

УДК 531.756

Григорій Николін
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра автоматизації теплових і хімічних процесів

ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ГУСТИНИ ВОДЯНИХ СУСПЕНЗІЙ ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

© Николін Григорій, 2002

The condition and principles of construction of measuring transducers of density of water suspensions is reviewed. The possibility of application of different types of measuring transducers for measurement of density of water suspensions of the granulated ores and density of drill fluids is analyzed. The advantages of application of level-sensitive transducers of density in automatic control systems are showed.

Вимірювання густини занечищених рідин та суспензій сьогодні актуальне в багатьох галузях промисловості. Пошук конструкцій надійних вимірювальних перетворювачів густини занечищених рідин та суспензій набуває ще більшої актуальності при створенні систем автоматичного керування технологічними процесами, в яких густина суспензії є одним з головних параметрів, за яким здійснюється оптимізація перебігу самого процесу чи визначається якість готового продукту.

Сьогодні, незважаючи на велику кількість пропонованих різними фірмами пристроїв, завдання вимірювання густини занечищених рідин та суспензій, зокрема водяних суспензій розмелених порід на гірничо-збагачувальних комбінатах чи бурових розчинів, вважається остаточно невирішеним. Це пояснюється тим, що зазначені середовища, густину яких необхідно вимірювати, характеризуються властивостями, які унеможливають роботу густиноміра – значне налипання речовин на елементах густиноміра, забруднення та забивання трубок чи отворів у елементах конструкції густиномірів тощо. Для прикладу можна навести завдання контролю густини водяної суспензії розмеленої мідної руди на мідних комбінатах, оскільки будь-які густиноміри, що там працюють, вимагають постійного нагляду і технічного обслуговування (декілька разів на зміну): навіть в гідростатичному густиномірі гідростатичні трубки заростають складовими пульпи протягом декількох годин.

Одними з перспективних вимірювальних перетворювачів густини рідин безперервної дії вважаються вібраційні густиноміри. Вони можуть працювати при несприятливих умовах експлуатації, підвищеній забрудненості, вібраціях, пульсаціях витрати і тиску середовища, коливань температури, в'язкості тощо. Це досягається, зокрема, за рахунок безпосереднього перетворення контрольованого параметра в частотно-модульований сигнал. Розглянемо за рахунок чого забезпечуються кращі характеристики таких перетворювачів:

- висока завадостійкість модульованих сигналів дозволяє досягнути значно вищої точності вимірювання частотними давачами порівняно з аналоговими, зменшити вплив наступних ланок вимірювальної схеми на сумарну похибку, а також передавати інформацію на велику відстань;

- робоча частота вібраційних давачів в декілька разів перевищує частоту мережної напруги, що дає змогу уникнути впливу зовнішніх завад на основний сигнал;

- носієм інформації при частотному сигналі можна розглядати часовий інтервал між імпульсами, перетворення якого в число є досить простим і точним;

– потужність, що споживається частотно-модулюючими давачами, не перевищує декілька десятків міліват [1].

Дія вібраційних густиномірів базується на залежності власної частоти коливань механічних резонаторів від густини рідини. Найбільш поширеними і вивченими є проточні вібраційні давачі густини з трубчастими резонаторами, всередині яких протікає контрольована рідина. Коливні системи вібраційних густиномірів діляться на системи зі зосередженими параметрами і розподіленими параметрами, причому перспективнішими вважаються давачі з розподіленими параметрами резонаторів [2].

Сьогодні налічується більше сотні патентів і авторських свідоцтв, що охоплюють різні конструкції вібраційних густиномірів. У Великобританії, США, Німеччині, Японії і Угорщині налагоджений їх серійний випуск, є інформація про застосування густиномірів власної конструкції у Франції і Австрії [3]. У колишньому СРСР дослідним заводом ім. Калініна “НИПИнефтехимавтомат” (Баку) серійно виготовлявся автоматичний вимірювач густини (АИП) [4].

Давач такого густиноміра об’єднує в собі резонатор з системою збудження коливань і чутливий елемент термокомпенсуючого пристрою. У найпростішому варіанті резонатор виконується у вигляді прямої [5-8] або U-подібної трубки [9-11], закріпленої в нерухомих опорах. Така форма відрізняється низькою стабільністю резонансної частоти коливань через велике розсіювання енергії у вузлах кріплення або місцях підведення і відведення рідини від резонатора.

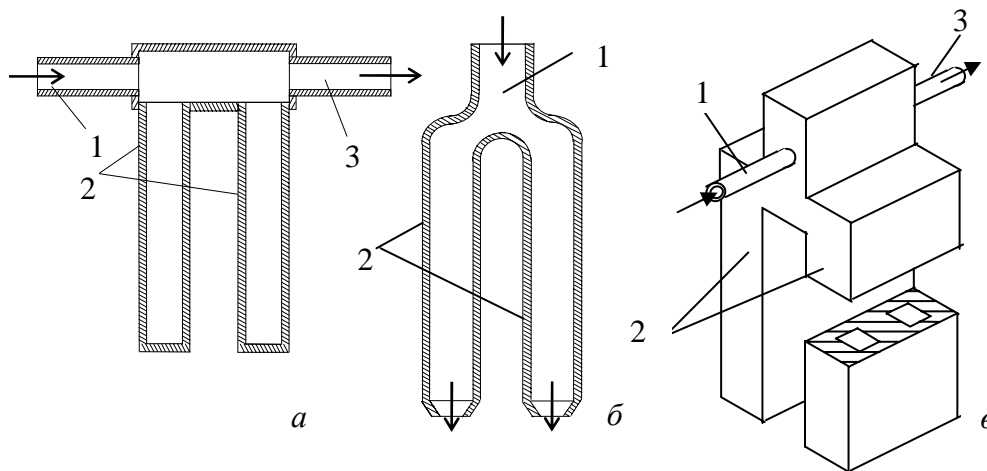


Рис. 1. Схеми камертонних резонаторів розімкнутого типу:

