

Таблиця 1 Результати експериментальних досліджень витратоміра з гідродинамічними вставками різних діаметрів

Колектор		Гідродинамічний витратомір, D=0,098 м		Гідродинамічний витратомір, D=0,135 м		Гідродинамічний витратомір, D=0,150 м	
Тиск, Па	Витрата, м ³ /с	Тиск, Па	Витрата, м ³ /с	Тиск, Па	Витрата, м ³ /с	Тиск, Па	Витрата, м ³ /с
196,1	0,1109	147,1	0,1178	49,03	0,1197	9,807	0,1204
490,3	0,1754	343,2	0,1799	107,9	0,1775	19,61	0,1703
784,5	0,2218	539,4	0,2256	166,7	0,2207	34,32	0,2253
1079	0,2601	735,5	0,2634	235,4	0,2622	49,03	0,2693
1373	0,2935	931,6	0,2965	294,2	0,2931	58,84	0,295
1667	0,3234	1138	0,3276	362,9	0,3256	73,55	0,3298
1961	0,3508	1324	0,3534	431,5	0,3550	83,36	0,3511
2256	0,3761	1520	0,3787	490,3	0,3785	98,07	0,3808
2354	0,3842	1569	0,3847	510	0,3859	103	0,3902

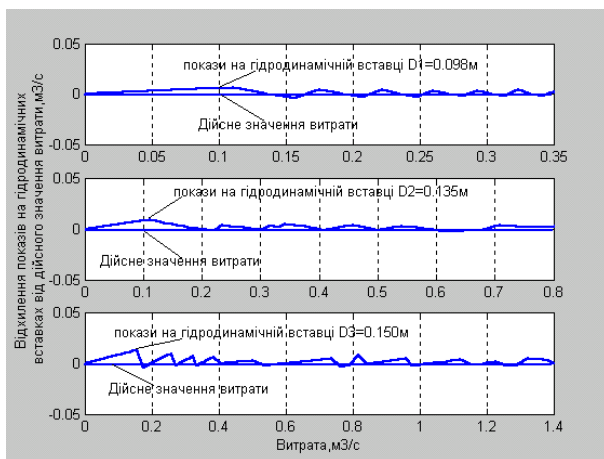


Рис. 3. Відхилення витрат за перепадом тиску на гідродинамічних вставках від дійсного значення витрати

Приведені експериментальні дослідження показують, що витратомір, побудований на принципі трубки Піто-Прандтля з роздільним виконанням трубок повного і статичного тиску придатний для вимірювання витрати на рідинних теплоносіях, а значить може використовуватися у лічильниках кількості тепла.

1. Измерения в промышленности. Справочник под редакцией П.Профоса. – М.: Металлургия., 1980. – 648 с. 2. Жуковский С.С., Кулик О.М., Кулик М.П. Пристрій для вимірювання кількості тепла. Патент України №71051, Бюл. № 11. – 2004. 3. Щербатюк Б., Жуковский С., Чаковский Ю. Дослідження повітропроникності фільтрувальних матеріалів. Ринок інсталяцій, №5. – 2004.

УДК 681.121

МАЛОВИТРАТНИЙ ВИХОРОВИЙ ВИТРАТОМІР

© Витвицька Л.А., Климишин С.І, 2006

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Запропоновано конструкцію пристрою для вимірювання малих витрат рідини при числах Рейнольдса близьких до 1000

В даний час для вимірювання витрати рідких і газоподібних середовищ, а також промислової пари все більш широке застосування знаходять вихорові витратоміри, що пов'язано з їх високою точністю і

надійністю. Вихорові витратоміри таких фірм, як Foxboro, Fisher and Porter, Eatch, Neptune (США), Yokogawa (Японія), Endress-Hauser (Німеччина) міцні, надійні, довговічні, допускають

перевантаження, працюють рідинами, газами і паром при температурах до 200°C з похибкою вимірювання 1,5%.

Напрямок розвитку вихорової витратометрії є поліпшення метрологічних і експлуатаційних характеристик приладів, побудова пристроїв з автоматичною корекцією характеристик по в'язкості і температурі вимірюваного середовища на основі застосування мікропроцесорної техніки і з використанням як додаткових датчиків температури і в'язкості, так і інформативних властивостей доріжки Кармана. Взагалі, при певних конструктивних рішеннях вихідний вимірювальний сигнал первинного перетворювача може нести інформацію як про температуру, так і про в'язкість контролюваного потоку [1].

До недоліків вихорових витратомірів відносяться значна втрата тиску, яка досягає 30-50 кПа, і деякі обмеження щодо можливості їх використання: вони непридатні при малих швидкостях із-за важкості вимірювання сигналу, що має малу частоту, вони не застосовуються також при числах Рейнольдса менших 10^4 .

