

УДК 681.121

Л.А. Витвицька<sup>1</sup>, З.Я. Витвицький<sup>2</sup>, Х.З. Лаврук<sup>2</sup><sup>1</sup> Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ<sup>2</sup> Івано-Франківський національний медичний університет, Івано-Франківськ

## МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ МАЛОВИТРАТНОГО ВИХОРОВОГО ВИТРАТОМІРА

Запропоновано конструкцію пристрою для вимірювання малих витрат рідини при числах Рейнольдса, близьких до 1000. Проведений метрологічний аналіз пристрою, розрахована сумарна невизначеність вимірювання.

**Ключові слова:** сумарна і стандартна невизначеність вимірювання, вихоровий витратомір, число Рейнольдса, контактнo-кондуктометричний перетворювач.

### Вступ

На 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. До недоліків вихорових витратомірів відносяться значна втрата тиску, яка досягає 30-50 кПа, і деякі обмеження в можливості їх використання, оскільки вони не застосовуються для вимірювання витрати потоків при числах Рейнольдса, менших  $10^4$  [1].

У даній роботі зроблена спроба створення вихорового витратоміра з розширеним динамічним діапазоном вимірювання в області малих середньовитратних швидкостей та чисел Рейнольдса. Задача розв'язується на основі використання контактнo-кондуктометричного первинного перетворювача і покращення роботи всіх функціональних блоків системи вимірювання.

**Метою роботи** є обґрунтування доцільності розроблення конструкції маловитратного вихорового витратоміра шляхом його метрологічного аналізу та розрахунку невизначеності вимірювання витрати.

### Виклад основного матеріалу

Принцип роботи даних витратомірів базується на явищі утворення завихрень потоку, які виникають за тілом обтікання, розташованого всередині трубопроводу. Частоту вихороутворення  $f$  можна визначити за методом розмірностей величин, що характеризують потік, оточуючий тіло:  $v$  - швидкість потоку;  $d$  - характерний розмір тіла. При цьому отримуємо таку залежність:

$$f = Sh \frac{v}{d}, \quad (1)$$

де  $Sh$  – 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  $Sh$  залишалося постійним в якомога більшому діапазоні чисел Рейнольдса.

Залежність між витратою  $Q$  і  $f$  задається рівнянням

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

де  $s$  — площа поперечного перерізу потоку довкола тіла обтікання.

Застосування залежності (1) з метою вимірювання зустрічає ряд труднощів, оскільки залежність має ймовірнісний характер. При кінцевій довжині тіла обтікання 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 розширення області чисел Рейнольдса, при яких відбувається регулярне вихороутворення, в тілі обтікання передбачають пристрої для відсмоктування пограничного шару. З цією метою в тілі обтікання (циліндрі) прорізають вузьку щілину, через котру загальмована рідина, яка тече в пограничному шарі, відсмоктується всередину тіла. Якщо відсмоктування проводиться достатньо сильно, то можна повністю запобігти відриву пограничного шару від стінки.

Первинний перетворювач запропонованої конструкції вихорового витратоміра представляє собою відрізок трубопроводу, в якому вмонтоване тіло обтікання - циліндр спеціальної форми. Перпендикулярно набігаючому потоку рідини в тілі обтікання виконаний наскрізний канал перетоку. В каналі перетоку встановлений приймач-перетворювач вихорових коливань, який фіксує частоту зриву вихорів з тіла обтікання.

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

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. Знакозмінний потік рідини в каналі зворотнього 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.

Контактно-кондуктометричний первинний перетворювач вихорових коливань (КК ППВК), працюючий 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 [2] вказано, що вихорові витратоміри не можуть застосовуватися при швидкостях рідини менше 0,2 м/сек, що пояснюється важкістю реєстрації слабких вихорових формацій. В той же час витратомір з КК ППВК, працюючий 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.

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 значення опору. Для перетворення зміни опору у вихідний електричний сигнал через електроди необхідно пропускати струм. Пос-

тійний 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 немає сенсу, оскільки при цьому пропорційно збільшується споживаний генератором струм [3]. 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 служать 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 витратиться 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.

