

## Лекція 6

### Вимірювання рівня рідин та пилу

**Рівнем** називають висоту заповнення технологічного апарата робочим середовищем – рідиною або сипучим тілом. Рівень робочого середовища є технологічним параметром, інформація про нього необхідна для контролю режиму роботи технологічного апарата, а в ряді випадків для керування виробничим процесом і для проведення заходів щодо енергоаудиту [3,4].

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

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

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

На даний час вимірювання рівня в багатьох галузях промисловості здійснюють різними за принципом дії рівнемірами, з яких дістали поширення *візуальні, поплавкові, буйкові, гідростатичні, електричні, ультразвукові і радіоізотопні* [3,4].

#### 3.5.1 Візуальні, поплавкові та буйкові засоби вимірювання рівня

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

У виробничій практиці широкого застосування набули скляні рівнеміри (рис.3.26). Вимірювання рівня за допомогою скляних рівнемірів ґрунтується на законі сполучених посудин. Вказівне скло 1 за допомогою арматур з'єднують із нижньою і верхньою частинами ємності. Спостерігаючи за положенням меніска рідини в трубці 1, роблять висновок про положення рівня рідини в ємності. Для виключення додаткової похибки, обумовленої розходженням температури рідини в резервуарі і у скляній трубці, перед вимірюванням здійснюють промивання скляних рівнемірів [3,4].

Через низьку механічну міцність скляні рівнеміри звичайно виконують довжиною не більше 0,5 м. Тому для вимірювання рівня в резервуарах встановлюється декілька скляних рівнемірів з тим розрахунком, щоб вони перекривали один одного. Абсолютна похибка вимірювання рівня скляними рівнемірами ±(1-2) мм. При вимірюванні можливі додаткові похибки, пов'язані із впливом температури навколишнього середовища. Скляні рівнеміри застосовуються до тисків 2,94 МПа і до температури 300°C [3,4].

Серед існуючих різновидів рівнемірів **поплавкові** є найбільш простими. Дістали поширення поплавкові рівнеміри вузького і широкого діапазонів. Поплавкові рівнеміри вузького діапазону (рис.3.26) звичайно являють собою пристрій, який містить кульковий поплавок діаметром 80–200 мм, виконаний з нержавіючої сталі. Поплавок плаває на поверхні рідини і через штангу і спеціальне ущільнення з'єднується або зі стрілкою вимірювального приладу, або з перетворювачем 1 кутових переміщень в уніфікований електричний або пневматичний сигнал. Рівнеміри вузького діапазону випускаються двох типів: *фланцеві* (рис.3.26 а) і *камерні* (рис.3.26 б), що відрізняються способом їх встановлення на технологічних апаратах. Мінімальний діапазон вимірювання цих рівнемірів 0-10 мм, максимальний – 0–200 мм. Клас точності 1,5. Поплавкові рівнеміри широкого діапазону (рис.3.26 в) являють собою поплавок 1, пов'язаний із противагою 4 гнучким тросом 2. У нижній частині противаги закріплена стрілка, що показує за шкалою 3 значення рівня рідини в ємності.

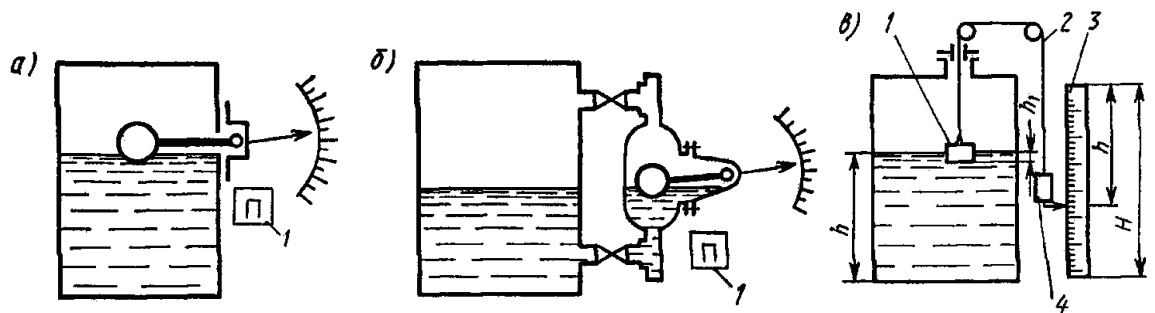


Рисунок 3.26 – Схеми поплавкових рівнемірів

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

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

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

$S$  – площа поплавка, м<sup>2</sup>;

$h_1$  – глибина занурення поплавка, м;

$\rho_{ж}$  – густина рідини, кг/м<sup>3</sup>.