Частоту вихороутворення f можна визначити за методом розмірностей з величин, що характеризують потік, оточуючий тіло. При цьому отримуємо таку залежність:

$$f = Sh \cdot v/d, \quad (1)$$

де v - швидкість потоку; d - характерний розмір тіла; Sh - безрозмірний критерій, названий числом Струхала.

Оскільки при постійності числа Sh частота f пропорційна v , то, вимірюючи цю частоту, можна судити про швидкість v , а значить, і про об'ємну витрату потоку. Для отримання лінійної шкали вихорового витратоміра потрібно, щоб число Sh залишалось постійним в якомога більшому діапазоні чисел Рейнольдса.

Залежність між витратою Q і f задається рівнянням [1]:

$$Q_0 = (f \cdot s \cdot d / Sh), \quad (2)$$

де s - площа якнайменшого поперечного перетину потоку навколо тіла обтікання.

Застосування залежності (1) з метою вимірювання зустрічає ряд труднощів, оскільки залежність має імовірнісний характер. При кінцевій довжині тіла обтікання з порушується когерентність частоти вихороутворення на окремих ділянках тіла. З іншого боку, процес вихороутворення залежить від стану потоку перед тілом обтікання, оскільки характер попередніх збурень потоку впливає на місце і час відриву пограничного шару. Для підвищення стабільності процесів вихороутворення, зменшення

лобового опору і збільшення області чисел Рейнольдса, при яких відбувається регулярне вихороутворення, в тілі обтікання передбачають пристрої для відсмоктування пограничного шару. З цією метою в тілі обтікання прорізають вузьку щілину, через яку загальмована рідина, яка тече в пограничному шарі, відсмоктується всередину тіла. Якщо відсмоктування проводиться достатньо сильно, то можна повністю запобігти відриву пограничного шару від стінки.

Знакозмінне перетікання рідини в каналі, викликане процесами вихороутворення при обтіканні циліндра, створює попереми́нне всмоктування і викид рідини на протилежних виходах. Даний гідродинамічний процес істотно стабілізує формування завихорень, робить їх незалежними від зовнішніх збурень, знижує лобовий опір тіла обтікання, оскільки повне згортання і відрив вихорової формації не відбувається. Порожня перетічного каналу є резонатором з власною частотою резонансу ν_s і коефіцієнтом загасання h_s . Власні частоти такого резонатора f_s визначаються його розмірами d і швидкістю пружних коливань у вимірюваному середовищі c :

$$f_s = \frac{\nu}{d} \psi_s \left(\frac{c}{d} h_s \right), \quad (3)$$

де ψ_s - коефіцієнт пропорційності.

Величина коефіцієнта загасання залежить від в'язкості середовища і його теплоємності. Таким чином, при наявності в тілі порожнини, здатної резонувати, частоти вихороутворення будуть залежати не тільки від ν/d згідно з залежністю (1), але і від c/d . Оптимальним слід вважати такий режим течії у вихоровій камері, при якому для заданої витрати споживаний напір буде мінімальним.

Взаємодію вихорів з резонансною порожниною слід розглядати як нелінійну автоколивальну систему зі взаємною дією. Амплітуда коливань в точці резонансу визначається такою емпіричною залежністю [2]:

$$p_s = \rho \frac{(v')^2}{2} \frac{f_s}{h_s} \psi_s \left(\frac{v' f_s}{d} \right), \quad (4)$$

де штрих біля швидкості v означає, що формула справедлива тільки для значень швидкості, при якій виникає резонанс; ρ - густина середовища.

Первинний перетворювач запропонованої конструкції вихорового витратоміра представляє собою відрізок трубопроводу, в якому вмонтоване тіло обтікання. Тіло обтікання представляє собою циліндр спеціальної форми. Перпендикулярно набігаючому потоку рідини в тілі обтікання

виконаний наскрізний канал перетоку. В каналі перетоку встановлений приймач-перетворювач вихорівих коливань, який фіксує частоту зриву вихорів з тіла обтікання.

В даному витратомірі запропонований приймач-перетворювач вихорівих коливань (ППВК) у вигляді тонкої гнучкої пластини (рис.1), поміщеної в каналі зворотного зв'язку тіла обтікання, тобто в каналі перетоку.