1 – вхідний патрубок; 2,4 – коливні гілки резонатора; 3 – вихідний патрубок

На рис. 1 показані схеми проточних камертонних резонаторів розімкненого типу, що являють собою дві паралельні трубки, жорстко закріплені в нерухомій основі. У резонаторі, схема якого показана на рис. 1, а. [12], нижні кінці трубок, що коливаються, заглушені, при цьому рідина, що протікає між вхідним і вихідним патрубками, заповнює внутрішню порожнину трубок і визначає частоту їх протифазних коливань. Недоліком конструкції є відсутність протоку всередині трубок, які коливаються, що призводить до збільшення інерційності показів через поганий обмін рідини, а також до випадання і відкладення механічних домішок.

Резонатор, схема якого зображена на рис. 1, б, виконана у вигляді трубчастого камертону класичної форми [13] з вхідним патрубком і гілками що коливаються у протифазі. Такий резонатор можна застосовувати для вимірювання густини рідини, що вільно витікає, як чистої, так і забрудненої рідини, однак витікання рідини з гілок, що коливаються, призводить до різкого зниження добротності системи через демпфування. Схема резонатора, показана на рис. 1, в [14], не має вище перелічених недоліків завдяки тому, що рідина підводиться до камертону і відводиться від нього через патрубки, закріплені в нерухомій основі.

Резонатори замкнутого типу (здвоєні камертонні осцилятори), схеми яких представлені на рис. 2, мають порівняно із розімкнутими такі переваги: відсутність позиційної похибки, що залежить від положення резонатора в просторі, та велику початкову частоту коливань, що зумовлює вищу чутливість давача. Давач густини, розроблений фірмою Solartron (Великобританія) [15] (див. рис. 2, а), має камертонний резонатор замкнутого типу, котрий складається з двох трубок, жорстко закріплених в опорах (вузлах кріплення), відділених від основи пружинними амортизаторами. Вимірюване середовище подається в паралельні трубки, які коливаються, і виводиться з них через з'єднувальні елементи (дві пари гофрованих шлангів або сільфонів). Перевагами пристрою можна вважати зручну форму резонатора і високу добротність коливної системи, недоліками – велику кількість гофрованих зв'язків, які володіють гістерезисом і зумовлюють додаткове розсіювання енергії. Аналогічний резонатор [4] використаний в серійному густиномірі АІП [16].

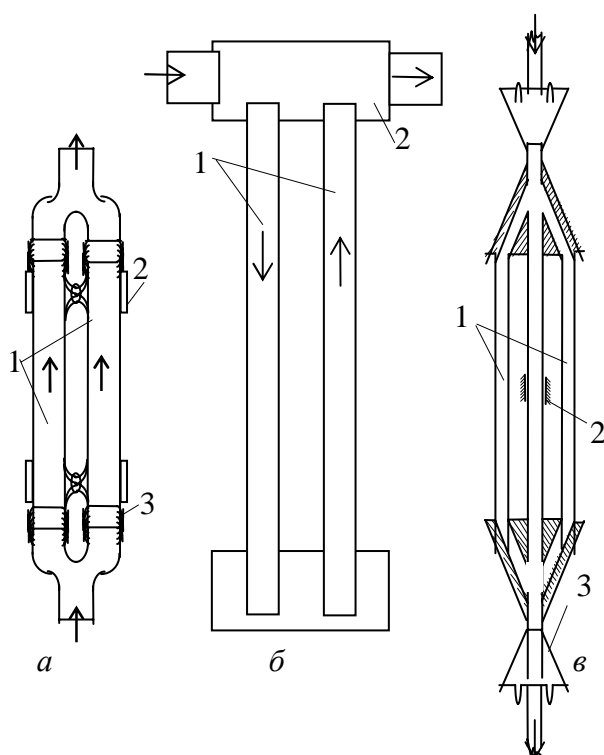


Рис.2. Схема камертонних резонаторів замкнутого типу: 1 – трубки що коливаються (гілки резонатора); 2 – вузли кріплення резонатора; 3 – з'єднувальні елементи

Недоліком давача, описаного в роботі [3] (див рис. 2, б), є жорстке кріплення резонуючих трубок до зовнішніх елементів в цих місцях, де мають місце повздовжні зміщення. Це спричиняє зниження добротності і збільшення впливу зовнішніх вібрацій на роботу резонатора.

На рис. 2, в показана схема резонатора, призначеного для вимірювання густини чистих рідин і суспензій. Цей резонатор відрізняється від розглянутих тим, що він має вузли кріплення у вигляді стрижнів, що відходять від центра симетрії. З'єднувальними елементами в цьому резонаторі служать мембрани, що мають менший гістерезис порівняно з гумовими патрубками або сильфонами, дозволяють досягнути вищої добротності коливної системи порівняно з раніше розглянутими конструкціями. Резонатор доцільно розміщувати вертикально, щоб рідина, особливо забруднена, протікала через всі трубки зверху вниз.

Поряд з проточними давачами останніми роками розроблені вібраційні густиноміри занурюваного типу, схеми яких показані на рис. 3. Для вимірювання густини рідин в трубопроводах широко застосовується давач (див. рис. 3, а), котрий має оболонковий резонатор у вигляді вібруючої котушки, що складається з тонкостінного циліндра, закріпленого у фланцях з отворами (для потоку рідини ззовні циліндра і вирівнювання тисків) [17]. Фланці вібруючого циліндра жорстко закріплені в корпусі, що виготовлений з немагнітного матеріалу.

Недоліком розглянутої конструкції є те, що збудження коливань оболонки проводиться через шар рідини, котра може містити завішені частинки, що засмічують давач. Для усунення цього недоліку запропонований давач [17], в якому порожнина між корпусом і зовнішньою поверхнею циліндра ізолювана від вимірюваного середовища і заповнена розділюючою рідиною з таким самим надлишковим тиском. Передається тиск від вимірювального середовища до розділюючої рідини мембранним блоком.

Вібраційні густиноміри, схеми яких показані на рис.3,б,в, мають ізолювану від контрольованого середовища систему збудження. Резонатор представляє собою пустотілий диск (див. рис. 3, б) [18], або коробку з виступаючими ребрами (див. рис. 3, в) [19]. Обидва давачі доцільно застосовувати для вимірювання концентрації суспензій у відкритих резервуарах, куди їх можна занурювати на визначену глибину за допомогою спеціального штока.

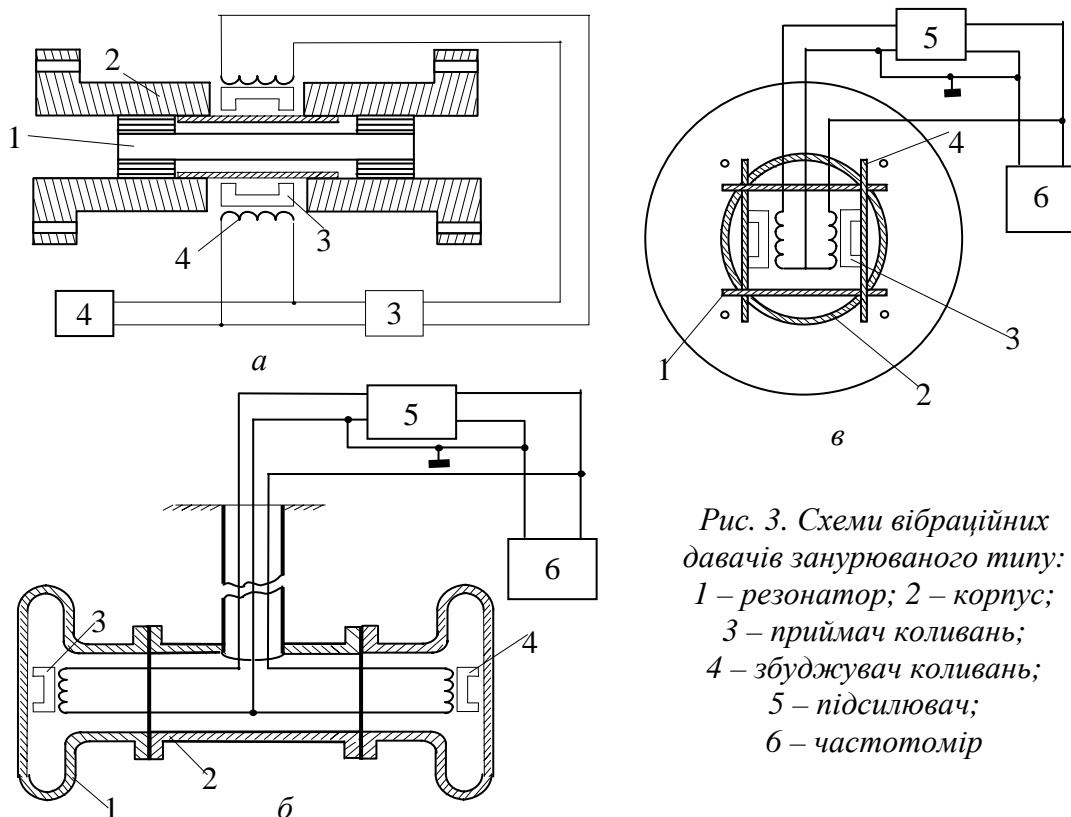


Рис. 3. Схеми вібраційних давачів занурюваного типу:
 1 – резонатор; 2 – корпус;
 3 – приймач коливань;
 4 – збуджувач коливань;
 5 – підсилювач;
 6 – частотомір

З аналізу відомих конструкцій резонаторів вібраційних густиномірів видно, що деякі з них можна б було застосовувати для вимірювання густини забруднених рідин, зокрема суспензій. Однак на практиці, особливо на виробництвах, де суспензії спричиняють активну корозію металів, з яких виготовлені давачі резонаторів, або там, де наявна адгезія, тобто налипання твердих частинок до елементів давачів, практично жоден з резонаторів непридатний для роботи в таких умовах.

