). Температура розділових посудин і дифманометра 20°C . Рідина,

що заповнює дифманометр – ртуть. Густина ртуті при температурі 20°C становить $\rho_{\text{у}} = 13\,546 \text{ кг/м}^3$.

9. Перепад тиску на звужуючому пристрої вимірюється дифманометром ДМ класу точності 1, який працює зі вторинним приладом класу точності 1. Визначте значення середньої похибки вимірювання перепаду тиску на звужуючому пристрої при витраті $Q_{\text{м}}$, яка дорівнюватиме верхній межі вимірювання.

10. Визначте, чи слід враховувати похибку, яка обумовлена застосуванням розділових посудин для поплавкового дифманометра при наступних умовах вимірювання: вимірюване середовище – соляна кислота ($p=108 \text{ кПа}$; $t=20^\circ\text{C}$ і $\rho_{\text{с}} = 1560 \text{ кг/м}^3$). Розділова рідина – трансформаторне масло ($\rho_{\text{рр}} = 880,3 \text{ кг/м}^3$). Температура розділових посудин і дифманометра 20°C. Рідина, що заповнює дифманометр – ртуть. Густина ртуті при температурі 20°C становить $\rho_{\text{у}} = 13\,546 \text{ кг/м}^3$. Діаметри поплавкової і змінної посудин дорівнюють $D_{\text{п}} = 78 \text{ мм}$ і $D_{\text{см}} = 13,83 \text{ мм}$ відповідно.

11. Визначте, чи слід враховувати похибку, яка обумовлена застосуванням розділових посудин для кільцевого дифманометра при наступних умовах вимірювання: вимірюване середовище – соляна кислота ($p=108 \text{ кПа}$; $t=20^\circ\text{C}$ і $\rho_{\text{с}} = 1560 \text{ кг/м}^3$). Розділова рідина – трансформаторне масло ($\rho_{\text{рр}} = 880,3 \text{ кг/м}^3$). Температура розділових посудин і дифманометра 20°C. Рідина, що заповнює дифманометр – ртуть. Густина ртуті при температурі 20°C становить $\rho_{\text{у}} = 13\,546 \text{ кг/м}^3$. Площа радіального перетину кільцевої трубки дифманометра становить 140 мм^2 .

12. Визначте, чи слід враховувати похибку, яка обумовлена застосуванням розділових посудин для кільцевого дифманометра при наступних умовах вимірювання: вимірюване середовище – розчин сірчаної кислоти H_2SO_4 (масова концентрація - $50 \text{ г } \text{H}_2\text{SO}_4 / 100\text{г}$, $p=108 \text{ кПа}$; $t=20^\circ\text{C}$ і $\rho_{\text{с}} = 1835 \text{ кг/м}^3$). Розділова рідина – трансформаторне масло ($\rho_{\text{рр}} = 880,3 \text{ кг/м}^3$). Температура розділових посудин і дифманометра 20°C. Рідина, що заповнює дифманометр – ртуть. Густина ртуті при температурі 20°C становить $\rho_{\text{у}} = 13\,546 \text{ кг/м}^3$. Площа радіального перетину кільцевої трубки дифманометра становить 140 мм^2 .

13. Визначте, чи слід враховувати похибку, яка обумовлена застосуванням розділових посудин для поплавкового дифманометра при наступних умовах вимірювання: вимірюване середовище – розчин гідроксиду натрія (масова концентрація – $10 \text{ г } \text{NaOH} / 100 \text{ г}$; $t = 20^\circ\text{C}$). Розділова рідина – трансформаторне масло ($\rho_{\text{рр}} = 880,3 \text{ кг/м}^3$). Температура розділових посудин і дифманометра 20°C. Рідина, що заповнює дифманометр – ртуть. Густина ртуті при температурі 20°C становить $\rho_{\text{у}} = 13\,546 \text{ кг/м}^3$. Діаметри поплавкової і змінної посудин дорівнюють $D_{\text{п}} = 78 \text{ мм}$ і $D_{\text{см}} = 13,83 \text{ мм}$ відповідно.

14. Перепад тиску на звужуючому пристрої вимірюється поплавковим дифманометром ДП. Вимірюване середовище – розчин КОН (масова концентрація – $10 \text{ г КОН} / 100\text{г}$, $t=20^\circ\text{C}$). Розділова рідина – трансформаторне

масло ($\rho_{pp} = 880,3 \text{ кг/м}^3$). Температура розділових посудин і дифманометра 20°C . Рідина, що заповнює дифманометр – вода. Діаметри поплавкової і змінної посудин відповідно дорівнюють $D_{\Pi} = 78 \text{ мм}$ і $D_{CM} = 13,83 \text{ мм}$. Визначте розміри розділових посудин для поплавкового дифманометра.

15. Перепад тиску на пристрої звуження потоку вимірюється поплавковим дифманометром ДП. Вимірюване середовище - розчин азотної кислоти HNO_3 (масова концентрація – $70 \text{ г HNO}_3 / 100 \text{ г t} = 20^\circ\text{C}$). Розділова рідина – трансформаторне масло ($\rho_{pp} = 880,3 \text{ кг/м}^3$). Температура розділових судин і дифманометра 20°C . Рідина, що заповнює дифманометр – вода. Діаметри поплавкового і змінної судин відповідно дорівнюють $D_{\Pi} = 78 \text{ мм}$ і $D_{CM} = 13,83 \text{ мм}$. Визначте розміри розділових посудин для поплавкового дифманометра.

16. Перепад тиску на пристрої звуження потоку вимірюється поплавковим дифманометром ДП. Вимірюване середовище – розчин сірчаної кислоти H_2SO_4 (масова концентрація - $60 \text{ г H}_2\text{SO}_4 / 100 \text{ г t} = 20^\circ\text{C}$). Розділова рідина – трансформаторне масло ($\rho_{pp} = 880,3 \text{ кг/м}^3$). Температура розділових посудин і дифманометра 20°C . Рідина, що заповнює дифманометр – вода. Діаметри поплавкової і змінної посудин відповідно дорівнюють $D_{\Pi} = 78 \text{ мм}$ і $D_{CM} = 13,83 \text{ мм}$. Визначте розміри розділових посудин для поплавкового дифманометра.

17. У трубі діаметром $D=80 \text{ мм}$ рухається потік рідини з середньою швидкістю $v_c = 1,65 \text{ м/с}$. Визначте масову витрату рідини, якщо її густина $\rho=985 \text{ кг/м}^3$.

18. Визначте перепад тиску, який створюється напірними трубками, якщо потік води рухається зі швидкістю 1 м/с , густина води $\rho=990 \text{ кг/м}^3$, коефіцієнт трубки $k_T = 0,98$.

19. При установці діафрагми в трубопроводі передбачалося, що номінальна витрата середовища становить 275 т/год , діафрагма була розрахована на $Q_{\text{макс}} = 300 \text{ т/год}$, а дифманометр – на $\Delta p_{\text{макс}} = 6 \text{ кПа}$. Однак в процесі експлуатації з'ясувалося, що витрата середовища буде дорівнювати 460 т/год . Змінити діафрагму не є можливим. Підберіть дифманометр, за допомогою якого можна було б виміряти витрату 460 т/год .

20. При установці діафрагми в трубопроводі передбачалося, що номінальна витрата середовища становитиме 275 т/год , діафрагма була розрахована на $Q_{\text{макс}} = 300 \text{ т/год}$, а дифманометр – на $\Delta p_{\text{макс}} = 6 \text{ кПа}$. Однак в процесі експлуатації з'ясувалося, що витрата середовища збільшиться до 460 т/год . Замінити діафрагму у даних умовах неможливо. Підберіть дифманометр, за допомогою якого можна було б виміряти витрату 460 т/год .

21. У трубі діаметром $D=100 \text{ мм}$ рухається потік рідини з середньою швидкістю $v_c = 0,18 \text{ м/с}$. Визначте масову витрату рідини, якщо її густина $\rho=990 \text{ кг/м}^3$.

22. Витрата води в трубопроводі діаметром $D=80 \text{ мм}$ вимірюється бронзовою діафрагмою з отвором діаметром $d=58 \text{ мм}$. Температура води

становить 150°C , тиск води – 2 МПа, перепад тиску на діафрагмі – 0,04 МПа. Показання витратоміра – $100\text{ м}^3/\text{год}$. Визначте відносну похибку вимірювання витрати, якщо відомо, що коефіцієнт витрати $\alpha = 1,095$. При розв’язанні задачі прийняти $\varepsilon = 1$.

24. Витрата води в трубопроводі діаметром $D=80$ мм вимірюється бронзовою діафрагмою з отвором діаметром $d=58$ мм. Температура води 150°C , тиск води 2 МПа, перепад тиску на діафрагмі 0,04 МПа. Показання витратоміра – $100\text{ м}^3/\text{год}$. Визначте абсолютну похибку вимірювання витрати, якщо відомо, що коефіцієнт витрати $\alpha = 1,095$. При розв’язанні задачі прийняти $\varepsilon = 1$.

25. Витрата води в трубопроводі діаметром $D=80$ мм вимірюється бронзовою діафрагмою з отвором діаметром $d=50$ мм. Температура води 150°C , тиск води 2 МПа, перепад тиску на діафрагмі 0,04 МПа. Показання витратоміра – $70\text{ м}^3/\text{год}$. Визначте дійсне значення витрати, якщо відомо, що коефіцієнт витрати $\alpha = 1,06$. При розв’язанні задачі прийняти $\varepsilon = 1$.

26. Витрата води в трубопроводі діаметром $D=80$ мм вимірюється бронзовою діафрагмою з отвором діаметром $d=58$ мм. Температура води 120°C , тиск води 5 МПа, перепад тиску на діафрагмі 0,04 МПа. Визначте, як зміниться дійсне значення витрати, якщо температура води знизиться до 30°C . При розв’язанні задачі прийняти, що діаметр трубопроводу, коефіцієнт витрати і перепад тиску на діафрагмі – сталі величини, а $k'_T = 1,0023$.

27. Сопло Вентурі (довге) використовується на насосній станції у схемі регулювання витрати води. Відносна площа сопла $m=0,25$. Автоматичний регулятор підтримує перепад тиску на соплі на постійному рівні, який становить 35 кПа. Розрахункова температура води 20°C , однак у денний час температура води піднімається до 25°C . Визначте, на скільки відсотків буде збільшуватися або зменшуватися дійсне значення витрати в денний час. При розв’язанні задачі прийняти, що тиск води 0,6 МПа.

28. Сопло Вентурі (довге) використовується на насосній станції у схемі регулювання витрати води. Відносна площа сопла $m=0,25$. Автоматичний регулятор підтримує перепад тиску на соплі на постійному рівні, який становить 35 кПа. Розрахункова температура води 20°C , однак в нічний час опускається до 5°C . Визначте, на скільки відсотків буде збільшуватися або зменшуватися дійсне значення витрати в нічний час. Тиск води 0,6 МПа.

5.29. Перепад тиску на пристрої звуження потоку вимірюється дифманометром ДМ класу точності 1.5, який працює зі вторинним приладом класу точності 1.5. Визначте значення середньої похибки вимірювання перепаду тиску на пристрої звуження потоку при витраті Q_M , що дорівнює верхній межі вимірювання.

5.30. Перепад тиску на пристрої звуження потоку вимірюється дифманометром ДМ класу точності 1, який працює зі вторинним приладом класу точності 1.5. Визначте значення середньої похибки вимірювання

перепаду тиску на пристрої звуження потоку при витраті Q_m , що дорівнює верхній межі вимірювання.

4 Запитання для самопідготовки

Тема 1

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. За якої мети необхідне вимірювання витрати і які основні вимоги висувають до витратомірів на виробництві?
5. У яких одиницях прийнято вимірювати кількість та витрату речовини?
6. У чому полягає відмінність понять: «середня витрата» і «миттєва витрата»?
7. На які основні групи поділяють витратоміри і лічильники?

Тема 2

8. Які види витратомірів та лічильників відносять до групи приладів, які засновано на гідродинамічних методах?
9. На які різновиди поділяють витратоміри змінного перепаду тиску у залежності від принципу дії перетворювача витрати?
10. У чому полягає принцип дії витратомірів із звужувальними пристроями?
11. Які стандартні звужувальні пристрої використовують для вимірювання витрати рідини та газу?
12. З чого складається вимірювальний комплект витратоміру змінного перепаду тиску?
13. Які зміни відбуваються з потоком речовини при проходженні звужувального пристрою?
14. У яких звужувальних пристроях найбільша втрата тиску?
15. У чому полягає принцип дії витратомірів з напірними пристроями (витратомірів швидкісного напору)?
16. У чому полягає особливість конструкції диференціальної трубки Піто?
17. У чому полягає принцип дії ударно-струменевих витратомірів?

Тема 3

18. У чому полягає принцип дії витратомірів змінного рівня?
19. Які отвори для витікання використовуються у витратомірах змінного рівня?

Тема 4

- 20. На які різновиди поділяють витратоміри обтікання?
- 21. У чому полягає принцип дії ротаметра?
- 22. Чому перепад тисків на поплавку ротаметра є постійним?
- 23. Як можна змінити межі вимірювання ротаметра?
- 24. У чому полягає відмінність скляних ротаметрів і поплавкових витратомірів?
- 25. Які застосовують системи передачі показань у поплавкових витратомірах?
- 26. У чому полягає особливість конструкції поршневого витратоміра?
- 27. У чому полягає принцип дії витратомірів з поворотною лопаттю?

Тема 5

- 28. Яке явище покладено в основу роботи вихрових витратомірів?
- 29. На які групи прийнято поділяти вихрові витратоміри?
- 30. Тіла обтікання якої форми застосовуються у вихрових витратомірах?
- 31. Які використовують способи детектування частоти вихорів у вихрових витратомірах?
- 32. У чому полягає принцип дії вихрових та вихороакустичних витратомірів?

Тема 6

- 33. У чому полягає принцип дії парціального витратоміра?
- 34. На які групи поділяють парціальні витратоміри?

Тема 7

- 35. Які види витратомірів та лічильників відносять до групи приладів із безперервно рухомим тілом?
- 36. Що положено в основу роботи об'ємного лічильника?
- 37. У чому полягає принцип дії тахометричного витратоміра (лічильника)?
- 38. На які різновиди поділяють тахометричні витратоміри?
- 39. Які види рухомого елемента використовують у тахометричних витратомірах?
- 40. Як визначається кількість речовини, що пройшла через лічильник?
- 41. Які види перетворювачів застосовуються у тахометричних витратомірах?
- 42. Який принцип дії кулькового тахометричного витратоміра?
- 43. У чому полягає принцип дії камерних тахометричних витратомірів?

- 44. Як працює лічильник з овальними шестернями?
- 45. Як працює ротаційний газовий лічильник?
- 46. У чому полягає принцип дії барабанних лічильників?
- 47. У чому полягає принцип дії лопатевих лічильників?
- 48. У чому полягає принцип дії поршневих лічильників?
- 49. У чому полягає принцип дії перекидних лічильників?

Тема 8

- 50. За якими видами класифікують силові витратоміри?
- 51. У чому полягає принцип дії силових витратомірів?
- 52. Які основні переваги силових витратомірів, сфера їх застосування?
- 53. Який принцип роботи коріолісового витратоміра?
- 54. Що є мірою витрат у коріолісового витратоміра?
- 55. Що входить до комплексу вимірювання у коріолісового витратоміра?
- 56. Який принцип роботи гіроскопічного витратоміра?
- 57. Який принцип роботи турбосилового витратоміра?

Тема 9

- 58. Які види витратомірів та лічильників відносять до групи приладів, які засновані на різних фізичних явищах?
- 59. У чому полягає принцип дії теплових витратомірів?
- 60. За якими ознаками поділяють теплові витратоміри?
- 61. На які групи поділяють теплові витратоміри враховуючи характер теплової взаємодії з потоком?
- 62. У чому полягає принцип дії термоанемометра?
- 63. Як працює калориметричний витратомір?
- 64. Як працює термоконвективний витратомір?

Тема 10

- 65. На якому фізичному явищі заснована робота електромагнітного витратоміра?
- 66. Які електромагнітні витратоміри набули переважного застосування та у чому полягає їх принцип дії?
- 67. Які недоліки має електромагнітний витратомір з постійним магнітним полем?

Тема 11

- 68. У чому полягає принцип дії акустичних витратомірів?
- 69. На які групи поділяють акустичні витратоміри?

70. За якими параметрами визначають витрату в акустичних витратомірах?
71. Скільки акустичних каналів вимірювання можуть мати ультразвукові витратоміри?
72. Як можна направляти ультразвукову хвилю у контрольованому потоці у акустичних витратомірах?
73. Які основні переваги акустичних витратомірів і сфера їх застосування?
74. У чому полягає принцип дії доплерівського ультразвукового витратоміра?

Тема 12

75. У чому полягає принцип дії оптичних витратомірів?
76. На які групи поділяють оптичні витратоміри?
77. Як працює доплерівський оптичний витратомір?
78. Як працює оптичний витратомір Фізо-Френеля?
79. Які основні переваги оптичних витратомірів і сфера їх застосування?

Тема 13

80. На які основні групи поділяють іонізаційні витратоміри?
81. У чому полягає принцип дії іонізаційних витратомірів?
82. Які основні сфери застосування іонізаційних витратомірів та їх метрологічні характеристики?

Тема 14

83. На якому фізичному явищі заснована робота ядерно-магнітних витратомірів?
84. Які є різновиди ядерно-магнітних витратомірів?
85. У чому полягає принцип дії нутаційного ядерно-магнітного витратоміра?

Тема 15

86. Які види витратомірів та лічильників відносять до групи приладів, які засновано на особливих методах?
87. Яка залежність покладена в основу роботи концентраційних витратомірів?
88. Яким чином можна здійснювати введення індикатора в концентраційних витратомірах?
89. Які переваги мають концентраційні витратоміри?

90. Які різновиди концентраційних витратомірів застосовуються на практиці?

Тема 16

91. У чому полягає принцип дії міткових витратомірів?

92. За якими параметрами визначають витрату в міткових витратомірах?

93. Які схеми міткових витратомірів застосовують для вимірювань витрат?

94. Які види міток прийнято застосовувати на практиці?

95. Як працює мітковий витратомір з радіоактивними мітками?

96. Як працює мітковий витратомір з іонізаційними мітками?

97. Як працює мітковий витратомір з тепловими мітками?

98. Які чинники впливають на точність вимірювання витрат за допомогою міткових витратомірів?

Тема 17

99. У чому полягає принцип дії кореляційного витратоміра?

100. У чому полягає відмінність в роботі міткових та кореляційних витратомірів ?

101. Як визначається витрата речовини при використанні кореляційного витратоміра?

102. Як працює кореляційний витратомір?

103. Як працює ультразвуковий кореляційний витратомір?

104. Як працює оптичний кореляційний витратомір?

105. Як працює тепловий кореляційний витратомір?

106. Як працює електролітичний кореляційний витратомір?

Тема 18

107. Які методи вимірювання застосовують для визначення масової витрати сипких речовин?

108. У чому полягають особливості вимірювання витрати сипких речовин?

109. Які прилади реалізують ваговий метод вимірювання витрати сипких речовин?

110. Як працюють ковшові ваги і які є їх різновиди?

111. Як працюють стрічкові автоматичні ваги?

112. У чому полягає динамічно-ваговий метод вимірювання витрати сипких речовин?

113. Як працюють лоткові витратоміри?
114. У чому полягають силовий та тахометричний методи вимірювання витрати сипких речовин?

Список рекомендованой литературы

Основна література:

1. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ: Справочник: Кн.1.- 5-е изд. перераб. и доп.- СПб.: Политехника, 2002.-409 с.
2. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ: Справочник: Кн.2.- 5-е изд. перераб. и доп.- СПб.: Политехника, 2004.-412 с.
3. ГОСТ 15528-86 Средства измерений расхода, объема или массы протекающих жидкости и газа. Термины и определения. 43с.
4. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества [Текст] : справочник / П. П. Кремлевский. - 4-е издание, переработанное и дополненное. - Л: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1989. - 701 с.
5. Лукінюк М. В. Технологічні вимірювання та прилади: Навч. посіб. [Текст]/ М.В. Лукінюк. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 436 с.
6. Промислові засоби автоматизації. Ч.1. Вимірювальні пристрої: навчальний посібник [Текст]/ А.К.Бабіченко, В.І. Тошинський, В.С. Михайлов та ін.; Х.: НТУ"ХП", 2001. - 470с.
7. Промислові засоби автоматизації. Ч.2. Регулюючі і виконавчі пристрої: навчальний посібник [Текст]/ А.К.Бабіченко, В.І. Тошинський, В.С. Михайлов та ін.; Х.: НТУ"ХП", 2001. - 658с.
8. Кулаков М.В. Технологические измерения и приборы для химических производств [Текст]/ М.В. Кулаков. - М.: Машиностроение, 1983. – 424 с.
9. Полоцкий Л.М. Автоматизация химических производств. Теория, расчет и проектирование систем автоматизации [Текст]/ Л.М. Полоцкий, Г.И. Лапшенков. - М.: Химия, 1982. – 296 с.

Додаткова література

10. 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.
11. Фрайден Дж. Современные датчики: Справочник: Пер. с англ. [Текст]/ Под ред. Е.Л. Свинцова - М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
12. Измерения в промышленности: справ. изд. [Текст]/ под ред. П. Профоса. Пер. с нем. - М.: Металлургия, 1980. – 648 с.

- 13.Каталоги: Расходомеры. Плотномеры
<http://www2.emersonprocess.com/ru-RU/brands/Metran/products/Pages/catalog.aspx>
- 14.ПРАМЕНЬ. Разработка и производство расходомеров,
измерительных систем, поверочного оборудования.
<http://npropramen.ru/>.

Додатки

Додаток А. Структура та зміст розрахункової роботи

РР «Вибір і розрахунок приладів вимірювання» складається з пояснювальної записки обсягом в 18-30 сторінок формату А4. Пояснювальна записка має включати:

- титульний лист;
- завдання на РР;
- зміст;
- вступ;
- основні розділи;
- висновок;
- список літератури;
- додаток (за необхідності).

Зразок виконання титульного листа наведено в Додатку Б.

У вступі в стислій формі наводяться актуальність і мета роботи, вказуються методи розв'язання і результати, які будуть отримані.

В основних розділах роботи розкривається порядок вирішення поставлених завдань, наводяться розв'язки (формули, розрахунки, таблиці, графіки), пояснення, висновки.

У заключній частині робляться висновки про результати виконаної роботи, про можливість її практичного застосування.

Список літератури повинен містити тільки цитовані джерела.

У додатку містяться матеріали, які при включенні їх в основну частину тексту пояснювальної записки захищають її. Посилання на додаток (при його наявності) і на цитовану літературу в основному тексті обов'язкові.

Зміст складається з переліку розділів і підрозділів пояснювальної записки із зазначенням відповідних їх початку номерів сторінок.

Пояснювальну записку слід оформляти з дотриманням таких розмірів полів: ліве - 30 мм, праве - 10 мм, верхнє і нижнє - 20 мм. Сторінки пояснювальної записки нумерують арабськими цифрами. Шрифт Times New Roman, 14; міжрядковий інтервал 1,5; відступ першого рядка 1,25; вирівнювання по лівому краю (або по ширині); інтервал до і після абзацу – 0 пт.

Нумерація сторінок починається зі вступу (попередні сторінки не нумеруються, але їх слід враховувати). Титульний аркуш включають до загальної нумерації. На титульному аркуші номер не ставлять, на наступних сторінках номер проставляють у правому верхньому куті без виділення рисками і без крапки в кінці. Ілюстрації (таблиці, креслення, схеми, графіки), роздруковки з екрану, які розташовані на окремих сторінках, включають до загальної нумерації сторінок.

Текст основної частини пояснювальної записки ділять на розділи, підрозділи, пункти.

Заголовки розділів розміщують симетрично тексту. Перенесення слів у заголовках не допускаються. Крапку в кінці заголовка не ставлять. Якщо заголовок складається з двох речень, то їх розділяють крапкою.

Відстань між заголовком і текстом має бути не менше 15мм. Підкреслювати заголовки не допускається.

Розділи основної частини пояснювальної записки повинні мати порядкову нумерацію в межах всієї записки і позначатися арабськими цифрами з крапкою в кінці. Зміст, вступ, висновки та список використаних літературних джерел не нумеруються. Підрозділи нумерують арабськими цифрами в межах кожного розділу. Номер підрозділу складається з номера розділу і порядкового номера підрозділу, розділених крапкою. В кінці номера підрозділу повинна стояти крапка, наприклад, 2.4. – (четвертий підрозділ другого розділу). Розв'язок задач РР необхідно розташовувати в порядку номерів, зазначених у завданні.

Ілюстрації (крім таблиць) позначають словом «Рис.» і нумерують послідовно арабськими цифрами в межах розділу. Номер ілюстрації повинен складатися з номера розділу і порядкового номера ілюстрації, відокремлених крапкою (наприклад, Рис.1.5). Ілюстрації мають бути розташовані так, щоб їх було зручно розглядати без повороту пояснювальної записки або з поворотом на 90° за годинниковою стрілкою. Ілюстрації розташовують після першого посилання на них.

Ілюстрації повинні мати найменування. При необхідності ілюстрації забезпечують пояснюючими надписами. Найменування розміщують над ілюстрацією, пояснюючі дані під ілюстрацією, номер рисунка під пояснюючими даними.

Таблиці нумерують послідовно арабськими цифрами в межах розділу і дають їм назву. З вирівнюванням по правому краю над відповідним заголовком таблиці розміщують напис «Таблиця» із зазначенням її номера, який повинен складатися з номера розділу і порядкового номера таблиці, розділених крапкою наприклад, Таблиця 1.3. Таблиці розташовують після першого посилання на них.

Посилання в тексті на літературні джерела слід виконувати зазначенням порядкового номера джерела за списком джерел, виділеного квадратними дужками, наприклад, [7], [2,5,9], [3-8]. Посилання на літературу оформлюються згідно з ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання.

Додатки оформлюють як продовження роботи на наступних її сторінках або у вигляді окремої частини, розміщуючи їх у порядку появи посилань у тексті роботи.

Кожен додаток необхідно починати з нового аркуша. В правому верхньому куті рядка над заголовком малими літерами з першої великої

літери повинно бути надруковано слово Додаток і через пропуск велика літера, що позначає додаток. Додаток повинен мати заголовок, надрукований малими літерами з першої великої. Додатки слід позначати послідовно великими літерами української абетки, за винятком літер Г, Є, З, І, Ї, Й, О, Ч, Ї (наприклад, Додаток Б). Якщо додаток один, то він позначається, як Додаток А. Додатки повинні мати спільну з основним текстом наскрізну нумерацію сторінок.

Ілюстрації, таблиці, що є у тексті додатку, слід нумерувати в межах кожного додатку арабськими цифрами, наприклад, Рис.Д.3 – третій рисунок додатку Д, Таблиця А.3 – третя таблиця додатку А. Якщо в додатку одна ілюстрація або одна таблиця, то їх нумерують, наприклад, Рис. А.1, Таблиця А.1.

У посиланнях у тексті додатку на ілюстрації, таблиці рекомендується писати: на рис. А.2, в таблиці Д.3.

Всі додатки включають у зміст, вказуючи номер, заголовок і сторінки з яких вони починаються.

Додаток Б. Зразок виконання титульного листа

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ

ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Кафедра кібернетики хіміко-технологічних процесів

РОЗРАХУНКОВА РОБОТА

з дисципліни: **"Технологічні вимірювання і прилади"**

на тему: **"Вибір і розрахунок приладів
вимірювання"**

Виконав:

Студент 2-го курсу

ХТФ

Групи ХА-81

Петренко О.І.

Перевірив:

доц. Бондаренко С.Г.

Київ 2019

Додаток В. Залежність між витратою і перепадом тиску на звужувальному пристрої

Теоретичні положення й основні рівняння вимірювання витрат за методом змінного перепаду тисків однакові для всіх стандартних типів звужувальних пристроїв. Відрізняються тільки деякі коефіцієнти цих рівнянь, які визначаються дослідними шляхом.

Отримаємо рівняння вимірювання витрати за допомогою звужувального пристрою – діафрагми, і коли по трубопроводу протікає нестислива рідина, густина якої до та після звуження залишається незмінною.

Потік рідини деформується на звужувальному пристрої (рис. В.1). Звуження потоку починається перед діафрагмою, а потім ще деякий час за нею завдяки силі інерції потік звужується до мінімального перерізу. Далі потік розширюється до повного перерізу трубопроводу.

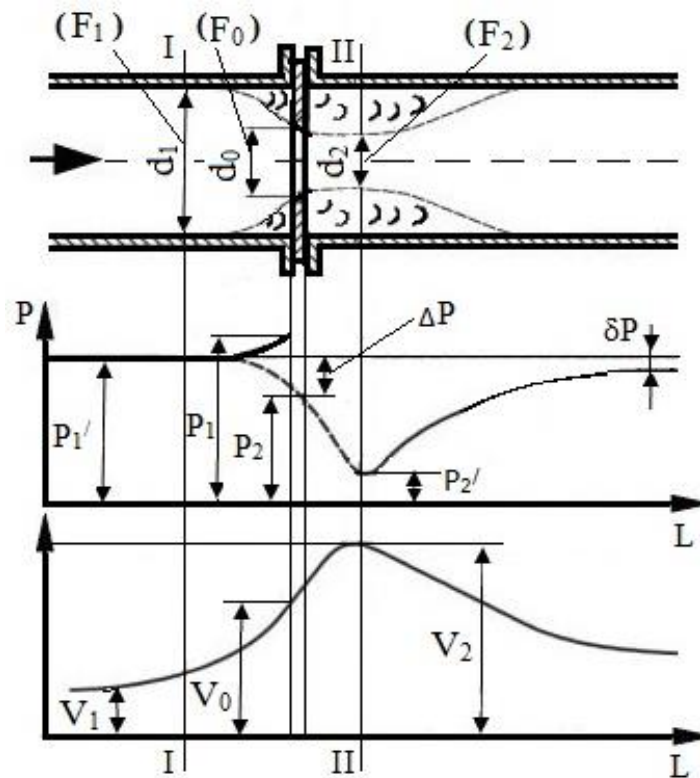


Рисунок В. 1 Зміна тиску та середньої швидкості потоку при проходженні потоку через діафрагму

Перед діафрагмою (опором потоку) тиск струменя біля стінки трубопроводу дещо зростає від значення P_1' до значення P_1 через підпір потоку перед діафрагмою (і за рахунок зменшення швидкості в мертвих зонах перед діафрагмою) і далі знижується до мінімуму за діафрагмою в найбільш вузькому місці струменя. Далі у міру розширення струменя тиск потоку біля стінки знову зростає, але вже не досягає попереднього значення. Наявність підпору й розрідження створює вихрові потоки перед діафрагмою і після неї (на це негативне явище витрачається енергія). Причому зон завихрення потоку після діафрагми більше ніж до неї. Чим менше звуження,

тим більші зони завихрення потоку. Втрати частини тиску ΔP пояснюється головним чином втратою енергії на тертя і завихрення потоку.

Тиск струменя вздовж осі трубопроводу і тиск біля стінки змінюються майже однаково, за винятком ділянки перед діафрагмою і безпосередньо в ній, де тиск потоку по осі трубопроводу знижується (пунктирна лінія на графіку змїну тиску).

Виділимо в трубопроводі два перерізи (Рисунок В. 1): I – переріз перед звужувальним пристроєм, де ще не спостерігається його вплив звужувального пристрою на характер потоку в трубопроводі, II – у місці найбільшого звуження струменя, що утворюється на деякій відстані за діафрагмою.

Позначимо: F_1, F_0, F_2 – площі поперечного перерізу трубопроводу, отвору діафрагми і найбільш звуженого місця струменя; P_1, P_0, P_2 – абсолютні тиски рідини у відповідних перерізах; V_1, V_0, V_2 – середні швидкості рідини у вказаних перерізах потоку.

З умови нерозривності струменя для вибраних перерізів трубопроводу можна записати: $F_1 V_1 = F_0 V_0 = F_2 V_2$. Або

$$\frac{F_0}{F_1} = \frac{V_1}{V_0}, \quad \frac{F_2}{F_0} = \frac{V_0}{V_2}.$$

Відношення $F_0 / F_1 = m$ називають відносною площею звужувального пристрою або модулем звужувального пристрою, а відношення $F_2 / F_0 = \mu$ – коефіцієнтом стиснення струменя. З урахуванням цих позначень отримаємо вираз (В. 1):

$$V_1 = m V_0, \quad V_0 = \mu V_2, \quad (\text{В. 1})$$

тоді

$$V_1 = m \mu V_2. \quad (\text{В. 2})$$

Для нестисливої рідини за постійної густини та без обміну енергії з навколишнім середовищем з урахуванням втрат і нерівномірності розподілу швидкостей для перерізів I і II горизонтального трубопроводу запишемо рівняння Бернуллі, що виражає закон збереження енергії:

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{k_1 V_1^2}{2} = \frac{P_2}{\rho} + \frac{k_2 V_2^2}{2} + \frac{\xi V_2^2}{2},$$

де $\frac{P}{\rho}$ – статичний напір, що відповідає потенціальній енергії; $\frac{V^2}{2}$ – швидкісний напір, що відповідає кінетичній енергії; ρ – густина рідини; $\frac{\xi V_2^2}{2}$ – втрати кінетичної енергії на ділянці I-II; ξ – коефіцієнт опору на ділянці I-II; k_1, k_2 – поправочні коефіцієнти на нерівномірність розподілу швидкостей у розрізах I і II; P'_1, P'_2 – абсолютні тиски у відповідних розрізах.

Тоді

$$\frac{P_1' - P_2'}{\rho} = \frac{k_2 V_2^2 + \xi V_2^2 - k_1 V_1^2}{2} \quad (\text{В. 3})$$

Підставимо в рівняння (В.3) значення V_1 з рівняння (В.2) та розв'яжемо його відносно V_2 , отримаємо:

$$V_2 = \frac{1}{\sqrt{\xi + k_2 - k_1 m^2 \mu^2}} \sqrt{\frac{2(P_1' - P_2')}{\rho}} \quad (\text{В. 4})$$

При виведенні рівняння (В. 4) були використані абсолютні тиски у розрізах P_1' і P_2' , що відповідають розрізам І і П, а в дійсності ці тиски вимірюють безпосередньо біля стінок трубопроводу до і після звужувального пристрою, і вони відповідають тискам P_1 і P_2 .

Позначивши: $\psi = \frac{P_1' - P_2'}{P_1 - P_2}$ (ψ – коефіцієнт переходу від відбору тисків в розрізах І і П до відбору безпосередньо до і після звужувального пристрою) отримаємо:

$$V_2 = \frac{\sqrt{\psi}}{\sqrt{\xi + k_2 - k_1 m^2 \mu^2}} \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_1 - P_2)} \quad (\text{В. 5})$$

З урахуванням рівняння об'ємних витрат нестисливої рідини $Q = V_2 F_2 = V_2 \mu F_0$ отримаємо:

$$Q = \frac{\mu \sqrt{\psi}}{\sqrt{\xi + k_2 - k_1 m^2 \mu^2}} F_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_1 - P_2)} \quad (\text{В. 6})$$

де Q – об'ємна витрата.

Безрозмірний вираз:

$$\alpha = \frac{\mu \sqrt{\psi}}{\sqrt{\xi + k_2 - k_1 m^2 \mu^2}} \quad (\text{В. 7})$$

називають коефіцієнтом витрати. Коефіцієнт витрати α враховує нерівномірний розподіл швидкостей у розрізі потоку, зумовлений в'язкістю рідини та тертям її по стінках трубопроводу, вимірювання тиску не в центрі потоку, а біля стінок трубопроводу та введення в рівнянні витрати (В.6) площі перерізу діафрагми F_0 замість невизначеної площі перерізу найбільшого звуження потоку F_2 . Коефіцієнт витрати α для звужувальних пристроїв різних типів визначають експериментальним шляхом.

Тоді рівняння для об'ємних витрат матиме вигляд:

$$Q = \alpha F_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_1 - P_2)} \quad (\text{В. 8})$$

а для масових витрат:

$$Q_m = \alpha F_0 \sqrt{2\rho (P_1 - P_2)} \quad (\text{В. 9})$$

При вимірюванні витрати стискаємих середовищ (газів і парів) необхідно враховувати зменшення їх густини при проходженні через звужувальний пристрій, де відбувається зменшення тиску. Це враховується введенням в рівняння (В. 8) та (В. 9) коефіцієнта розширення ε .

З огляду на це рівняння витрати парів і газів в об'ємних та масових одиницях виміру відповідно матимуть вигляд:

$$Q = \alpha \varepsilon F_0 \sqrt{\frac{2}{\rho_1} (P_1 - P_2)} \quad (\text{В. 10})$$

та

$$Q_m = \alpha \varepsilon F_0 \sqrt{2 \rho_1 (P_1 - P_2)}, \quad (\text{В. 11})$$

де ρ – густина середовища перед діафрагмою.

Рівняння (В. 10) та (В. 11) справедливі за умови, що швидкість потоку в звужувальному пристрої менша за швидкість звуку.

Таким чином, об'ємні (масові) витрат рідин і газів за інших рівних умов пропорційні квадратному кореню з перепаду на звужувальному пристрої:

$$Q = K \sqrt{\Delta P}, \quad (\text{В. 12})$$

$$Q = K \varepsilon \sqrt{\Delta P}. \quad (\text{В. 13})$$