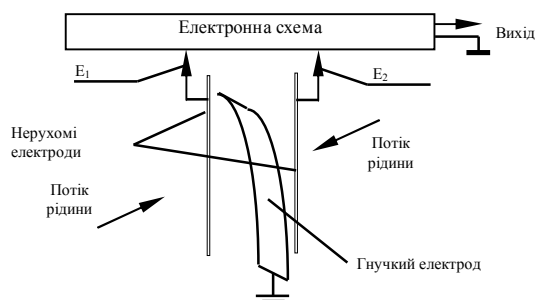


Рис. 1. Схема контактнo-кондуктометричного первинного перетворювача вихорівих коливань

Пластина має електричний контакт з металевим корпусом приладу і є електродом. По обидві сторони від нього розташовані стрижні, один з яких є електродом, а інший – обмежувачем коливань пластини. Таким чином, запропонований ППВК з двома зануреними в рідину електродами, один з яких гнучкий. Знакозмінний потік рідини в каналі зворотного зв'язку тіла обтікання примушує гнучкий електрод коливатися з частотою, рівною частоті вихороутворення.

При зміні відстані між гнучким електродом, що коливається, і стрижневими електродами одночасно змінюється міжелектродна провідність. Її величина перетворюється в електричний сигнал. Даний пристрій має два робочі режими, які відрізняються як параметрами руху, так і методом знімання вихідного сигналу:

– режим А має місце при малих амплітудах коливань гнучкого електроду, коли він не торкається стрижневого електроду або торкається останнього тільки при великих витратах вимірюваного середовища;

– режим Б виникає при великих амплітудах коливань гнучкого електроду, коли він торкається стрижневого електроду при кожному коливанні у всьому діапазоні вимірюваних витрат. Для роботи в даному режимі жорсткість гнучкого електроду повинна бути істотно нижчою, ніж в першому випадку.

В режимі А коливання гнучкого електроду викликають зміни міжелектродного опору між ним і одним із стрижневих електродів. В цьому випадку вихідний сигнал знімається з одного з електродів, а інший стрижневий електрод використовується як

обмежувач амплітуди коливань і може бути невідключеним або підключатися до корпусу приладу. Зміна опору міжелектродного проміжку перетворюється в електричний сигнал за допомогою електронної схеми.

Контактнo-кондуктометричний первинний перетворювач вихорівих коливань (КК ППВК), що працює в режимі А, відрізняється високою чутливістю, оскільки навіть при невеликих амплітудах коливань гнучкого електроду на виході пристрою формується корисний сигнал. Це дозволяє використовувати такий перетворювач в приладах, розрахованих на вимірювання малих витрат, при низьких швидкостях потоку. Так, в роботі [1] вказано, що вихоріві витратоміри не можуть застосовуватися при швидкостях рідини менше 0,2 м/сек, що пояснюється важкістю реєстрації слабких вихорівих формацій. В той же час витратомір з КК ППВК в режимі А надійно працює з числами Рейнольдса 1000 – 1300, що для характерного розміру тіла обтікання 25 мм, відповідає швидкості потоку рідини близько 0,04 – 0,05 м/сек.

Навколо поверхні зануреного в електроліт металевого електроду завжди виникає оболонка із заряджених іонів. Знак заряду її завжди протилежний знаку заряду самого електроду. Подвійний електричний шар може бути уподібнений електричному конденсатору. Однією його обкладкою є електрод, іншою – шар прилеглих до нього іонів.

Ємність і величина е.р.с. такого конденсатора залежить від потенціалу електроду і будови подвійного електричного шару.

Електроди, занурені в рідину, утворюють електролітичну комірку. Спрощена схема заміщення такої комірки є ланцюгом, наведеним на рис. 2.

Тут R_{ce} – опір чутливого елемента, обумовлений провідністю міжелектродного простору; C_{oc1} і C_{oc2} – ємність подвійного електричного шару, який утворюється на поверхні металевих електродів, опущених в електроліт; E_1 , E_2 – е.р.с. подвійного електричного шару, яка виникає з причини різниці електрохімічних потенціалів між матеріалом електродів і електролітом; E_{me} – міжелектродна е.р.с., яка є алгебраїчною сумою е.р.с. внутрішніх потенціалів електродів.

В КК ППВК використовуються електроди з двох хімічно однакових металів, на яких здійснюється одна і та ж електродна реакція. Е.р.с. такої системи була б рівна нулю, якби фізичні властивості обох електродів, а отже, і їх стандартні потенціали були б також однаковими. Якщо ж завдяки різним фізичним властивостям електродів їх стандартні потенціали не співпадають, то е.р.с.

системи відрізнятиметься від нуля. Це так звані фізичні ланцюги, одним з різновидів яких є аллотропічні ланцюги [3,4]. В таких ланцюгах, до яких і відноситься електролітична комірка КК ППВК, е.р.с. системи відрізнятиметься від нуля тому, що вільна енергія двох електродів, виготовлених з металу однієї і тієї ж модифікації, не обов'язково однакова. Це спостерігається, наприклад, у тому випадку, коли електроди відрізняються за розмірами зерен, які їх створюють, або знаходяться під різною внутрішньою напругою. Електрод, створений більш дрібними кристалами або знаходиться під надмірною механічною напругою, відіграє роль негативного полюса комірки. Він розчиняється, а на іншому електроді відбувається осадження металу.