На основі проведеного аналізу впливу факторів на точність вимірювання витрати розроблено схему нагромадження невизначеності, яка подана на рис. 2.

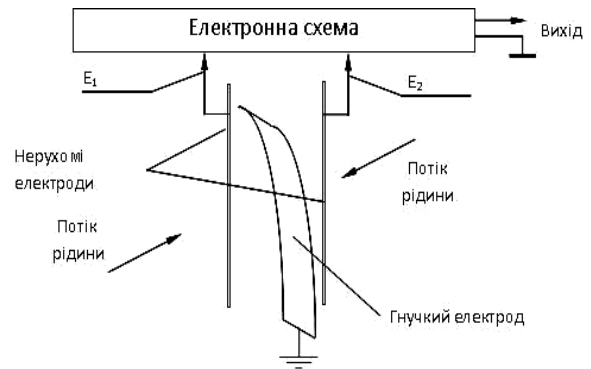


Рис. 1. Схема контактно-кондуктометричного первинного перетворювача вихорвих коливань

Складові невизначеності оцінюються за типом В, на основі проведених експериментів визначені границі зміщення показів, спричинені різними факторами.

Границі зміщення показів витратоміра за рахунок вібрації трубопроводів становлять  $0,015 \text{ м}^3/\text{с}$ . Тоді, згідно з рівномірним розподілом, отримаємо:

$$u_1^2(q) = \frac{(2 \cdot 0,015)^2}{12} = 7,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Границі зміщення при впливі атмосферних явищ становлять  $0,001 \text{ м}^3/\text{с}$ . Відповідна стандартна невизначеність

$$u_2^2(q) = \frac{(2 \cdot 0,001)^2}{24} = 0,017 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Границі зміщення за рахунок дії місцевих опорів становлять  $0,005 \text{ м}^3/\text{с}$ . Відповідна стандартна невизначеність рівна:

$$u_3^2(q) = \frac{(2 \cdot 0,005)^2}{12} = 0,83 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Границі зміщення показів вихорового витратоміра за рахунок неоднаковості розмірів та шорсткості поверхні тіла обтікання становлять  $0,015 \text{ м}^3/\text{с}$ . Тоді отримаємо згідно трикутного розподілу:

$$u_4^2(q) = \frac{(2 \cdot 0,015)^2}{24} = 3,75 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Границі зміщення при наявності механічних домішок в рідині становлять  $0,001 \text{ м}^3/\text{с}$ . Відповідна стандартна невизначеність рівна:

$$u_5^2(q) = \frac{(2 \cdot 0,001)^2}{12} = 0,033 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Границі зміщення за рахунок пульсації потоку становлять  $0,002 \text{ м}^3/\text{с}$ . Тоді отримана така складова невизначеності:

$$u_6^2(q) = \frac{(2 \cdot 0,002)^2}{12} = 0,13 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Невизначеність перетворювача, спричинена зміщенням показів при калібруванні пластини може бути визначена за типом А шляхом багаторазового