Отже, в умовах гірничо-збагачувальної промисловості і на бурових установках, де характерним є висока адгезія частинок контрольованого середовища до будь-яких поверхонь, описані прилади працювати не зможуть.

Проаналізуємо інші відомі методи вимірювання і можливості їх вдосконалення з погляду застосування для таких вимірювань. Сьогодні, зокрема, в реальній практиці для неавтоматичних вимірювань використовують поплавкові, вагові, п'єзометричні густиноміри. У зв'язку з цим проведемо аналіз і експериментальні дослідження власне цих густиномірів, вияснимо способи вдосконалення їх чутливих елементів.

Розглянемо схему поплавкового густиноміра рідини з частково зануреним поплавком 2 (рис. 4), що розміщений в ємності 1. Через цю ємність безперервно прокачується контрольована рідина. За рахунок переливання в ємності 1 підтримується постійний рівень. Контрольована речовина видаляється з густиноміра через збірник 3. При зміні густини рідини змінюється рівень занурення поплавка 2 в ємність. Досягнення положення рівноваги сил N і G забезпечується при цьому зміною довжини l стрижня 4, зануреного у рідину. Переміщення поплавка 2 перетворюється в електричний сигнал за допомогою диференційного трансформатора 5.

Вага поплавка 2 зі стрижнем 4 (в повітрі) G і виштовхувальна сила N , що діє на поплавок, описуються виразами

$$G = mg, \quad (1)$$

$$N = (V + lS)\rho g, \quad (2)$$

де m – маса поплавка і стрижня; V – об'єм поплавка; l – довжина ділянки стрижня, зануреного в рідину; S – площа поперечного січення стрижня.

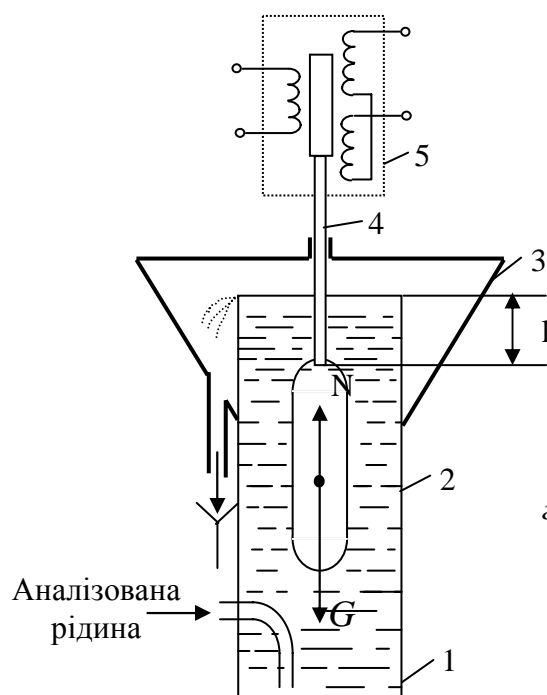


Рис. 4. Схема поплавкового густиноміра рідини з частково зануреним поплавком

При рівновазі сил N і G , з виразів (1) і (2) з врахуванням впливу на стрижень на поверхні розподілу фаз сил поверхневого натягу

$$l = \frac{(m - V\rho + A)}{S\rho} \quad (3)$$

де A – постійна для даної рідини величина, що враховує поверхневий натяг.

Як видно з (1, 2), довжина l , а відповідно і сигнал диференційного трансформатора 5 однозначно пов'язані з густиною рідини. Маса m вибирається залежно від діапазону вимірювань. Існує багато різноманітних конструкцій густиномірів з частково зануреним поплавком [20]. Вони характеризуються високою чутливістю, що дозволяє здійснювати вимірювання у вузькому діапазоні (всього 0,005–0.01 г/см³) з похибкою $\pm(1,5-3)\%$ від діапазону вимірювань.

Враховуючи наведені залежності, можемо зробити висновок, що поплавкові густиноміри з плаваючим чи зануреним поплавком хоча й володіють високою чутливістю, але придатні для контролю густини тільки однорідних і порівняно чистих рідин. Наявність у рідині завислих частинок, що можуть осідати на поплавках або утворювати нарости на їх поверхні, змінює вагу поплавків, що спотворює результати вимірювань.

У зоні розміщення поплавкової системи повинна підтримуватись постійна і порівняно невелика за значенням швидкість потоку, щоб не створювати великого динамічного тиску на поплавок. У цей самий час швидкість повинна бути такою, щоб обмін рідини в системі приладу проходив якомога швидше.

Відомі спеціальні конструкції поплавкових витратомірів, що дозволяють вимірювати густину суспензій. У густиномірі [20] до поплавка обтічної форми прикладена невелика вібрація, внаслідок чого тверді частинки повинні сповзати з поверхні поплавка. Але таке можливе за наявності твердих частинок, що не адгезують з поверхнями поплавка. Ще один поплавковий густиномір, розроблений Minneapolis-Honeywell Regulator Co., Philadelphia [21] для контролю густини пульпи, що містить тверді частинки високої питомої ваги, має оригінально виконані конструкцію пробовідбірної посудини, спосіб підводу і видалення пульпи, а також твердих осадів. Прилади таких конструктивних рішень можна застосовувати для вимірювання густини не тільки пульпи, але й вапняного молока. Але такі прилади все одно зберігають працездатність за умови, якщо їх періодично промивати водою упродовж 5-10 хв (хоча при високій адгезії промивання проблеми не вирішує).

Одним з найточніших і найпоширеніших методів вимірювання густини є пікнометричний метод, який, власне, і застосовується для ручного вимірювання густини водяної суспензії розмеленої мідної руди.

Принцип дії пікнометричних приладів базується на визначенні густини рідких продуктів по зміні маси постійного об'єму контрольованого продукту, зважаючи на співвідношення

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (4)$$

де m – маса контрольованого продукту; V – об'єм.

Пікнометричний метод порівняно з поплавковим має низку переваг, основними з яких є використання високої чутливості ваги; контроль густини забруднених середовищ з грубими домішками. Для цього в різних країнах світу використовували ваговий петлеподібний густиномір для вимірювання густини суспензій і рідин, що містять тверді частинки, зокрема і вапнякового молока.

Для забезпечення нормальної роботи даного густиноміра необхідно пропускати через нього рідину з великою швидкістю, щоб усунути осадження твердих частинок, що містяться у рідині на внутрішні поверхні трубок. Для чищення трубок конструкції передбачують роз'ємні коліна [22].

Заслугує уваги розроблений для контролю роботи річкових землеснарядів ваговий густиномір зрівноважений важелями і вантажиками [23].

Тим не менше розглянуті конструкції вагових густиномірів не можуть забезпечити вимірювання густини середовищ, в яких наявні частинки, що адгезують з поверхнями приладу.

Достатньо широкого застосування для вимірювання густини суспензій, в'язких рідин і навіть рідин, які кристалізуються, набувають гідростатичні густиноміри з безперервним продуванням інертного газу (або повітря) через контрольовану рідину. Такі густиноміри відомі ще й під назвою пневмометричні. Тиск газу при незмінній глибині занурення трубки і постійному рівні рідини прямо пропорційний густині рідини, оскільки тиск стовпа рідини, що повинні подолати бульбашки газу, пропорційний її густині. Отже, тиск газу служить мірою шуканої густини. Переваги цих густиномірів: вимірювальна частина приладу не занурюється у вимірювальне середовище; можливе застосування для в'язких, забруднених, агресивних речовин і тих, що кристалізуються; зручність передавання показів на відстань.

Якщо в реальних умовах технологічного процесу неможливо забезпечити постійний рівень контрольованого середовища, то можна застосовувати пневмометричний рівнемір, виконаний за диференційною схемою. У цьому випадку справедлива рівність

$$\Delta P = P_2 - P_1 = \rho g h_2 - \rho g h_1 = (h_1 - h_2) \rho g = \rho g h, \quad (5)$$

де P_1 – тиск в короткій гідростатичній трубці, P_2 – тиск в довгій гідростатичній трубці, h_1 – глибина занурення короткої гідростатичної трубки, h_2 – глибина занурення довгої гідростатичної трубки, h – різниця глибини занурення гідростатичних трубок.

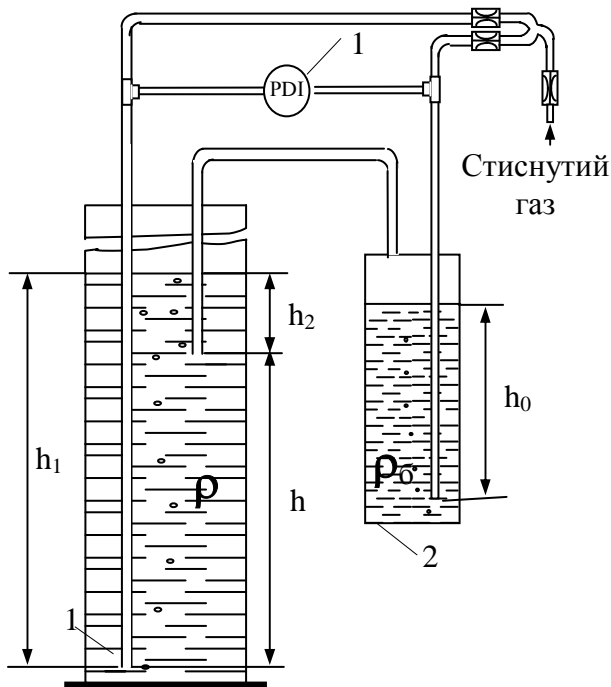
Цей густиномір має такий самий недолік як і диференційний рівнемір з безпосереднім вимірюванням тиску. Вищу точність забезпечує схема з компенсацією баластного перепаду тиску за допомогою посудини, заповненої рідиною відомої густини. Компенсатор включений в лінію подачі газу до коротшої трубки (рис.5).

Аналіз схеми свідчить, що покази дифманометра визначаються залежністю

$$\Delta P = [\rho h_1 - (\rho h_2 + \rho_0 h_0)] g = (\rho h - \rho_0 h_0) g. \quad (6)$$

Якщо $h_0 = h$ і в якості допоміжної речовини використовується рідина, густина котрої ρ_0 дорівнює нижній границі вимірювань ρ_{\min} , то $\Delta P = 0$ при $\rho = \rho_{\min}$, тобто діапазон вимірювання густини буде розтягнутий по всій шкалі дифманометра. Рівень допоміжної рідини повинен підтримуватись постійним [20].

Дослідження процесу утворення повітряної бульбашки на кінці трубки, зануреної в рідину, показало, що оптимальний діаметр імпульсних трубок слід визначати з врахуванням зміни максимального капілярного тиску повітря всередині трубок під час утворення і відривання бульбашок [24]. Капілярний тиск досить великий при діаметрі 1-2 мм, а починаючи з 4 мм він невеликий і при подальшому збільшенні діаметра змінюється мало. Тому оптимальний діаметр вихідного отвору трубки знаходиться в межах 4-8 мм, тоді максимальний капілярний тиск невеликий і становить 50-70 Па. Бульбашки, що виходять з трубки, не деформуються і мають форму півсфери. Застосування трубок більшого діаметра недоцільне: призводить до збільшення витрати газу, часу запізнення і амплітуди коливань тиску.



*Рис.5. Диференційний пневмометричний густиномір з компенсацією баластного перепаду тиску:
1 – дифманометр; 2 – резервуар з досліджуваною рідиною;
3 – резервуар з допоміжною рідиною*

Слід відзначити, що покази густиноміра можуть спотворюватися, якщо швидкість газу в імпульсних трубках різна. Отже, необхідно, щоб з трубок виходила однакова кількість бульбашок за одиницю часу (10-15 за 1 с).[26] До речі, густиноміри з імпульсними трубками, що мають кінці конічної форми, працюють стабільніше ніж з трубками, що мають прямий торцевий зріз.

У роботі [26] показано, що вимірюваний дифманометром перепад тиску є функцією не тільки різниці глибини занурення в рідину трубок і густини контрольованого середовища, але також залежить від режиму витікання повітря з трубок давача, який визначається швидкістю витікання і еквівалентним цій швидкості гідравлічним опором.

Оскільки контрольоване середовище в таких густиномірах не контактує із внутрішньою поверхнею трубок, то явище адгезії речовини не повинно б впливати на результати вимірювань і такі густиноміри можна б було застосовувати для контролю розглядуваних суспензій. Виконані нами дослідження роботи таких густиномірів на суспензіях розмелених руд, зокрема мідних руд, а також на бурових розчинах показали, що спостерігається забивання пневмометричних трубок із середини. При цьому досліджували та аналізували різні пристосування (як відомі, так і власної конструкції), які мали б усувати вказане явище налипання чи забивання трубок. Наприклад, автори патенту [25] рекомендують оснащувати кінець трубки, що опускається у рідину, наконечником у вигляді патрубка більшого діаметра, косо зрізаного в нижній частині і закритого похилим дном. Отвір для виходу бульбашок газу з трубки в рідину виконується в боковій стінці наконечника в самій нижній його частині біля місця спряження з похилим дном. Однак усунути забивання трубок не вдалось.

Для побудови густиномірів, здатних працювати при вимірюванні густини пульпи та суспензій з явно вираженими адгезійними властивостями, в роботах [27,28] доведено доцільність і запропоновано застосовувати елементи відтворення рівня, за допомогою яких можна відтворити рівень контрольованого середовища рівнем іншого середовища, який вже можна контролювати будь-яким способом без втрати працездатності пристрою.

Елемент відтворення рівня контрольованого середовища зі змінною та невідомою густиною ρ_x рівнем іншого середовища, наприклад, рівнем певної стандартної рідини із сталою та відомою густиною ρ_c відповідно до [27] виконується у вигляді трубки, зануреної в контрольоване середовище на певну глибину H , через яку безперервно проливається ця стандартна рідина. Стандартна рідина, яка подається (вливається) у верхню частину трубки елемента відтворення рівня, витісняє з цієї трубки контрольоване середовище. Внаслідок цього трубка повністю заповнюється стандартною рідиною. Рівень h стандартної рідини (наприклад, води) в трубці визначається станом рівноваги гідростатичних тисків обидвох рідин на торці зануреної частини трубки, тобто на висоті H стовпа контрольованого середовища (глибині занурення трубки) [27]:

$$h = H \cdot \rho_x / \rho_c. \quad (7)$$

Отже, рівень h стандартної рідини в трубці відтворює рівень H контрольованого середовища в об'єкті вимірювання щодо нижнього торця трубки відповідно до відношення значень густин ρ_x / ρ_c цих рідин. При цьому, якщо $\rho_x > \rho_c$, то рівень h стандартної рідини в трубці згідно з (7) завжди буде вищим за рівень H .

У технологічному процесі розмелювання породи в виробництві міді, а саме: в так званих класифікаторах, де необхідно вимірювати густину водяної суспензії розмеленої мідної руди, рівень цієї суспензії не постійний, він змінюється і ці зміни достатньо значні. У зв'язку з цим відповідно до розглянутих вище підходів та загальної теорії інваріантності [29] пропонується будувати рівневі вимірювальні перетворювачі густини за двоканальною вимірювальною схемою, в даному випадку на двох елементах відтворення рівня.

Схема такого рівневого вимірювального перетворювача показана на рис. 9.

Знайдемо різницю рівнів Δh стандартної рідини між обома трубками елементів відтворення рівня – вихідний сигнал первинного вимірювального перетворювача густини, побудованого на цих трубках,

$$\Delta h = h_1 - h_2 = \rho_x / \rho_c \cdot (H_1 - H_2). \quad (8)$$

де, крім відомих, H_1 та H_2 – глибина занурення трубок відповідно першого та другого елементів відтворення рівня.

Із (8) знайдемо характеристику перетворення такого вимірювального *перетворювача густини рідини*

$$\Delta h = k \cdot \rho_x, \quad (9)$$

де $k = (H_1 - H_2) / \rho_c$ – коефіцієнт передачі даного вимірювального перетворювача.

Отже, якщо обидві трубки, на яких реалізуються елементи відтворення рівня, розміщені близько одна від одної так, що зміна загального рівня в об'єкті вимірювання не спричинить зміну значення $(H_1 - H_2)$, що досягається без якихось спеціальних проблем, то коефіцієнт передачі k даного вимірювального перетворювача густини не чутливий до зміни рівня контрольованого середовища в об'єкті вимірювання.

На рис. 9 показані також гідростатичні трубки такого вимірювального перетворювача. До речі, гідростатичні трубки розміщуються в трубках елементів відтворення рівня на різних віддальх від їх торців, чим досягається можливість зміни характеристики перетворення всієї вимірювальної системи.

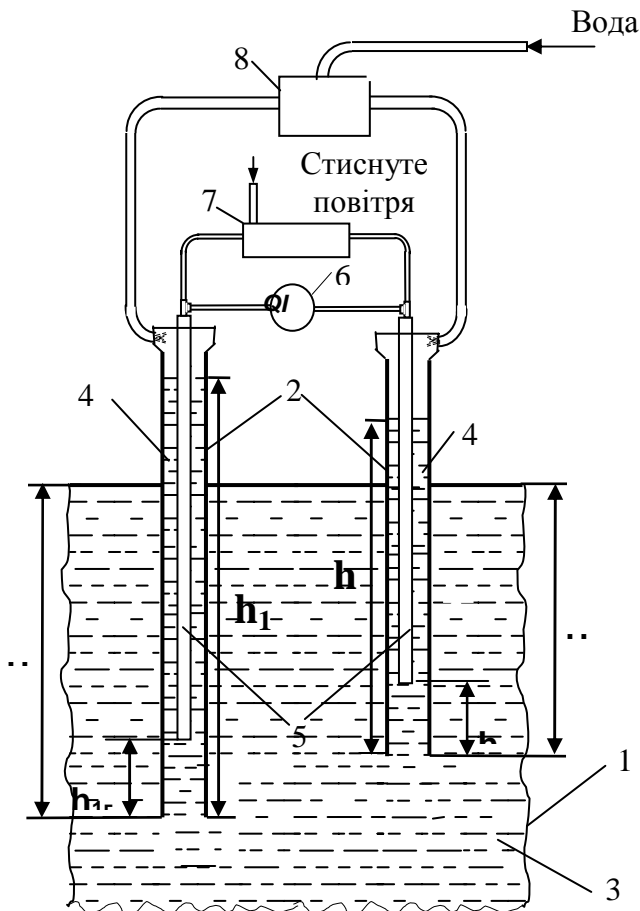


Рис.9. Схема рівневого вимірювального перетворювача густини:

- 1 – об'єкт вимірювання;
- 2 – трубка елемента відтворення рівня;
- 3 – контрольоване середовище;
- 4 – стандартна рідина;
- 5 – гідростатичні трубки;
- 6 – пристрій для відображення значення густини;
- 7 – стабілізатор витрати повітря;
- 8 – стабілізатор витрати води

Характеристику перетворення розглянутого густини, інваріантного до зміни рівня контрольованого середовища в об'єкті вимірювання, можна записати у вигляді рівняння

$$\Delta P = A \cdot \rho_x \cdot + B, \quad (10)$$

де

$$A = (H_1 - H_2) \cdot g; B = (h_{2zm} - h_{1zm}) \cdot \rho_c g,$$

де, крім відомих, h_{1zm} і h_{2zm} – зміщення гідростатичних трубок щодо відповідно торця трубки першого елемента відтворення рівня та торця трубки другого елемента відтворення рівня; g – прискорення земного тяжіння.

Як видно із (10), характеристика перетворення такого густини має два ступені свободи, а саме – коефіцієнти A та B , значення яких легко змінюються відповідно переміщенням трубок елементів відтворення рівня та переміщенням гідростатичних трубок, тобто завжди можна узгодити діапазон вторинного приладу (дифманометра) із зміною густини контрольованого середовища від ρ_{min} до ρ_{max} .

Експериментальні дослідження таких рівневих густини підтвердили їх працездатність в умовах роботи на водяній суспензії розмеленої мідної руди.

Проведений аналіз робоздатності пристроїв для вимірювання густини суспензій, в'язких речовин і сумішей, що кристалізуються, проведені за результатами аналізу дослідження, підтвердили перспективність застосування прямих методів вимірювання густини. Показана перевага запропонованих [27,28] нових підходів до побудови вимірювальних перетворювачів густини на рівневих вимірювальних перетворювачах для в'язких речовин і сумішей, що кристалізуються, густини, занечисчених рідин та водяних суспензій.

1. Жуков О.П., Кулаков М.В. Вибрационные плотномеры жидкостей // Измерение, контроль, автоматизация. 1981. №2 (36).
2. Новицкий П.В., Кнорринг В.Г., Гутинков В.С. Цифровые приборы с частотными датчиками. Л., Энергия, 1970. – 423с.
3. Кивилис С.С. Промышленные плотномеры // Метрология и измерительная техника. М.: ВИНТИ. – 1975. – Т.3. – С. 285-313.
4. А.С. 401908 (СССР) Резонансный плотномер/ Т. М. Алиев и др. // Оpubл. в Б.И. – 1973. – №41. – С. 151.
5. А.с.146081 (СССР) Резонансный датчик для измерения плотности жидкостей / В.А.Колесников // Оpubл. в Б.И. – 1962. – №7. – С.48.
6. Пат.1280997 (Великобритания). Improvements in or relating to fluid density transducers / J.W. Stansfeld.
7. А.С.249238 (СССР) Частотный датчик для измерения плотности жидкости в потоке/ В.М. Эйгенброт, Ю.М. Белоусов // Оpubл. в Б.И. – 1977. – №14. – С. 121.
8. А.С.554482 (СССР) Устройство для измерения плотности жидкости/ Н.Н. Голубев, Н.Н. Жихорева, В.М. Конин // Оpubл. в Б.И. – 1977. – №14. – С.121.
9. А.С. 269546 (СССР) Виброакустический плотномер / П.Л. Фельдблюм, Л.Л. и др. // Оpubл. в Б.И. – 1970. – №15. – С.108.
10. А.С. 269546 (СССР) Датчик вибрационного плотномера / П.Л. Фельдблюм, Л.Л. Лебедев, С.Ф. Пекин // Оpubл. в Б.И. – 1973. – №40. – С.117.
11. А.С.460489 (СССР) Датчик плотности жидкости /В.С.Давыдов и др. // Оpubл. в Б.И. – 1975. – №6. – С. 87.
12. Пат. 1800342 (ФРГ) Anordnung zum messen der dichte von flüssigkeiten. К. Н., Drucker J. E. Sepperler.
13. А.С. 426170 (СССР) Вибрационный плотномер / Ю.П. Жуков, В.Н. Бегунов // Оpubл. в Б.И. – 1974. – №16. – С 124.
14. А.С. 486247 (СССР) Вибрационный плотномер жидкости./ Ю.П. Жуков, В.Н. Бегунов // Оpubл. в Б.И. – 1975. – №36.– С 106.
15. Пат. 1158790 (Великобритания) Improvements in fluid density meters. D. K. Wakefield.
16. Абдулаев А.А. Бунятов Г.С. Плотномер для нефтяной и нефтехимической промышленности // Приборы и системы управления. – 1976. – №9. – С.91.
17. Пат.1175586 (Великобритания) Measuring of fluid density/J/ Agar.
18. А.С. 523332 (СССР) Погружной вибрационный плотномер / Ю.П. Жуков, В.Н. Бегунов, А.Г. Мурашов // Оpubл. в Б.И. – 1976. – №28. – С 116.
19. А.С. 630556(СССР) Вибрационный плотномер./ Ю.П. Жуков, В.П. Черенков, А.Г. Мурашов // Оpubл. в Б.И. – 1978. – №40. – С. 140.
20. Кивилис С.С. Плотномеры. – М.: Энергия, 1980.
21. Rachlin V/ Improved system measures heavy, slurr density, "Mining Engineering". – 1956. – 8. – №12, – 1224-1227.
22. Linford A., "Measurement and automatic control of liquid density, "Sugar", 1954. S. 47. 49.
23. Трошин Л.П. Автоматический контроль удельного веса пульпы методом отбора пульпы при строительстве электростанций // Сб. научных тр. Ивановского энергетич. ин-та. Госэнергоиздат. 1957. Вып. 7.
24. Лыгач В.Н., Масленников Б.М., Сергеев В.П. Некоторые вопросы расчета пьезометрических датчиков // Тр. НИИ горно-хим сырья. – 1969. – Вып. 15. – С. 175-182.
25. Пат. №1429352 (Франция).
26. Глыбин И.П., Усовершенствованный пневмометрический прибор для измерения плотности жидкости. – Труды КФ ВНИИСП. – Гостехиздат УССР. 1955. Вып. 2.
27. Пістун Є. П., Николин Г. А. Моделювання елементів відтворення рівня для вимірювальних перетворювачів густини // Методи та прилади контролю якості. – 2000. – № 5.
28. Пістун Є. П., Николин Г. А. Рівневі вимірювальні перетворювачі густини водяних суспензій // Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація. – 2000. – № 404.
29. Петров Б.Н. Викторов В.А. и др. Принцип инвариантности в измерительной технике. – М.: Наука, 1976. – 244 с.