У КК ППВК негативним електродом є гнучкий пластинчастий електрод, а позитивними – стрижневі електроди. Гнучкий електрод, виготовляється з дрібнокристалічної модифікації нержавіючої сталі методом прокату і має підвищену внутрішню енергію. З цих причин на затискачах КК ППВК присутня деяка е.р.с., яка може служити вихідним сигналом перетворювача, працюючого в режимі А.

При зміні відстані між електродами під час роботи ППВК змінюється величина $R_{че}$. Для перетворення зміни опору у вихідний електричний сигнал через електроди необхідно пропускати струм. Постійний струм в даній схемі недопустимий, оскільки він супроводжується явищем електролізу. Електроліз негативно впливає на роботу перетворювача з багатьох причин. По-перше, впливаючи на електроди ППВК продукти електролізу руйнують метал електродів, виникає корозія, в першу чергу розчиняється гнучкий електрод, який має малу товщину (0,1 мм). По-друге, підвищена концентрація іонів в області електродів, яка виникає в процесі електролізу, змінює електропровідність міжелектродного проміжку. Зменшення величини опору міжелектродного проміжку знижує вихідний сигнал, який знімається з електродів і тим самим знижує чутливість приладу. Тому для перетворення зміни величини опору у вихідну напругу необхідно використовувати змінний струм. Частота живлячого струму повинна бути не менше ніж в 50 – 100 разів вищою від найбільшої частоти модулюючого сигналу, яка рівна 30 – 40 Гц. Застосовувати більш високу частоту не має сенсу, оскільки при цьому пропорційно збільшується споживаний генератором струм. Таким чином, для роботи КК ППВК необхідно живити електроди змінним струмом частотою 2 – 5 кГц. На виході між корпусом приладу і одним із стрижневих електродів виникає амплітудно-модульована напруга з величиною модуляції 5 – 10%, огинаюча якої змінюється з частотою вихороутворення.

При виникненні електричного контакту між

електродами, що можливо при великих відхиленнях гнучкого електроду, коефіцієнт модуляції вихідної напруги зростає до 100%, але при цьому робота пристрою не порушується. Замикання електродів можна усунути, встановивши на кінці стрижневих електродів гумові або пластмасові ізолятори. Одночасно такі наконечники будуть служити демпферами для гасіння паразитних високочастотних коливань гнучкого електроду, які можуть виникати в деяких випадках.

Через рідину між електродами постійно протікає змінний струм. Він тече між гнучким і нерухомим електродами. Чим буде менша величина протікаючого струму, тим економічніше витрачатиметься енергія джерела живлення електронної схеми. При малих струмах, порядку 5 – 10 мкА, можливо перевести схему приладу на живлення від батарей.

Модуляція міжелектродного опору, що виникає при коливаннях гнучкого електроду, перетворюється електронною схемою у вихідний сигнал. Глибина модуляції визначає рівень сигналу, що знімається, а отже – чутливість приладу. Чим менша величина модуляції (відносної зміни опору), тим важче виявити корисний сигнал, тим складніше буде вимірювати малі витрати.

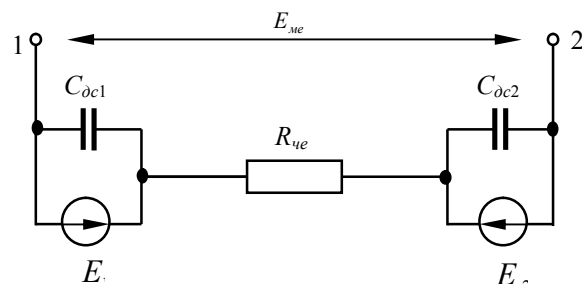


Рис. 2. Спрощена схема заміщення контактнокондуктометричного первинного перетворювача вихорових коливань

Використання витратоміра такої конструкції розширить сферу його застосування, оскільки розшириться діапазон вимірювання витрати для менших чисел Рейнольдса та менших значень швидкостей потоку.

1. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количеств: Справочник: Кн.2/ Под общ. ред. Е.А. Шорникова – 5-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Политехника, 2004. – 412с.
2. Киясбейли А.Ш., Перельштейн М.Е. Вихревые измерительные приборы. – М.: Машиностроение, 1978. – 152 с.
3. А.Л.Ротинян, К.И.Тихонов, И.А.Шошина Теоретическая электрохимия. – Л.: Химия, 1981. – 562 с.
4. Антропов Л.И. Теоретическая электрохимия. – М.: Высшая школа, 1969. – 378 с.