Підвищення рівня рідини змінює глибину занурення поплавка і на нього діє додаткова сила виштовхування. У результаті рівняння (3.20) порушується, і противага опускається вниз до того часу, доти глибина занурення поплавка не стане дорівнювати  $h_1$ . При зниженні рівня діюча на поплавок сила виштовхування зменшується, і поплавок починає опускатися вниз до того часу, доти глибина занурення поплавка не стане дорівнювати  $h_1$ . Для передачі

інформації про значення рівня рідини в резервуарі застосовують сельсині системи передачі [3,4].

В основу роботи **буйкових рівнемірів** покладене фізичне явище, яке описується законом Архімеда. Чутливим елементом у цих рівнемірах є циліндричний буй, виготовлений з матеріалу із густиною, більшою за густину рідини. Буй перебуває у вертикальному положенні і частково занурений у рідину. При зміні рівня рідини в апараті маса буя в рідині змінюється пропорційно зміні рівня. Перетворення ваги буя в сигнал вимірювальної інформації здійснюється за допомогою уніфікованих перетворювачів «сила – тиск» і «сила–струм». Відповідно до виду використовуваного перетворювача сили розрізняють *пневматичні та електричні буйкові рівнеміри*.

Схема буйкового пневматичного рівнеміра наведена на рис.3.27. Рівнемір працює в такий спосіб. Коли рівень рідини в апараті дорівнює початковому  $h_0$  (в окремому випадку  $h_0$  може дорівнювати 0), вимірювальний важіль 2 перебуває в рівновазі, тому що момент  $M_1$ , створюваний вагою буя  $G$ , зрівноважується моментом  $M_2$ , створюваним противагою  $N$ .

Коли рівень рідини стає більшим  $h_0$ , частина буя занурюється в рідину, при цьому вага буя зменшується, а отже, зменшується і момент  $M_1$ , створюваний буєм на важелі 2. Внаслідок того, що  $M_2$  стає більшим  $M_1$ , важіль 2 повертається навколо точки  $O$  за годинниковою стрілкою і прикриває заслінкою 7 сопло 8. Тому тиск у лінії сопла збільшується. Цей тиск надходить у пневматичний підсилювач 10, вихідний сигнал якого є вихідним сигналом рівнеміра. Цей самий сигнал одночасно посилається в сильфон негативного зворотного зв'язку 5. Під дією тиску  $P_{вух}$  виникає сила  $R$ , момент  $M_3$  якої збігається за напрямком з моментом  $M_1$ , тобто дія сили  $R$  спрямована на відновлення рівноваги важеля 2. Рух вимірювальної системи перетворювача відбувається до того часу, доти сума моментів всіх сил, що діють на важіль 2, не стане дорівнювати 0 [3,4].

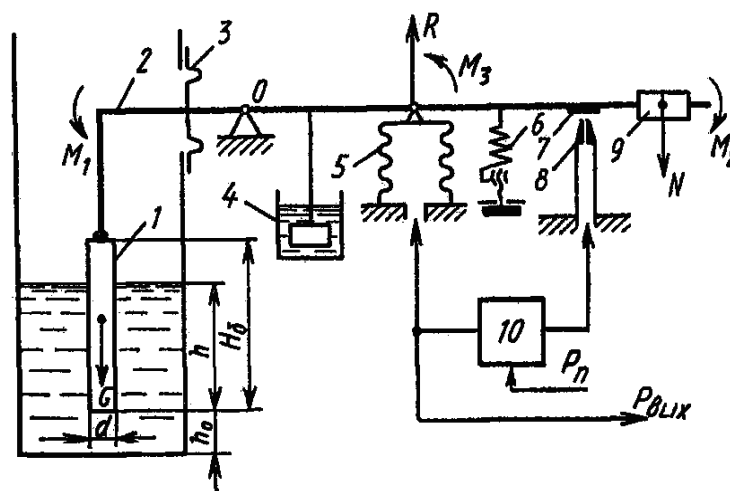


Рисунок 3.27 – Схема буйкового пневматичного рівнеміра

Крім розглянутої модифікації пневматичних рівнемірів, випускаються рівнеміри, оснащені уніфікованим перетворювачем «сила—тиск». Верхні межі вимірювання рівнеміра з уніфікованим електричним сигналом обмежені значеннями 0,02–16 м.

Буйкові засоби вимірювання рівня застосовуються при температурі робочого середовища від  $-40$  до  $+400^{\circ}\text{C}$  і тиску робочого середовища до  $16$  МПа. Класи точності буйкових рівнемірів  $1,0$  і  $1,5$ .

### 3.5.2 Гідростатичні засоби вимірювання рівня

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

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

Вимірювання гідростатичного тиску здійснюється:

- манометром, який підключають на висоті, що відповідає нижньому граничному значенню рівня;
- диференціальним манометром, який підключають до резервуара на висоті, що відповідає нижньому граничному значенню рівня, і до газового простору над рідиною;
- вимірюванням тиску газу (повітря), який прокачується по трубці, опущеної в рідину, що заповнює резервуар, на фіксовану глибину.

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

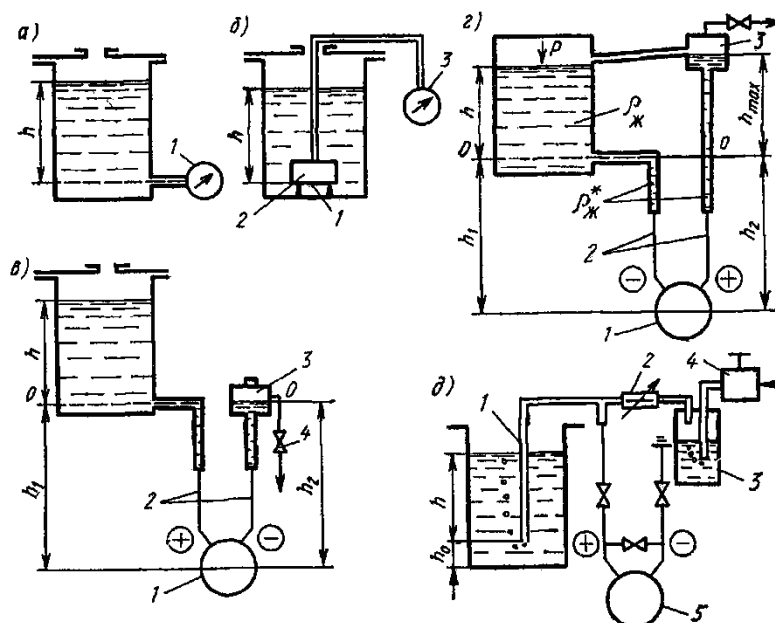


Рисунок 3.28 – Схеми гідростатичних рівнемірів

У нижній частині манометричної системи розміщена ємність 2, отвір якої перекрито тонкою еластичною мембраною 1, а у верхньому отворі приєднаний манометр 3. Застосування еластичної мембрани виключає розчинення повітря в рідині, однак вводить похибку у визначення рівня через пружність мембрани. Перевагою даної схеми вимірювання гідростатичного тиску є незалежність показань манометра від його розміщення щодо рівня рідини в резервуарі.

При вимірюванні рівня за розглянутими схемами мають місце похибки вимірювання, обумовлені класом точності манометрів і змінами щільності рідини.

Вимірювання гідростатичного тиску манометрами доцільно в резервуарах, що працюють при атмосферному тиску. У протилежному разі показання манометра складаються з гідростатичного і надлишкового тисків [3,4].

Для вимірювання рівня рідини в технологічних апаратах, які перебувають під тиском, широкого застосування набули диференціальні манометри. За допомогою диференціальних манометрів можливе також вимірювання рівня рідини у відкритих резервуарах, рівня поділу фаз і рівня розділення рідин.

Вимірювання рівня у відкритих резервуарах, які перебувають під атмосферним тиском, здійснюється за схемою, поданою на рис.3.28 в. Дифманометр 1 через імпульсні трубки 2 з'єднаний з резервуаром і зрівняльною посудиною 3. Зрівняльна посудина застосовується для компенсації статичного тиску, створюваного стовпом рідини  $h_1$  в імпульсній трубці. У процесі вимірювання рівень рідини в зрівняльній посудині повинен бути постійним. Вентиль 4 служить для підтримки постійного рівня в посудині 3. При рівності густини рідин, що заповнюють імпульсні трубки і резервуар, і за умови  $h_1 = h_2$  перепад тиску, Па, вимірюваний дифманометром,

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

При вимірюванні рівня в апаратах, які перебувають під тиском, застосовують схему, наведену на рис.3.28 г. Зрівняльну посудину 3 у цьому випадку встановлюють на висоту, що відповідає максимальному значенню рівня, і з'єднують із апаратом. Статичний тиск  $P$  в апараті надходить в обидві імпульсні трубки, тому вимірюваний перепад тиску  $\Delta P$ , Па, можна визначити за формулою

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

Як бачимо з рівняння (3.24), шкала вимірювального приладу рівнеміра буде оборотною. У розглянутих схемах можуть бути використані дифманометри з уніфікованим струмовим або пневматичним сигналом.

Якщо рідина, що заповнює резервуар, агресивна, то підключення дифманометра до резервуара здійснюється через розділювальні посудини.

Рівнеміри, у яких вимірювання гідростатичного тиску здійснюється шляхом вимірювання тиску газу, який прокачується по трубці, зануреної на фіксовану глибину в рідину, що заповнює резервуар, називають **п'езометричними**. Схема п'езометричного рівнеміра наведена на рис.3.28 д. П'езометрична трубка 1 розміщується в апараті, у якому вимірюється рівень. Газ надходить у трубку через дросель 2, що обмежує величину витрати. Для вимірювання витрати газу служить стаканчик 3 (витрата за допомогою стаканчика визначається за кількістю пухирців, які пробулькують через рідину, що заповнює його, за одиницю часу), а тиск підтримується постійним за допомогою стабілізатора тиску 4. Тиск газу після дроселя вимірюється дифманометром 5 і служить мірою рівня.

При подачі газу тиск у п'езометричній трубці поступово підвищується до того часу, доти зазначений тиск не стане дорівнювати тиску стовпа рідини висотою  $h$ . Коли тиск у трубці стане дорівнювати гідростатичному тиску, з нижнього відкритого кінця трубки починає виходити газ. Витрату підбирають такою, щоб газ залишав трубку у вигляді окремих пухирців (приблизно один пухирець у секунду) [3,4].

При більшій витраті тиск, вимірюваний дифманометром, може бути трохи більшим, ніж гідростатичний, через додаткове падіння тиску, що виникає за рахунок тертя газу об стінки трубки при його проходженні. При дуже малій витраті газу збільшується інерційність вимірювання. Обидва фактори можуть збільшити похибку вимірювання рівня.

П'езометричні рівнеміри дозволяють вимірювати рівень у широких межах (від декількох десятків сантиметрів до 10–15 м). При використанні для вимірювання тиску в п'езометричній трубці дифманометра з уніфікованим вихідним сигналом мають відносну наведену похибку  $\pm(1,0-1,5)\%$ .

Точність вимірювання рівня п'езометричними рівнемірами може бути істотно збільшена, якщо за засіб вимірювання гідростатичного тиску використати автоматичний цифровий манометр дискретно-безперервної дії.

Завдяки простоті реалізації на базі п'езометричних рівнемірів, оснащених цифровими манометрами дискретно-безперервної дії, розроблені і вагоміри.

### 3.5.3 Електричні засоби вимірювання рівня

За видом чутливого елемента електричні засоби вимірювання рівня поділяють на *ємнісні* і *кондуктометричні*.

**Ємнісні рівнеміри.** У рівнемірах цього типу використовується залежність електричної ємності чутливого елемента первинного вимірювального перетворювача від рівня рідини. Конструктивно ємнісні чутливі елементи виконують у вигляді коаксіально розміщених циліндричних електродів або паралельно розміщених плоских електродів. Конструкція ємнісного чутливого елемента з коаксіально розміщеними електродами визначається фізико-хімічними властивостями рідини. Для

неелектропровідних (діелектричних) рідин – рідин, що мають питому електропровідність менше  $10^{-6}$  См/м, застосовують рівнеміри, оснащені чутливим елементом, схеми якого наведені на рис.3.29. Одиницею електропровідності в *SI* служить сименс (См) – величина, обернена ому (Ом) [3,4].

Чутливий елемент (рис.3.29 *а*) складається із двох коаксіально розміщених електродів 1 і 2, частково занурених у рідину. Електроди утворюють циліндричний конденсатор, міжелектродний простір якого до висоти  $h$  заповнено рідиною, а простір  $H-h$  – парогазовою сумішшю. Для фіксування взаємного розміщення електродів передбачений ізолятор 3.

У загальному вигляді електрична ємність,  $\Phi$ , циліндричного конденсатора визначається рівнянням

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

де  $\varepsilon$  – відносна діелектрична проникність міжелектродної речовини;

$\varepsilon_0$  – діелектрична проникність вакууму;

$\varepsilon_{жс}$  – діелектрична проникність рідини;

$C_0$  – ємність прохідного ізолятора (величина постійна);

$H$  – висота електродів;

$D, d$  – діаметри відповідно зовнішнього і внутрішнього електродів.

Для циліндричного конденсатора, міжелектродний простір якого заповнюється речовинами, які мають різні діелектричні проникності, відповідно до рис.3.29 *а* повна ємність  $C_{II}$  визначається виразом

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

де  $C_0$  – ємність прохідного ізолятора;

$C_1$  – ємність міжелектродного простору, заповненого рідиною;

$C_2$  – ємність міжелектродного простору, заповненого парогазовою сумішшю.

Для виключення впливу температури рідини на результат вимірювання застосовують компенсаційний конденсатор (рис.3.29 *в*). Компенсаційний конденсатор 1 розміщується нижче ємнісного чутливого елемента 2 і повністю занурений у рідину. У певних випадках при сталості складу рідини його замінюють конденсатором постійної ємності.

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

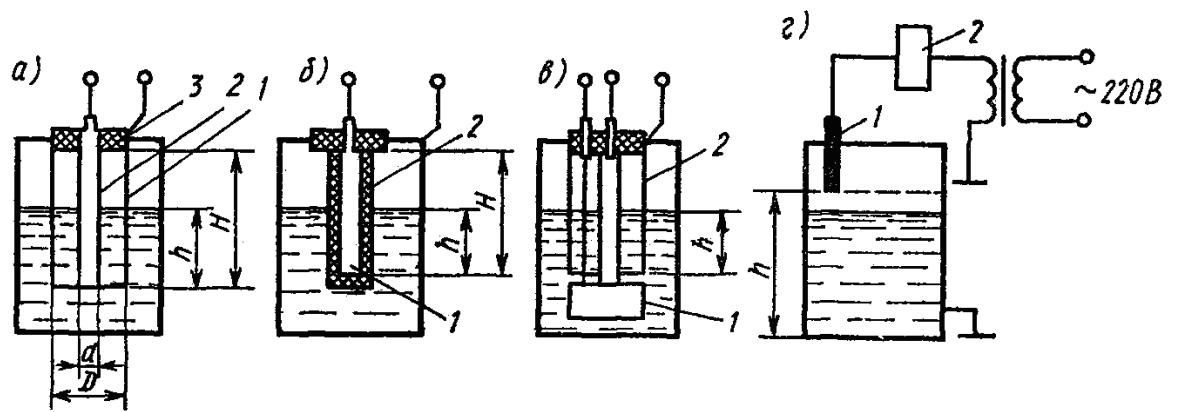


Рисунок 3.29 - Схеми електричних рівнемірів

Чутливий елемент являє собою металевий електрод 1, покритий фторопластовою ізоляцією 2. Електрод частково занурений у рідину. Як другий електрод використовується або стінка резервуара, якщо вона металева, або спеціальний металевий електрод, якщо стінка резервуара виконана з діелектрика.

Перетворення електричної ємності чутливих елементів у сигнал вимірювальної інформації здійснюється мостовим, резонансним або імпульсним методом.

У ємнісних рівнемірах перетворення ємності здійснюється імпульсним методом, у реалізації якого використовуються перехідні процеси, що проходять у чутливому елементі, який вмикається періодично до джерела постійної напруги.

Ємнісні рівнеміри випускаються класів точності 0,5; 1,0; 2,5. Їх мінімальний діапазон вимірювання становить 0-0,4 м, максимальний 0-20 м; тиск робочого середовища 2,5-10 МПа; температура від мінус 60 до плюс 100°C або від 100 до 250°C. На базі розглянутих ємнісних чутливих елементів розроблені вибухобезпечні сигналізатори рівня поділу рідин «нафтопродукт-вода» та інших рідин з різними значеннями відносної діелектричної проникності. При довжині зануреної частини чутливого елемента 0,25 м похибка спрацьовування сигналізатора  $\pm 10$  мм.

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

**Кондуктометричні сигналізатори рівня.** Рівнеміри цього виду призначені для сигналізації рівня електропровідних рідких середовищ і сипучих середовищ із питомою провідністю більше  $10^{-3}$  См/м. На рис.3.29 г наведена схема сигналізатора верхнього граничного рівня рідини. Відповідно до схеми при досягненні рівнем значення  $h$  замикається електричний ланцюг між електродом 1 і корпусом технологічного апарата, при цьому спрацьовує реле 2, контакти якого увімкнені в схему сигналізації.

Принцип дії кондуктометричних сигналізаторів рівня сипучих середовищ аналогічний розглянутому.

Електроди, застосовувані в кондуктометричних сигналізаторах рівня, виготовляють зі сталі спеціальних марок або вугілля. Причому вугільні електроди використовуються тільки при вимірюванні рівня рідких середовищ.



### 3.5.4 Акустичні та радіоізотопні засоби вимірювання рівня

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

Відповідно до цього принципу вимірювання рівня здійснюють за часом проходження ультразвуковими коливаннями відстані від випромінювача до межі поділу двох середовищ і зворотно до приймача випромінювання. Локація межі поділу двох середовищ здійснюється або з боку газу, або з боку робочого середовища (рідини або сипучого матеріалу). Рівнеміри, у яких локація межі поділу двох середовищ здійснюється через газ, називають *акустичними*, а рівнеміри з локацією межі поділу двох середовищ через прошарок робочого середовища – *ультразвуковими*.

Перевагою акустичних рівнемірів є незалежність їх показань від фізико-хімічних властивостей і складу робочого середовища. Це дозволяє використовувати їх для вимірювання рівня неоднорідних, таких, що кристалізуються і випадають в осадок рідин. До недоліків необхідно віднести вплив на показання рівнемірів температури, тиску і складу газу.

Як правило, акустичні рівнеміри являють собою поєднання первинного, проміжного, а у певних випадках і передавального вимірювального перетворювача. Тому акустичні рівнеміри слід розглядати як частину вимірювальної системи з акустичними вимірювальними перетворювачами.

Акустичний рівнемір складається з первинного *I* і проміжного *II* перетворювачів. Первинний перетворювач являє собою п'єзоелемент, що виконує одночасно функції джерела і приймача ультразвукових коливань. При вимірюванні генератор з певною частотою виробляє електричні імпульси, які перетворюються п'єзоелементом *I* в ультразвукові імпульси. Останні поширюються уздовж акустичного тракту, відбиваються від межі поділу рідина-газ і приймаються тим самим п'єзоелементом, що перетворює їх в електричні імпульси.

Відстань між первинним і проміжним перетворювачами – не більше 25 м. Діапазони вимірювання рівня 0-3 м. Клас точності 2,5. Температура контрольованого середовища 10-50°C, тиск у технологічному апараті до 4 МПа.

Акустичні рівнеміри сипучих середовищ за принципом дії і будовою аналогічні акустичним рівнемірам рідких середовищ.

Для безперервного вимірювання рівня рідин (агресивних, горючих та ін.) без зіткнення з ними можуть бути застосовані **радіоізотопні рівнеміри**, дія яких базується на пропущенні через резервуари з рідиною  $\gamma$ -променів радіоізоотопів певних речовин. Якщо об'єкт вимірювання помістити між випромінювачем (радіоізотопом) і приймачем випромінювання (лічильником ядерних часток), розміщеними в одній горизонтальній площині, то в момент проходження через цю площину контрольованого рівня рідини буде відбуватися різка зміна інтенсивності  $\gamma$ -променів, які надходять на приймач, внаслідок зміни поглинальної здатності середовища. Ця властивість

поглинання випромінювання використовується для синхронного переміщення (спостереження) випромінювача і приймача слідом за рівнем у резервуарі.

Радіоізотопні рівнеміри випускаються з діапазоном показань від 0-10 м. Швидкість спостереження за рівнем, що змінюється, становить 100 мм/хв. Основна абсолютна похибка приладу  $\pm 10$  мм. Рівнемір живиться від мережі змінного струму напругою 220 В, частотою 50 Гц. Споживана приладом потужність 50 В·А. Відстань, що допускається, між первинним і проміжним перетворювачем 50 м і між проміжним перетворювачем і вторинним приладом 1000 м.

Експлуатація радіоізотопних рівнемірів проводиться у строгій відповідності до інструкції підприємства-виробника і санітарних вимог. Через небезпеку для обслуговуючого персоналу радіаційного опромінення зазначені рівнеміри мають обмежене застосування.