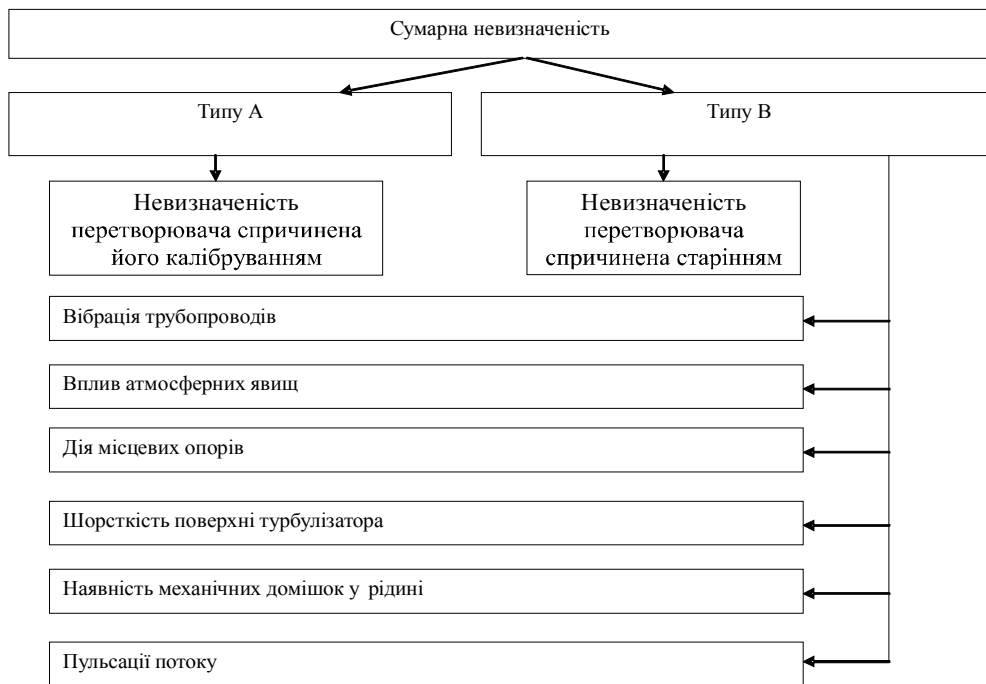


Рис. 2. Схема нагромадження невизначеності мало витратного витратоміра

визначення амплітуди її коливань при різних значеннях витрати, які подаються через задавач витрати за допомогою градуовальної установки. За експериментальними даними, наведеними в [2], дана невизначеність становить

$$u_7^2(q) = 3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Невизначеність перетворювача, спричинена його старінням, яка розрахована через границі зміщення (0,001 м<sup>3</sup>/с) за ймовірно очікуваними результатами після 3-річної експлуатації, становить

$$u_8^2(q) = \frac{(2 \cdot 0,001)^2}{36} = 0,011 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Сумарна невизначеність вимірювання витрати визначається шляхом геометричного сумування всіх складових з врахуванням відсутності кореляційних зв'язків між ними:

$$u(\bar{q}) = \sqrt{u_1^2(q) + u_2^2(q) + u_3^2(q) + u_4^2(q) + u_5^2(q) + u_6^2(q) + u_7^2(q) + u_8^2(q)} = \sqrt{15,601 \cdot 10^{-5}} = 3,91 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3/\text{с}.$$

### МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НИЗКОРАСХОДНОГО ВИХРЕВОГО РАСХОДОМЕРА

Л.А. Витвицкая, З.Я. Витвицкий, К.З. Лаврук

Предложена конструкция устройства для измерения низких расходов жидкости при числах Рейнольдса, близких к 1000. Проведен метрологический анализ устройства, рассчитана суммарная неопределенность измерения.

**Ключевые слова:** суммарная и стандартная неопределенность измерения, вихревой расходомер, число Рейнольдса, контактно-кондуктометрический преобразователь.

### THE METROLOGICAL ANALYSIS OF LOW FLOW VORTEX FLOWMETERS

L.A. Vytvytska, Z.Y. Vytvytskiy, K.Z. Lavruk

The design of a device for measuring low flow fluid at Reynolds numbers close to 1,000. Spend analiz metrological device calculated the total measurement uncertainty.

**Keywords:** total and standard measurement uncertainty, vortex flowmeter, the Reynolds number, a contact-conductometric transducer.

### Висновки

Отримане значення сумарної невизначеності свідчить про доцільність розроблення даного засобу за критерієм точності вимірювання. Використання витратоміра такої конструкції розширить сферу його застосування, оскільки збільшиться діапазон вимірювання витрати для менших чисел Рейнольдса та малих значень швидкостей потоку.

### Список літератури

1. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количеств: Справочник: Кн.2 / П.П. Кремлевский/ – СПб.: Политехника, 2004. – 412 с.
2. Киясбейли А.Ш. Вихревые измерительные приборы / А.Ш. Киясбейли, М.Е. Перельштейн. – М.: Машиностроение, 1978. – 152 с.
3. Ротинян А.Л. Теоретическая электрохимия / А.Л. Ротинян, К.И. Тихонов, И.А. Шошина. – Л.: Химия, 1981.

Надійшла до редколегії 1.04.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. І.С. Кісіль, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ.