

УДК 621.317

Й. Й. Білинський, д. т. н., проф.; М. О. Стасюк; М. В. Гладішевський

## АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ВИТРАТ РІДКИХ І ГАЗОПОДІБНИХ СЕРЕДОВИЩ ТА ЇХНЯ КЛАСИФІКАЦІЯ

*У статті проаналізовано основні методи та засоби контролю витрат рідких і газоподібних середовищ, розроблено їхню класифікацію. Це дозволяє виконати вибір витратоміра, який відповідав би індивідуальним вимогам.*

**Ключові слова:** витратомір, контроль витрат, класифікація, динамічний діапазон, надійність, точність вимірювання, рухомі частини.

### Вступ

Через щоденне зростання цін на різні види енергії важливим завданням сьогодення є максимально точний контроль витрат рідких і газоподібних середовищ.

Газ в Україні та інших країнах СНГ – основний енергоносіє, який є джерелом інших видів енергії – електричної та теплової. Крім того, газ – це товар і предмет комерційних угод між компанією, яка добуває, газотранспортними компаніями і кінцевими споживачами.

Основною проблемою комерційних відносин при поставках плинних і газоподібних середовищ є дисбаланс, що виникає під час фізичного обліку від постачальника до споживача. Загальними чинниками, що визначають виникнення цього дисбалансу, є похибки у вимірюванні об'єму речовини, відсутність достовірного обліку через невисоку точність і обмежений діапазон лічильників, несправності вузлів обліку [1]. Для уникнення такого дисбалансу необхідно вибрати витратомір, який має всі необхідні характеристики для забезпечення точного вимірювання витрат.

Контроль витрат рідких і газоподібних середовищ є важливим для металургії, харчової промисловості, будівництва, біохімії, виробництва збагачення руди та інших галузей промисловості.

**Метою** роботи є аналіз методів і засобів контролю витрат рідких і газоподібних середовищ та розробка класифікації на їхній основі.

### Основна частина

На сьогодні існує величезна кількість витратомірів, які використовують для комерційного і технологічного контролю потоків рідин, газу та пари. На основі проведеного аналізу методів контролю витрати речовини [2 – 34] та вже наявної класифікації [35] запропоновано нову, удосконалену класифікацію (рис. 1), в основу якої покладено чотири основні класифікаційні ознаки, а саме: за вимірюваною величиною витрат, за фізичним явищем, за принципом роботи, за ефектами, що лежать в основі роботи та особливістю конструкції.

Витрата речовини – це кількість речовини (рідини або газу), яка протікає через поперечний переріз трубопроводу за одиницю часу. Розрізняють об'ємну витрату  $Q_V$ , яку вимірюють в одиницях об'єму за одиницю часу, і масову витрату  $Q_M$ , відповідно:

$$Q_V = V / t; \quad (1)$$

$$Q_M = M / t, \quad (2)$$

де  $V$  – об'єм рідини або газу, які пройшли через січення труби за час  $t$ ;  $M$  – маса рідини або газу, які пройшли через поперечний переріз труби за час  $t$  [2].



Отже, за вимірюваною величиною розрізняють об'ємні та масові витратоміри.

За фізичними явищами, що покладені в роботу, витратоміри об'єму поділяють на механічні, механіки рідин і газів, електродинамічні, хвильові, а масові лічильники – на теплові і механічні.

Згідно з принципом роботи до об'ємних механічних витратомірів належать тахометричні і осцилювальні витратоміри, а до масових механічних – інерційні.

За ефектами, що використовують, у тахометричних витратомірах можна виділити основні три групи: камерні (інші назви: діафрагмові або мембранні), турбінні і шарові [3]. Найчастіше використовують перші два види.

Камерні витратоміри призначені для вимірювання витрат прозорих рідин у замкнених трубопроводах [4]. Принцип роботи таких лічильників ґрунтується на різниці тисків, що є наслідком закону збереження енергії, згідно з яким звуження каналу проходження потоку речовини спричиняє збільшення швидкості потоку, а отже, і збільшення кінетичної енергії. Це зумовлює падіння тиску речовини в найвужчій частині такого каналу, оскільки кінетична енергія збільшується за рахунок енергії тиску. При цьому відбувається переміщення рухомих перегородок вимірювальних камер під тиском досліджуваного газу. Залежність між падінням тиску і витратою описують:

$$Q = K\sqrt{\Delta P}, \quad (3)$$

де  $Q$  – витрата речовини;  $K$  – константа для цього приладу;  $\Delta P$  – різниця тисків на кінцях звуження (це значення залежить від діаметру каналу звуження) [5].

Камерні витратоміри характеризують такі переваги:

- 1) можливість використання на (в) трубах із великим діаметром;
- 2) не потребують значних затрат під час монтажу;
- 3) перевірені часом, забезпечують надійну роботу протягом багатьох років;
- 4) економічний вид обліку за невеликих коливань витрат;
- 5) відсутність рухомих компонентів;
- 6) місце установки, монтажне положення і напрямок потоку не впливають на їх роботу [6].

До недоліків вищеописаних витратомірів належать:

- 1) динамічний діапазон, обмежений значенням 4:1 або 5:1;
- 2) можливе блокування системи через вигинання діафрагми від гідравлічного удару;
- 3) установочна довжина вимірювальної системи може мати велике значення;
- 4) через ерозію може змінюватися геометрія кромки отвору, що знижує точність всієї системи [7].

Виробниками камерних витратомірів є відомі міжнародні компанії: ООО «АППЭЖ» (компактний витратомір OriMaster, Росія), Meccon (витратомір FON4, Німеччина), Siemens (Німеччина), PietroFiorentini (Італія).

Турбінні витратоміри працюють за принципом лічильників із крильчаткою Вольдмана, тобто реєструють об'єм, що проходить через поперечний переріз, використовуючи при цьому середню швидкість потоку [8].

Такі витратоміри переважно застосовують на підприємствах з дуже високим споживанням природного газу, а також на магістралях із відносно високим тиском. Сучасний лічильний механізм турбінного витратоміра – це своєрідна комп'ютерна міні-система. Вона не лише підраховує імпульси й переводить їх у цифровий еквівалент, а й слідкує за правильністю роботи лічильника, сигналізує про несанкціоноване втручання в його роботу. Останнім часом такі механізми оснащують модемами, завдяки яким усі показання напряму передають на сервери служб підтримки [6].

На турбінних лічильниках необхідно періодично контролювати зміну перепаду тиску. Допустиме значення перепаду тиску на лічильнику для конкретних робочих умов розраховують

за формулою:

$$\Delta P = \Delta P_p \left( \frac{\rho_c \cdot P}{\rho_{cp} \cdot P_p} \right) \cdot \left( \frac{Q}{Q_p} \right)^2, \quad (4)$$

де  $\Delta P_p$  – перепад тиску на лічильнику, регламентований у технічній документації, Па;  $P$  – тиск газу (абсолютний) за конкретних робочих умов, МПа;  $P_p$  – значення тиску газу за стандартних умов, для яких регламентовані втрати тиску;  $\rho_c$  – значення густини газу за стандартних умов;  $\rho_{cp}$  – значення густини газу за стандартних умов, для яких регламентовані втрати тиску;  $Q$  – витрата газу за конкретних робочих умов, м<sup>3</sup>/год;  $Q_p$  – витрата газу, для якої регламентовані втрати тиску, м<sup>3</sup>/год [9].

Оскільки турбінний витратомір складається із декількох рухомих деталей, необхідно враховувати такі чинники:

- 1) змащувальні властивості середовища;
- 2) зміну стану й розмірів лопатей;
- 3) знос підшипників і тертя;
- 4) температуру, тиск і в'язкість вимірюваного середовища;
- 5) падіння тиску на витратомірі;
- 6) профіль швидкості на вході й ефекти завихрень.

Саме через ці чинники необхідно виконувати калібрування й перевірку турбінних лічильників у робочих умовах.

До основних переваг цих витратомірів належать:

- 1) відмінна точність ( $\pm 0,5\%$  від фактичного значення);
- 2) максимальний динамічний діапазон до 10:1;
- 3) витратоміри із байпасними каналами відносно дешеві [7];
- 4) енергонезалежність;
- 5) низький рівень шуму [10].

Турбінні лічильники чутливі до спотворень потоку на вході і на виході витратоміра, хоча сучасні вимоги до довжин прямих ділянок до і після пристрою є мінімальними і складають, відповідно, 2 і 1 діаметри умовного проходу витратоміра. Також до недоліків належить підвищена похибка під час вимірювання потоків газу, що пульсують.

Рекомендують обирати витратоміри тих типів, у яких лічильник температури й отвір для відбору тисків розміщені в корпусі. Не бажано встановлювати лічильники на ділянках, де можливе накопичення конденсату [11].

Серед виробників турбінних витратомірів відомі компанії «Elster Instromet», «КОНВЕЛС Автоматизация» (Росія), «Advantek Engineering» (США), «Cameron» (США), «Actaris» (Росія).

Осцилювальні витратоміри поділяють на вихрові лічильники і лічильники, що використовують ефект Коанда. Найпоширенішими витратомірами цього класу є вихрові, які застосовують на масштабних підприємствах, де відбувається споживання значної кількості природного газу. Як і на турбінних витратомірах, лічильний механізм вихрового витратоміра являє собою комп'ютерну міні-систему. Важливою перевагою цієї системи є нечутливість до пневмоударів і можливість роботи на забруднених газах [6].

У задній частині тіла особливої форми, яке обтікає потік середовища, утворюються завихрення. Ці завихрення утворюють так звану доріжку Кармана. Зрив завихрень з тіла, яке обтікає, можна виявити й розрахувати. У деякому діапазоні їхня кількість пропорційна витраті, що дозволяє виміряти швидкість руху середовища [12].

Частота утворення вихрів і швидкість середовища мають майже лінійну залежність, яку визначають:

$$f = S_t \cdot (v/d), \quad (5)$$

де  $f$  – частота виникнення вихрів;  $S_t$  – число Струхалія, яке визначають експериментально;  $v$  – швидкість потоку середовища;  $d$  – ширина тіла обтікання [12].

Частота утворення завихрень не змінюється під час зміни густини середовища [13].

До переваг вихрових витратомірів належать:

- 1) досить великий динамічний діапазон;
- 2) малий опір потоку;
- 3) відсутність рухливих деталей;
- 4) лінійний вихідний сигнал;
- 5) невелика втрата тиску;
- 6) простота й надійність в експлуатації, оскільки п'єзодатчики не контактують із середовищем [12].

Недоліками вихрових лічильників є:

- 1) можливий вплив вібрації на точність вимірювань;
- 2) значну роль відіграє правильна установка;
- 3) максимальні витрати відповідають швидкості потоку 80 або 100 м/с;
- 4) недостатня стабільність коефіцієнта перетворення в необхідному діапазоні, що практично не дозволяє рекомендувати пристрої цього типу для комерційного обліку газу без попереднього калібрування в умовах експлуатації;
- 5) необхідно передбачити прямі ділянки труби до і після витратоміра без перешкод [14].

Відома фірма-виробник «Endress+Hauser» ProlineProwirl [15]. Іншими виробниками таких витратомірів є ИПФ «Сибнефтеавтоматика» (Росія), «Emerson» (витратоміри Rosemount, США), корпорація «YokogawaElectric Corporation» (витратоміри YEWFL0, Японія).

Об'ємні витратоміри механіки рідин і газів за принципом дії поділяють на лічильники з тілом обтікання та манометричні. До витратомірів з тілом обтікання належать поршневі та ротаційні.

Ротаційний витратомір – це один з перших типів газових лічильників, які почали використовувати для підрахунку витрати газу. Ці витратоміри загалом використовують на підприємствах, де споживання природного газу не перевищує 200 кубометрів за годину [6]. Принцип роботи таких витратомірів ґрунтується на обертанні двох співвісно розташованих роторів під впливом потоку газу. Відліковий пристрій показує кількість газу ( $m^3$ ), яка пройшла через лічильник за робочого тиску  $P$  і температури  $T$ . Перерахунок в об'ємні одиниці,  $V_H$ , до умов за ГОСТ 2939 проводять за формулою:

$$V_H = V_p \frac{P \cdot T_H}{T \cdot K \cdot P_H}, \quad (6)$$

де  $V_p$  – різниця показань лічильника за період вимірювання,  $m^3$ ;  $P$  – абсолютний тиск газу, МПа;  $T$  – абсолютна температура газу, К;  $K$  – коефіцієнт стиснення газу;  $P_H = 0,101325$  МПа і  $T_H = 293,15$  К – відповідно стандартні тиск і температура за ГОСТ 2939 [16].

Такий витратомір є довговічним, має високою пропускну здатністю за відносно невеликих розмірів і маси, витримує перенавантаження, автоматичний перерахунок об'єму газу проводять за допомогою коректорів (обчислювачів) [17].

Незважаючи на вищенаведені переваги, ротаційний витратомір має низку недоліків, до яких відносять висока вартість. Вимірювальна система лічильника потребує ретельної підгонки всіх деталей і не здатна працювати із забрудненим газом [15].

Серед виробників ротаційних витратомірів виділяють бельгійську фірму «Instromet International», НПП «Овен-Урал» і ООО ЭПО «Сигнал» (Росія), підприємство «Actaris» і компанію «Elster Instromet» (Німеччина).

До манометричних витратомірів належать лічильники на основі гідравлічних опорів, звужувальних пристроїв. Також великою групою манометричних витратомірів є струменеві, відцентрові лічильники й осереднена напірна трубка.

Струменеві лічильники знайшли широке застосування в теплоенергетиці, медицині, паливній і хімічній промисловості, їх також використовують для комерційного й технологічного контролю потоків рідин, газу та пари.

Струменеві витратоміри дозволяють вимірювати невелику витрату газу, оскільки мають низький поріг чутливості [17]. Принцип роботи полягає у вимірюванні частоти перемикання струменевого автогенератора (САГ), що пропорційна швидкості витрат газу. Частота коливань потоку пропорційна витраті через сопло САГ:

$$f = Sh \cdot \frac{q}{l \cdot b \cdot h}, \quad (7)$$

де  $Sh$  – число Струхалія;  $l, b, h$  – характерні розміри, відповідно – довжина камери, ширина і глибина сопла струменевого елемента.

Відповідно до формули витрати

$$q = \mu \cdot h \cdot b \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \quad (8)$$

отримуємо, що частота коливань потоку САГ пропорційна перепаду тиску на струменевому елементі (швидкості потоку через нього) і густині середовища [19]:

$$f = Sh \cdot \frac{\mu}{l} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}}. \quad (9)$$

Отже, цей метод подібний до вихрового із тілом обтікання, тому що в обох випадках забезпечується створення аеродинамічного генератора коливань.

Залежно від форми струменя, а отже, і принципу функціонування, ці витратоміри у свою чергу поділяють ще на три групи:

1. Витратоміри з осцилювальним струменем (різновид вихрових витратомірів). Як і у вихровому методі, тут використовують принцип створення аеродинамічного генератора коливань із частотою, пропорційною витраті газу [17, 19]. Витратоміри цієї групи, окрім спільних недоліків із вихровими лічильниками, мають також надзвичайно великі розміри струменевого елемента щодо величини вимірюваної витрати й нестабільним коефіцієнтом перетворення.
2. Ударно-струменеві витратоміри. Ці витратоміри вимірюють залежний від витрати перепад тиску, що виникає під час удару струменя рідини або газу. Такі лічильники використовують лише для вимірювання малих витрат.
3. Витратоміри із відхиленням струменя, який витікає. Принцип дії полягає в залежності перепаду тиску від вимірюваної швидкості газу, що виникає за відхилення струменя допоміжного газу або рідини [19].

Виробниками струйних витратомірів є російські компанії «Газовик», ООО «Глобус», ГК «Промприбор», «ТБН енергосервис».

До стандартних звужувальних пристроїв належать діафрагми, сопла й труби Вентурі. Перевагами такого методу є: можливість реалізації методу без використання складних мікропроцесорних пристроїв, вимірювання витрати за малих швидкостей протікання рідини або газів (0,1...0,5 м/с) і висока стійкість до забрудненого вимірюваного середовища.

Недоліками таких пристроїв є:

- 1) висока трудомісткість монтажу;
- 2) невисока точність за невеликого діапазону вимірювання витрати (1:3);

3) значна втрата тиску на звужувальних пристроях, що у свою чергу призводить до додаткових затрат на роботу насосів [20].

Саме тому було доцільним введення нового методу «площа-швидкість» із використанням осередненої напірної трубки.

Цей прилад створює перепад тисків пропорційно квадрату швидкості потоку згідно з теоремою Бернуллі: сума енергій у будь-якій точці труби є сумою статичної (тиск, що створює речовина у всіх напрямках); кінетичної (швидкість речовини) і потенційної енергії (гравітаційний складник). У такому випадку теорему Бернуллі записують:

$$\frac{v_1}{2g} + \frac{p_1}{\rho} = \frac{v_2}{2g} + \frac{p_2}{\rho}, \quad (10)$$

де  $v$  – швидкість потоку;  $g$  – гравітаційна стала;  $p$  – тиск;  $\rho$  – густина речовини [21].

Осереднену напірну трубку використовують більш, ніж у мільйоні витратомірних вузлів і в трубах з великим діаметром. Це зумовлено стабільною і точною роботою з гарною повторюваністю результату. Також прилад має суттєві переваги над традиційними звужувальними діафрагмами завдяки простоті установки й низьким втратам тиску.

Недоліками витратомірів змінного перепаду тиску є низька точність їхнього застосування під час вимірювання малих витрат у трубах невеликого діаметра (менше 50 мм) і пульсувальних потоків [21].

Промисловий випуск осереднених напірних трубок налагоджений деякими зарубіжними фірмами. Наприклад, фірму США Hanejwell (австрійська філія) випускає витратоміри з напірними трубками типу Annubar.

Об'ємні електродинамічні витратоміри поділяють на іонізаційні, магнітні та електромагнітні витратоміри.

Принцип дії іонізаційних витратомірів полягає у вимірюванні інтенсивності випромінювання, направлено поперек потоку. Для зменшення похибки від мінливості джерела випромінювання переважно використовують диференційні перетворювачі з двома приймачами іонізаційного потоку (або ультразвукового випромінювання) [22].

До недоліків таких витратомірів належать: вплив параметрів газу, температури і тиску на величину іонізації. Усунення цих чинників значно ускладнює конструкцію імпульсних і чутливих елементів. Крім того, іонізаційні лічильники не можуть застосовувати для вимірювання витрати сильно іонізованих і розпечених газів [23].

Розробником іонізаційних витратомірів є ООО «Прамень».

Принцип дії магнітно-індуктивних витратомірів ґрунтується на вимірюванні пропорційній витраті електрорушійної сили, що індукована в потоці електропровідної речовини під дією зовнішнього магнітного поля (закон Фарадея). Згідно з цим законом для будь-якого замкнутого контуру індукована електрорушійна сила (ЕРС) пропорційна швидкості зміни магнітного потоку що проходить через цей контур.

Головною перевагою таких лічильників є те, що первинні перетворювачі не мають частин, які виступають всередину трубопроводу), а ізоляційні та антикорозійні покриття дозволяють вимірювати витрати агресивних і абразійних середовищ [24].

Недоліком магнітно-індуктивних витратомірів із постійним магнітом є поляризація чутливих елементів, яка призводить до зміни опору перетворювача. Це призводить до появи додаткових похибок. Крім цього, витратоміри чутливі до неоднорідностей потоку, турбулентності й нерівномірності розподілення швидкостей потоку в поперечному перерізі каналу.

Незважаючи на недоліки магнітно-індуктивні витратоміри знайшли широке використання в металургії, харчовій промисловості, у будівництві, біохімії, виробництві збагачення руди, у медицині, оскільки вони мають малу інерційність порівняно із витратомірами інших типів

[25].

Виробниками є: «Krohne», «Siemens», «Honeywell» (США).

Сьогодні набув популярності ще один метод вимірювання витрати – ультразвуковий. Він полягає в залежності часу розповсюдження ультразвукових коливань через потік газу в трубопроводі заданого діаметра [26].

Різниця часу  $\Delta\tau$  прямо пропорційна швидкості потоку  $V$ :

$$\Delta\tau = \frac{2L}{c^2}v, \quad (11)$$

де  $c$  – швидкість звуку в середовищі;  $L$  – відстань проходження ультразвукових коливань [27].

В ультразвуковому лічильнику розташовані пари первинних перетворювачів. Наявність декількох пар дозволяє отримувати більш точні значення витрати. Кожен із датчиків здатен приймати й передавати сигнал. Вимірювання часу проходження сигналу між кожною парою відбувається одночасно. Сигнал генерують п'єзоелектричні кристали, до яких прикладено напругу, і навпаки, коли ультразвукова хвиля вдаряється об кристал, на кристалі виникає напруга. Збільшуючи кількість пар датчиків, можна точно визначити й математично компенсувати спотворення профілю потоку у всьому поперечному перерізі труби. Коли в трубі відсутній рух речовини, час передачі сигналу однаковий за течією і проти течії. Як тільки речовина починає текти по вимірювальній трубці, швидкість звукових сигналів збільшується в тому напрямку, у якому тече рідина, і зменшується в протилежному напрямку [29].

Ультразвукові витратоміри у свою чергу поділяють на:

- 1) частотні витратоміри, у яких вимірюють різницю частот повторення коротких імпульсів чи пакетів ультразвукових коливань;
- 2) фазові витратоміри, у яких вимірюють різницю фазових зсувів ультразвукових коливань;
- 3) часово-імпульсні витратоміри, у яких відбувається безпосереднє вимірювання різниці часу проходження коротких імпульсів [27];
- 4) резонансні витратоміри;
- 5) одноканальні (з двома п'єзоелементами);
- 6) двоканальні (наявні чотири п'єзоелементи);
- 7) багатоканальні [29].

Ультразвукові витратоміри є найперспективнішими для комерційного обліку, оскільки мають низку переваг:

- 1) відсутність рухомих частин і частин, що виступають у потік;
- 2) не створюють додаткових втрат напору;
- 3) упродовж тривалого часу можуть працювати від вбудованого автономного джерела живлення;
- 4) точність може калібруватися до  $<0,1\%$ ;
- 5) вимірювання є відносно точними, навіть коли датчик виходить із ладу [30].

В інших первинних вимірювальних пристроях, таких як турбінні витратоміри, важко зрозуміти: чи дійсно вони все ще точно працюють після деякого періоду експлуатації. Такий чинник як забруднення від масла трубопроводу може вплинути на точність будь-якого датчика. Часто є необхідним візуальний огляд для перевірки належної роботи вимірювального пристрою. Для ультразвукових лічильників пропонують електронну діагностику, яка допомагає перевірити належний робочий стан і тим самим знижує внутрішнє втручання, яке часто потрібне для інших вимірювальних пристроїв. Внутрішню діагностику можна також використовувати для перевірки інших показників вимірювальної



конструкції, таких як: температура і газ [28].

Незважаючи на очевидні переваги ультразвукових лічильників, існують такі недоліки методу:

- 1) обмеження за мінімальною швидкістю потоку;
- 2) складність і висока вартість пристроїв, яка за інших рівних умов у 3 – 4 рази перевищує вартість тахометричних і електромагнітних витратомірів;
- 3) вплив на покази бульбашок повітря в потоці;
- 4) необхідність значних довжин лінійних ділянок до і після перетворювача [31].

На сьогодні існує величезна кількість компаній, які займаються розробкою ультразвукових витратомірів: «Krohne» (серія UFM, GFM, Altosonic), «Emerson» (Senior Sonic, Junior Sonic), «Sick Mahack» (США).

Ще одним класом вимірювання витрати газу є масові витратоміри, серед яких теплові і механічні витратоміри. До теплових належать калориметричні і термоанемометричні витратоміри, а до механічних – інерційні лічильники.

Каріолісові витратоміри разом із турбосиловими і гігроскопічними належать до інерційних лічильників. У середині кожного каріолісового витратоміра розташована трубка (наприклад, фірма Yokogawa пропонує розв'язок із двома трубками) [32]. Так званий збудник змушує трубку коливатися з певною тактовою частотою. Якщо в трубі відсутній рух вимірюваного середовища – вона коливається рівномірно.

Датчики, розташовані на вході і на виході з трубки реєструють ці рівномірні коливання. Як тільки вимірюване середовище починає переміщатися в трубі, з'являються додаткові подовжні коливання. Під дією сили Каріоліса вхідна і вихідна частини труби відхиляються в різні боки, тобто присутнє зміщення по фазі [33]. Високочутливі датчики сприймають ці коливання. Як результат, зміщення по фазі і є мірою витрати речовини. Чим вища швидкість потоку, тим більше періодів коливань укладається на вимірювальну ділянку [34].

Ця група витратомірів має високу точність і надійність, напрям руху потоку не впливає на роботу приладу, а за правильного встановлення каріолісові витратоміри не чутливі до вібрацій і перепадів температури.

Такі витратоміри придатні лише для трубопроводів з невеликим діаметром, а їхні показання залежать від відкладень шлаків у трубах.

Серед виробників каріолісових витратомірів компанія «Emerson» і ГК «Endress+Hauser» (Швейцарія).

### Висновки

Одним із найважливіших завдань сучасної енергетики є забезпечення максимально точного контролю витрати рідких і газоподібних середовищ. На сьогодні існує безліч методів вимірювання витрати. Кожен із лічильників має свої переваги та недоліки, згідно з якими знаходить своє застосування в промисловості. Зважаючи на вищезазначене, у роботі проаналізовано сучасні методи вимірювання витрати й запропоновано їхню класифікацію. Встановлено, що завдяки своєму широкому динамічному діапазону, надійній роботі, високій точності і зручній діагностиці найперспективнішим методом є ультразвуковий. Незважаючи на свої очевидні переваги, ультразвукові витратоміри є досить вартісними, а підвищення кількості каналів значно ускладнює програмну реалізацію обробки інформації.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ряховский С. В. Основные принципы создания единой системы учета газа в региональной компании поставщика газа / С. В. Ряховский, Л. Г. Паскаль // Энергосбережение. – 2005. – № 10. – С. 54 – 58.
2. Тюленев Л. Н. Методы и средства измерений, испытаний и контроля / Л. Н. Тюленев, В. В. Шушерин, А. Ю. Кузнецов; под ред. С. В. Кортов. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ УПИ, 2005. – 76 с.
3. ЭлектроТехИнфо: информационная торговая система [Электронный ресурс]: Тахометрические счетчики и

расходомеры. Устройство, принцип действия, типы и виды тахометрических счетчиков и расходомеров. – Режим доступа: [http://www.eti.su/articles/izmeritelnaya-tehnika/izmeritelnaya-tehnika\\_527.html](http://www.eti.su/articles/izmeritelnaya-tehnika/izmeritelnaya-tehnika_527.html). – Назва з екрану.

4. MESKOTEX MESS- UND KONTROLLTECHNIK [Електронний ресурс]: Диафрагменные расходомеры. – Режим доступа: <http://www.meskotex.com/diaphragm.htm>. – Назва з екрану.

5. DS/OM–RU Редакция 2 [Електронний ресурс]: Компактный диафрагменный расходомер OriMaster. Техническое описание. – Режим доступа: [http://www05.abb.com/global/scot/scot203.nsf/veritydisplay/0b3b45a281a88c9bc12575a80037b487/\\$file/ds\\_om-ru\\_2.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot203.nsf/veritydisplay/0b3b45a281a88c9bc12575a80037b487/$file/ds_om-ru_2.pdf). – Назва з екрану.

6. To build [Електронний ресурс]: Виды газовых счётчиков: мембранные, ротационные, турбинные счётчики. Вихревой расходомер. – Режим доступа: <http://gas.to-build.ru/content/view/56/44/>. – Назва з екрану.

7. LICON [Електронний ресурс]: Типы расходомеров. – Режим доступа: [http://eclicon.ru/?page\\_id=1450](http://eclicon.ru/?page_id=1450). – Назва з екрану.

8. MESKOTEX MESS- UND KONTROLLTECHNIK [Електронний ресурс]: Турбинные расходомеры. – Режим доступа: <http://www.meskotex.com/hm.htm>. – Назва з екрану.

9. Правила метрологии ПР 50.2.019-2006 «Методика выполнения измерений при помощи турбинных, ротационных и вихревых счетчиков» / ред. В. Н. Копысов. – М. : ФГУП «Стандартинформ», 2007. – 33 с.

10. Журнал «Энергетика и ТЭК» [Електронний ресурс]: Расходомеры: принципы работы и опыт эксплуатации. – Режим доступа: [http://www.energetika.by/arch/~page\\_\\_m21=6~news\\_\\_m21=140](http://www.energetika.by/arch/~page__m21=6~news__m21=140). – Назва з екрану

11. Газовик [Електронний ресурс]: Турбинные счетчики газа. – Режим доступа: <http://gazovik-gaz.ru/spravochnik/consum/turbinnyie-schetchiki-gaza.html>. – Назва з екрану.

12. YOKOGAWA [Електронний ресурс]: Вихревой расходомер, вихревой расходомер – принцип действия. – Режим доступа: <http://www.yokogawa.ru/measurementcharge?prod=443>. – Назва з екрану.

13. Технический паспорт D184S035U03 Rev. 12 [Електронний ресурс]: 2-проводное компактное устройство. Измерительный преобразователь на базе цифрового сигнального процессора. – Режим доступа: [http://www05.abb.com/global/scot/scot211.nsf/veritydisplay/53187d45f8a21695c1257950003daaec/\\$file/D184S035U03-RU-12-11\\_2011.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot211.nsf/veritydisplay/53187d45f8a21695c1257950003daaec/$file/D184S035U03-RU-12-11_2011.pdf). – Назва з екрану.

14. Руководство по эксплуатации 00809-0107-4860 [Електронний ресурс]: Расходомеры вихревые Rosemount 8600D. – Режим доступа: <http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Rosemount%20Documents/00809-0107-4860.pdf>. – Назва з екрану.

15. Научно-производственная фирма "Раско" [Електронний ресурс]: О применимости различных методов измерения расхода для коммерческого учета газа. – Режим доступа: <http://www.packo.ru/node/1763>. – Назва з екрану.

16. Руководство по эксплуатации 2.784.000 РЭ [Електронний ресурс]: СЧЁТЧИК ГАЗА РОТАЦИОННЫЙ РГ-К-Ех. – Режим доступа: [http://www.ppx.ru/product/re\\_rgk.pdf](http://www.ppx.ru/product/re_rgk.pdf). – Назва з екрану.

17. ПРАМЕНЬ [Електронний ресурс]: Струйные расходомеры. – Режим доступа: <http://npropramen.ru/information/other-flowmeters/specific-methods/3-jet-flowmeters>. – Назва з екрану.

18. Научно-производственная фирма "Раско" [Електронний ресурс]: О применении струйного автогенераторного метода измерения в бытовых счетчиках газа и поверочных установках. – Режим доступа: <http://www.packo.ru/node/2151>. – Назва з екрану.

19. Чаплыгин Э. И. Математическая модель струйного расходомера. / Э. И. Чаплыгин, Ю. В. Земсков, В. В. Корзин // Журнал технической физики. – 2004. – т. 74. – № 4. – С. 16 – 19.

20. Измерение расхода с использованием осредняющих напорных трубок [Електронний ресурс] / В. Н. Жук // Энергетика и ТЭК. – 2010. – № 2. [http://www.energetika.by/arch/~year\\_\\_m21=2010~month\\_\\_m21=2~page\\_\\_m21=1~news\\_\\_m21=568](http://www.energetika.by/arch/~year__m21=2010~month__m21=2~page__m21=1~news__m21=568).

21. ETS [Електронний ресурс]: Основные принципы измерения расхода газа с помощью осредняющей напорной трубки. – Режим доступа: <http://www.ets.inf.ua/PDF/Intra/%D0%9E%D1%81%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%BD%D1%8B%D0%B5%20%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%BD%D1%86%D0%B8%D0%BF%D1%8B%20%D0%B8%D0%B7%D0%BC%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F%20%D1%80%D0%B0%D1%81%D1%85%D0%BE%D0%B4%D0%B0%20ITAVAR-%D0%B7%D0%BE%D0%BD%D0%B4.pdf>. – Назва з екрану.

22. Автоматизация производственных процессов [Електронний ресурс]: Ионизационные расходомеры. – Режим доступа: <http://ru-auto.info/post/101488904990008/>. – Назва з екрану.

23. Мегапаскаль – инфопортал [Електронний ресурс]: Ионизационные расходомеры. – Режим доступа: <http://megapaskal.ru/pribory/rashod-pribor/228-i-snova-rashodomery-rashodomery-ionizacionnye.html>. – Назва з екрану.

24. Прамень [Електронний ресурс]: Электромагнитные расходомеры. – Режим доступа:

<http://npropramen.ru/information/other-flowmeters/physycal-phenomena/12-electromagnetic-flowmeters>. – Назва з екрану.

25. Расходомер.ру. [Електронний ресурс]: Что такое электромагнитный расходомер?!. – Режим доступу: [http://www.td-rashodomer.ru/info/articles/elektromagnitnii\\_rashodomer.htm](http://www.td-rashodomer.ru/info/articles/elektromagnitnii_rashodomer.htm). – Назва з екрану.

26. Новый способ измерения расхода природного газа ультразвуковым методом [Електронний ресурс] / А. М. Деревягин, А. С. Фомин, В. В. Козлов // Газпром Россия. – 2008. – Режим доступу: <http://nprovumpel.ru/files/pdf/hyperflow-us.pdf>.

27. Андрішшин М. П. Вимірювання витрати та кількості газу: Довідник / М. П. Андрішшин. – Івано-Франківськ: ПП “Сімик”, 2004. – 160 с.

28. American school of gas measurment technology [Електронний ресурс]: Fundamentals of multipath ultrasonic flow meters for gas measurement. – Режим доступу: <http://asgmt.com/wp-content/uploads/pdf-docs/2011/1/F05.pdf>. – Назва з екрану.

29. Взлет.ру. [Електронний ресурс]: От однолучевых ультразвуковых расходомеров к многолучевым: критерий выбора. – Режим доступу: <http://www.vzljet.ru/files/publications/odnoluch-ultrasonic.pdf>. – Назва з екрану.

30. Chattopadhyay P. Flowmeters & Flow Measurement Ч. 2. / P. Chattopadhyay. – New Delhi, 2006. – 76 с.

31. Электротехинфо. [Електронний ресурс]: Ультразвуковые расходомеры. Устройство, принцип действия, типы и виды ультразвуковых расходомеров. – Режим доступу: [http://www.eti.su/articles/izmeritelnaya-tehnika/izmeritelnaya-tehnika\\_529.html](http://www.eti.su/articles/izmeritelnaya-tehnika/izmeritelnaya-tehnika_529.html). – Назва з екрану.

32. YOKOGAWA. [Електронний ресурс]: Измерения расхода с помощью кориолисовых расходомеров в случае двухфазного потока. – Режим доступу: <http://www.yokogawa.ru/default.aspx?mode=binary&id=502>. – Назва з екрану.

33. Естествознание и математика. [Електронний ресурс]: Сила кориолиса в общем курсе физики. – Режим доступу: [http://www.pskgu.ru/projects/pgu/storage/wt/wt141/wt141\\_02.pdf](http://www.pskgu.ru/projects/pgu/storage/wt/wt141/wt141_02.pdf). – Назва з екрану.

34. Autoworks. [Електронний ресурс]: Измерение массового расхода. Кориолисовый расходомер. – Режим доступу: <http://autoworks.com.ua/teoreticheskie-svedeniya/izmerenie-massovogo-rasxoda-koriolisovuj-rashodomer/>. – Назва з екрану.

35. Организация учета природного газа. Основные принципы, методы и средства обеспечения метрологической надежности узлов коммерческого учета газа [Електронний ресурс] / С. А. Золотаревский, О. Г. Гущин // Ежегодный сборник научно-технических статей, выпускаемый ООО “ЭЛЬСТЕР Газэлектроника”. – 2012. – Режим доступу: <http://www.packo.ru/node/2150>.

**Білінський Йосип Йосипович** – д. т. н., професор, завідувач кафедри електроніки.

**Стасюк Марина Олексіївна** – магістрант кафедри електроніки.

Вінницький національний технічний університет.

**Гладишевський Микола Володимирович** – провідний фахівець метрологічного центру.

НАК “Нафтогаз України”.

Y. Y. BILYNSKIY, DC. SC. (ENG.), PROF.; M. A. STASIUK; M. V. GLADYSHEVSKIY

## ANALYSIS OF THE METHODS AND MEANS FOR CONTROLLING LIQUID AND GASEOUS MEDIUMS CONSUMPTION AND THEIR CLASSIFICATION

*The paper analyzes main methods and means for controlling consumption of liquid and gaseous mediums and elaborates their classification. This makes it possible to choose a flowmeter, which would correspond to specific requirements.*

**Keywords:** *flowmeter, consumption control, classification, dynamic range, reliability, measurement accuracy, movable parts.*

### Introduction

Due to the constant growth of prices for various types of energy, it is an important current task to provide a maximally accurate control of liquid and gaseous mediums consumption.

In Ukraine and other CIS countries gas is a basic energy carrier and a source of other energy types – electric and heat energy. Besides, gas is a commercial product and, therefore, the object of commercial agreements between an extractive company, gas transportation companies and end users. In the delivery of gaseous and liquid mediums the main problem of commercial relations is imbalance that arises during physical registration performed on the way from a supplier to end users. General factors, which determine this imbalance, are errors in measuring the substance volume, absence of reliable registration due to insufficient accuracy and limited range of a meter as well as failures of metering units [1]. To prevent such imbalance, it is necessary to select a flowmeter having all characteristics required for ensuring precise flow rate measurements.

Control of liquid and gaseous mediums consumption is important for metallurgy, food industry, construction engineering, biochemistry, ore dressing and other industries.

The aim of the work is analysis of the methods and means for controlling liquid and gaseous mediums consumption and elaboration of their classification.

### Main part

At present, there is a huge number of flowmeters used for commercial and technological control over liquid, gas and vapor flows. Proceeding from the conducted analysis of the methods for substance flow rate control [2–34] and already existing classifications [35], a new improved classification, based on the four main classification criteria, is proposed (Fig. 1): according to the measured flow rate values, by physical phenomena, operating principles, according to the effects, which form the basis of their operation, and design features.

Substance flow rate is the amount of substance (liquid or gas) that flows through the section of pipe line within a time unit. Volumetric flow rate  $Q_V$ , that is measured in the units of volume per time unit, and mass flow rate  $Q_M$  are distinguished:

$$Q_V = V / t; \quad (1)$$

$$Q_M = M / t, \quad (2)$$

where  $V$  is the volume of liquid or gas that passed through the section of pipe within time  $t$ ;  $M$  – mass of the liquid or gas that passed through the pipe section within time  $t$  [2].

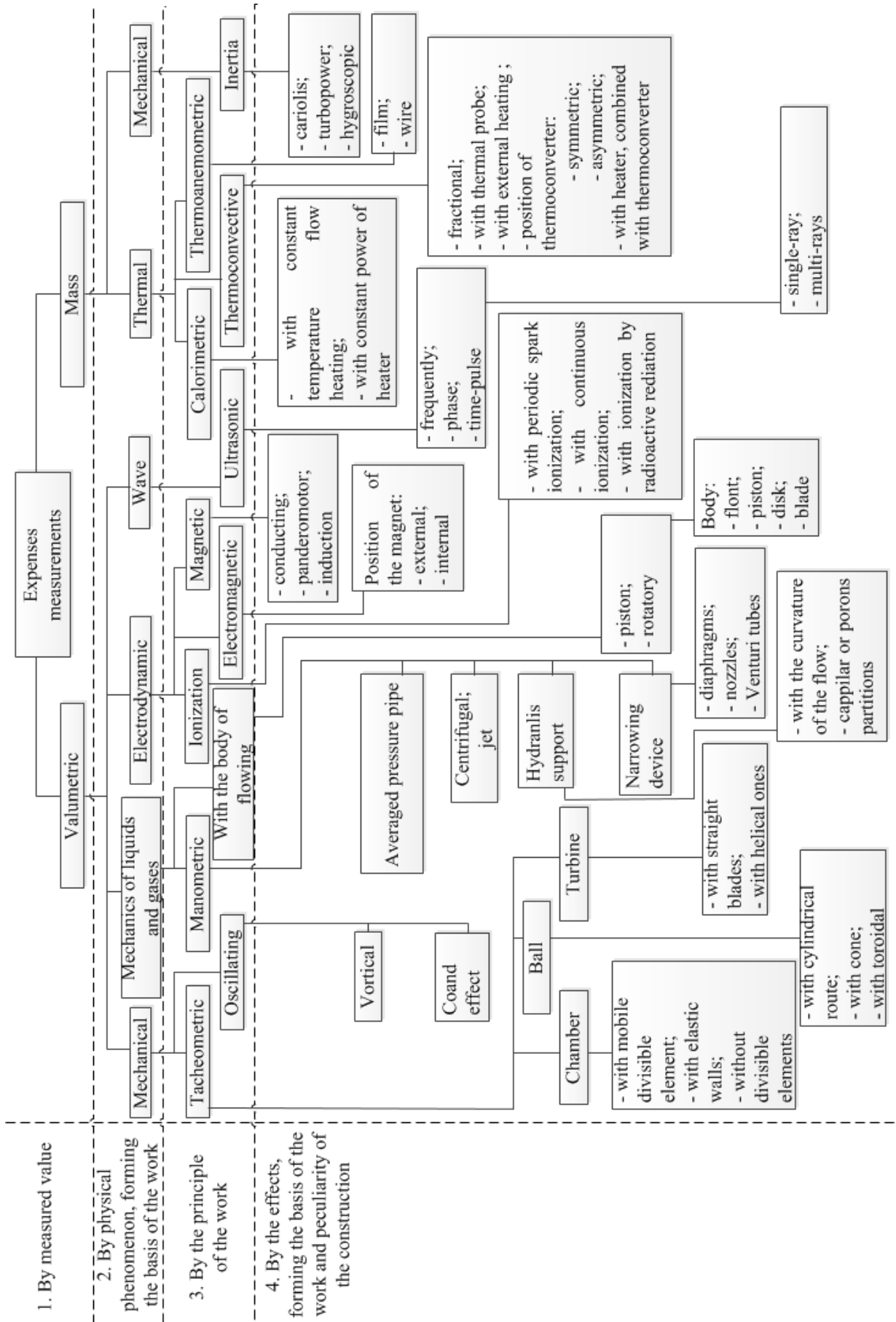


Fig. 1. Classification of methods and means for flow rate measurements

Thus, according to the quantity to be measured, volumetric and mass flowmeters are distinguished.

According to physical phenomena, which form the basis of their operation, volumetric flowmeters are divided into mechanical, fluid mechanics, electrodynamic and wave flowmeters; mass flowmeters are divided into thermal and mechanical metering devices.

According to the operating principle, tachometric and oscillating flowmeters belong to mechanical volumetric flowmeters and inertia flowmeters – to mass flowmeters.

According to the effects, used in tachometric flowmeters, three main groups can be distinguished: positive-displacement (they are also referred to as orifice or membrane flowmeters), turbine and ball-type flowmeters [3]. The first two types are the most common ones.

Positive-displacement flowmeters are intended for measuring flow rate of transparent liquids in closed pipelines [4]. Operating principle of such meters is based on pressure differential, which is the consequence of energy preservation law, in accordance with which restriction of the substance flow channel causes increase of the flow rate and, therefore, the increase of kinetic energy. This leads to the substance pressure drop in the narrow part of such channel since kinetic energy increases at the expense of pressure energy. In this case displacement of the movable partitions of measuring chambers under gas pressure occurs. Relationship between pressure drop and flow rate is given by

$$Q = K\sqrt{\Delta P}, \quad (3)$$

where  $Q$  – substance flow rate;  $K$  – constant for a given device;  $\Delta P$  – pressure differential at the ends of the narrow part (this value depends on the diameter of the narrow channel) [5].

Positive-displacement flowmeters are characterized by the following advantages:

1. The possibility to be used at (in) large-diameter pipelines;
2. They do not require considerable expenses for installation;
3. They are time-proven, provide reliable operation for many years;
4. Economical type of registration for small flow rate variations;
5. Absence of movable parts;
6. Installation place, position and flow direction do not influence its operation [6].

Disadvantages of the above-described flowmeters include the following:

1. Dynamic range is limited by the value 4 : 1 or 5 : 1;
2. Possible blocking of the system due to the diaphragm bending caused by hydraulic shock;
3. Fitting length of the measuring system could have large value;
4. Geometry of the opening edges may change due to erosion, which reduces accuracy of the entire system [7].

Well-known international companies such as LLC «АППИЭК» (compact flowmeter OriMaster, Russia), Mecon (flowmeter FON4, Germany), Siemens (Germany), PietroFiorentini (Italy) are producers of positive-displacement flowmeters.

Turbine flowmeters operate according to the principle of meters with Voldman's impeller, i.e. they register the volume, passing through the section, using average flow rate [8].

Such flowmeters are used mainly at the enterprises with very high natural gas consumption as well as at the lines with relatively high pressure. Modern counting mechanism of the turbine flowmeter is a kind of a computer mini-system. It does not only count pulses, converting them into digital equivalent, but also controls proper operation of the meter, signals about a non-sanctioned interference into its operation. Lately, such mechanisms have been equipped with modems and due to them all data of the given direction are transmitted to the servers of support services [6].

At the turbine meters pressure differential variations should be periodically controlled. Permissible pressure differential value at the meter for specific operating conditions is calculated by the formula:

$$\Delta P = \Delta P_r \left( \frac{\rho_s \cdot P}{\rho_{av} \cdot P_r} \right) \cdot \left( \frac{Q}{Q_r} \right)^2, \quad (4)$$

where  $\Delta P_r$  – pressure differential at the meter, which is regulated by technical documentation, Pa;  $P$  – gas pressure (absolute) under specific operating conditions, MPa;  $P_r$  – gas pressure value under standard conditions, for which pressure losses are regulated;  $\rho_s$  – gas density value under standard conditions;  $P_{av}$  – gas density value under standard conditions, for which pressure losses are specified;  $Q$  – gas flow rate under specific operating conditions, m<sup>3</sup>/year;  $Q_r$  – gas flow rate, for which pressure losses are regulated, m<sup>3</sup>/year [9].

As turbine flowmeter comprises several movable parts, the following factors should be taken into account:

1. lubrication properties of the medium;
2. change of the state and size of the vanes;
3. wear of bearings and friction;
4. temperature, pressure and viscosity of the measured medium;
5. pressure drops at the flow meter;
6. input rate profile and turbulence effects.

Due to these factors, calibration should be performed and turbine meters should be checked under operating conditions.

Main advantages of such flowmeters include:

1. high precision ( $\pm 0,5\%$  of the actual value);
2. maximal dynamic range up to 10 : 1;
3. flowmeters with bypass channels are relatively cheap [7];
4. non-volatility;
5. low noise level [10].

Turbine flowmeters are sensitive to flow distortions at the input and output of the flowmeter, although current requirements to the lengths of straight parts in front of the device and behind it are minimal and amount respectively to 2 and 1 diameter of the flowmeter conditional passage. Another disadvantage is increased error in measuring pulsing gas flows.

It is recommended to choose flowmeters of the types where the temperature meter and pressure take-off opening are located in the body. It is not desirable to install meters in the areas where condensate accumulation is possible [11].

Among the producers of turbine flowmeters there are such well-known companies as «Elster Instromet» (Germany), «КОМВЕЛС Автоматизация» (Russia), «Advantek Engineering» (USA), «Cameron» (USA), «Actaris» (Russia).

Oscillating flowmeters are divided into vortex flowmeters and meters with the application of Coanda effect. The most common flowmeters of this class are vortex flowmeters used at the large-scale enterprises, where huge amounts of natural gas are consumed. Counting mechanism of the vortex flowmeter is a computer mini-system just like in turbine flowmeters. An important advantage of this system is its insensitivity to pneumatic shocks and the possibility of operation with the application of contaminated gases [6].

At the back part of the body of a special shape (a so called bluff body), which is exposed to fluid flow, turbulences are formed. These turbulences form the so called Karman's vortex street. Breakaway of turbulences from the bluff body could be revealed and calculated. In a certain range their quantity is proportional to the flow rate, which makes it possible to measure fluid motion speed. [12].

The frequency of turbulences formation and the fluid speed have almost linear dependence, which is given by:

$$f = S_t \cdot (v/d), \quad (5)$$

где  $f$  – frequency of turbulences formation;  $S_t$  – Strouhal number, which is determined experimentally;  $v$  – fluid flow speed;  $d$  – width of the bluff body [12].

The frequency of turbulences formation is not changed with fluid density changes [13].

Advantages of the vortex flowmeters include:

1. sufficiently wide dynamic range;
2. small flow resistance;
3. absence of movable parts;
4. linear output signal;
5. small pressure loss;
6. simplicity and reliability of maintenance since piezo sensors do not contact with the medium [12].

Vortex meters have the following drawbacks:

1. possible influence of vibration on precision of measurements;
2. significant role of proper installation;
3. maximal flow rates correspond to fluid flow speed of 80 or 100 m / s;
4. insufficient stability of the conversion factor in the required range, which does not allow to recommend devices of this type for commercial gas consumption registering without pre-calibration during operation process;
5. it is necessary to provide straight obstacle-free parts of the pipeline in front and behind the flowmeter [14].

A well-known producer is «Endress + Hauser» ProlineProwirl company [15]. Other producers of such flowmeters are «Сибнефтеавтоматика» engineering company (Russia), «Emerson» (flowmeters Rosemount, USA), Yokogawa Electric Corporation (flowmeters YEWFL0, Japan).

According to their operating principle, volumetric flowmeters, based on fluid mechanics, are divided into those with bluff body and manometers. Flowmeters with bluff body include piston-type and rotary flowmeters.

Rotary flowmeter is one of the first types of gas meters, which started to be used for gas consumption calculations. These flowmeters are mainly used at the enterprises where natural gas consumption does not exceed 200 m<sup>3</sup> / h [6]. Operating principle of such flowmeters is based on the rotation of two coaxially located rotors under the action of gas flow. Read-out device indicates the amount of gas (m<sup>3</sup>), which passed through the meter with working pressure  $P$  and temperature  $T$ . Conversion into volumetric units  $V_H$  for the conditions according to standards of ГОСТ 299 is performed by the formula:

$$V_N = V_d \frac{P \cdot T_N}{T \cdot K \cdot P_N}, \quad (6)$$

where  $V_d$  – difference in the readings of the flowmeter within the measurement period, m<sup>3</sup>;  $P$  – absolute gas pressure, MPa;  $T$  – absolute gas temperature, K;  $K$  – gas compression coefficient;  $P_N = 0,101325$  MPa and  $T_N = 293,15$  K – standard (normative) pressure and temperature respectively according to ГОСТ 2939 [16].

Such flowmeter has long operating life, big rated capacity in spite of small size and mass, it withstands overloading; automatic conversion of gas volume is performed by means of correctors (computing devices) [17].

In spite of the above advantages, a rotary flowmeter has a number of drawbacks, particularly, high cost. Besides, measuring system of the meter requires careful fitting of all parts and is unable to operate with contaminated gas [15].

Among the producers of rotary flowmeters are Belgian company «Instromet International», scientific-production company «Овен-Урал» and LLC «Сигнал» (Russia), enterprise «Actaris» and «Elster Instromet» (Germany).

Meters based on hydraulic resistances – flow restricting devices – belong to manometric flowmeters. Fluidic (jet) flowmeters, centrifugal flowmeters and averaged pressure tube also form a large group of manometric flowmeters.

Fluidic meters are widely used in heat power engineering, medicine, fuel and chemical industries. They are also used for commercial and technological control of liquid, gas and vapor flows.



Fluidic flowmeters make it possible to measure small gas volumes as they have low threshold sensitivity level [17]. Their operating principle is based on measuring switching frequency of a self-exciting oscillator (SEO), which is proportional to the gas consumption flow rate through the nozzle of SEO:

$$f = Sh \cdot \frac{q}{l \cdot b \cdot h}, \quad (7)$$

where  $Sh$  – Strouhal number;  $l, b, h$  – characteristic dimensions: chamber length, width and depth of the jet element nozzle respectively.

In accordance with the flow rate formula

$$q = \mu \cdot h \cdot b \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}}, \quad (8)$$

we can make a conclusion that oscillation frequency of SEO is proportional to pressure drop at the jet element (to the flow rate through it) and to the medium density [19]:

$$f = Sh \cdot \frac{\mu}{l} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}}. \quad (9)$$

So, this method is similar to vortex method with bluff body since in both cases creation of an aerodynamic oscillator is provided.

Depending on the shape of jet and, therefore, on the operating principle, these flowmeters, in their turn, are further divided into three groups:

1. Flowmeters with oscillating jet (a type of vortex flowmeters). Like the vortex method, this method uses the principle of creation of an aerodynamic oscillator with frequency, proportional to gas flow rate [17, 19]. Along with other drawbacks, flowmeters of this group have a jet element of a very large size relative to the measured flow rate value and unstable conversion factor.
2. Jet-impact flow meters, which measure flow rate dependable pressure drop, emerging with the impact of liquid or gas jet. Such meters are used only for measuring small flow rates..
3. Flowmeters with outgoing jet deviation. The operating principle is based on the dependence of pressure drop, which emerges with deviation of the jet of the auxiliary gas or liquid, on the measured gas flow rate [19].

Russian companies «Газовик», LLC «Глобус», «Промприбор», «ТБН Энергосервис» are producers of fluidic flowmeters.

Orifices, nozzles and Venturi tubes are standard restricting devices. This method has the following advantages: the possibility to be used without application of complex microprocessor devices, flow rate measurement at low speeds of liquids and gases (0,1 ... 0,5 m / s) and high resistance to contaminated measured medium.

Disadvantages of such devices include:

1. Labor-consuming installation;
2. Low precision in narrow range of flow rate measurements (1: 3);
3. Considerable pressure losses at restricting devices, which in its turn, results in additional expenses for pump operation [20].

For this reason it was expedient to introduce a new “velocity-area” method with the application of the averaged pressure tube.

This facility creates a pressure drop, proportional to squared flow rate, in accordance with Bernoulli’s principle: the sum of energies at a certain point of the tube is a sum of static energy (pressure created by the substance in all directions), kinetic energy (substance speed) and potential energy (gravitational component). For such case Bernoulli’s principle is written as:

$$\frac{v_1}{2g} + \frac{p_1}{\rho} = \frac{v_2}{2g} + \frac{p_2}{\rho}, \quad (10)$$

where  $v$  – flow velocity;  $g$  – gravitational constant;  $p$  – pressure;  $\rho$  – substance density [21].

Averaged pressure tube is used in more than a million of flow metering units and in large-diameter tubes. This is explained by stable and accurate operation with good repeatability of the results. Besides, the facility has significant advantages over the traditional restricting orifices due to simple installation and low pressure losses.

A disadvantage of flowmeters with a variable pressure drop is low precision when they are used for low flow rate measurements in small-diameter tubes (less than 50 mm) and pulsing flows [21].

Industrial production of averaged pressure tubes is provided by some foreign companies, e. g., USA company Hanejwell (Austrian branch) produces flow meters with the tubes of Annubar type.

Volumetric electrodynamic flowmeters are divided into ionization, magnetic and electromagnetic flowmeters.

Their operating principle is based on measuring the intensity of radiation directed transversally to the flow. To reduce the error, caused by instability (variability) of the radiation source, differential transducers with flow ionization (or ultrasound radiation) receivers are most often used [22].

Disadvantages of such flowmeters include influence of the gas parameters, temperature and pressure on the ionization value. Avoidance of these factor leads to significant complication of the design of pulsing and sensitive elements. Besides, ionization meters cannot be used for measuring flow rates of strongly ionized and incandescent gases [23].

LLC «ПРАМЕНЬ» is a developer of ionization flow meters.

Operating principle of the magneto-inductive flowmeters is based on measuring EMF, proportional to the flow rate, which is induced in the flow of electricity-conductive substance under the action of external magnetic field (Faraday law) . According to this law, for any closed loop an induced EMF is proportional to the change rate of magnetic flux, passing through this loop.

Main advantage of such meters is as follows: initial converters do not have parts projecting inside the pipeline while isolation and anticorrosion coatings make it possible to measure flow rates of aggressive and abrasive mediums [24].

Polarization of sensitive elements, leading to changes of the converter resistance, is a disadvantage of this method. This causes additional errors. Besides, these flowmeters are sensitive to flow inhomogeneity, turbulence and non-uniform distribution of flow velocities in the channel section.

In spite of their drawbacks, magneto-inductive flowmeters are widely used in metallurgy, food industry, construction, biochemistry, ore dressing production, medicine since they have low inertia as compared with flowmeters of other types [25].

Producers of such flowmeters are «Krohne», «Siemens», «Honeywell» (USA).

The ultrasound method is one more flow rate measurement method that has become popular lately. It uses time dependence of the ultrasound vibrations propagation through gas flow in the pipeline with pre-defined diameter [26].

Time difference  $\Delta\tau$  is directly proportional to flow velocity  $v$  :

$$\Delta\tau = \frac{2L}{c^2} v, \quad (11)$$

where  $c$  – sound speed in the medium;  $L$  – distance, that is passed by ultrasound vibrations [27].

In the ultrasound meter pairs of primary transducers are located. Presence of several such pairs makes it possible to obtain more accurate flow rate values. Each of the sensors is capable of receiving and transmitting a signal. Measurements of the time, within which the signal passes between each of the pairs, occur simultaneously. The signal is generated by piezoelectric crystals, to which voltage is applied or, vice versa, when ultrasound wave strikes the crystal, voltage appears at the crystal. Increasing the number of the pairs of sensors, it is possible to determine accurately and to compensate mathematically distortions of the flow profile throughout the entire section of the

tube. When there is no substance motion in the tube, signal transmission time is the same both upstream and downstream. As soon as the substance starts flowing in the measuring tube, the speed of sound signals increases in the direction of liquid flow and decreases in the opposite direction [29].

Ultrasound flowmeters, in their turn, are divided into:

1. Frequency flowmeters, where the difference in the frequencies of repetition of short pulses or packets of ultrasound vibrations is measured;
2. Phase flowmeters, which measure the difference of the phase shifts of ultrasound vibrations;
3. Time-pulse flowmeters, where the difference in time, within which short pulses pass, is measured directly [27];
4. Resonance flowmeters;
5. Single-channel (with two piezoelements);
6. Double-channel (with four piezoelements);
7. Multichannel [29].

Ultrasound flowmeters are the most prospective for commercial accounting as they have a number of advantages:

1. Absence of movable parts or parts projecting into the flow;
2. They do not create additional pressure losses;
3. They can operate from an integrated autonomous power source for a long time;
4. Accuracy to  $<0,1\%$  could be calibrated;
5. Measurements are relatively accurate even in the case of sensor failure [30].

In other initial measuring device, such as turbine flowmeters, it is difficult to understand if they still provide accurate information after a certain period of operation. Such factor as contamination caused by oil in the pipeline can influence the accuracy of any sensor. Sometimes, in order to check proper operation of a measuring device, visual examination is required. For ultrasound meters electronic diagnostics is proposed, which helps in checking their proper operating condition and prevents from extra internal interference which is often required for other measuring devices. Internal diagnostics can also be used for checking other indicators of a measuring facility such as temperature [28].

In spite of the evident advantages of ultrasound meters, the method has the following drawbacks:

1. Restrictions concerning minimal flow rates;
2. Complexity and high cost of the devices, which is by 3 – 4 times higher than that of tachometric and electromagnetic flowmeters, all other conditions being equal;
3. Influence of air bulbs in the flow on the flowmeter indications;
4. The necessity for long linear sections in front and behind the transducer [31].

Today, there is a huge number of companies engaged in the development of ultrasound flowmeters: «Krohne» (series UFM, GFM, Altosonic), «Emerson» (Senior Sonic, Junior Sonic), «Sick Mahack» (Northern America).

Mass flowmeters, among which heat and mechanical flowmeters are distinguished, belong to another class of gas flow rate measuring devices. Heat flowmeters include calorimetric and thermoanemometric devices. Mechanical flowmeters include inertia meters.

Carioles flowmeters together with turbo-power and hygroscopic devices are related to inertia meters. Inside each Carioles flowmeter a tube is located (e. g., Yokogawa company proposes a solution with two tubes) [32]. A so called exciter forces the tube to vibrate with a definite clock rate. If there is no motion of the measured medium in the tube, it vibrates with a uniform frequency.

Sensors, located at the input and output of the tube, register these uniform vibrations. As soon as the measured medium starts to move in the tube, additional longitudinal vibrations appear. Under the influence of Carioles force input and output parts of the tube deflect in different directions, i.e. a phase shift is observed [33]. Highly sensitive transducers are responsive to these vibrations. Therefore, phase shift is a measure of the substance flow rate. The higher the flow rate, the more vibration periods are included into the measured section [34].

This group of flowmeters has high accuracy and reliability, flow direction does not influence op-

eration of the device; Carioles flowmeters, if installed properly, are not sensitive to vibrations and temperature drops.

Such flowmeters are suitable only for small-diameter pipelines and their indications are dependent on the slag deposits in the tubes.

Among the producers of Carioles flowmeters there are such companies as «Emerson» and «Endress + Hauser» (Switzerland).

### Conclusions

Ensuring maximally accurate control over consumption of gaseous and liquid mediums is one of the most important current power engineering problems. At present there exist a lot of flow rate measurement methods. Each of the meters has its advantages and drawbacks, depending on which it finds application in industry. Taking the above-mentioned into account, the paper analyzes the existing flow rate measuring methods and proposes their classification. It has been determined that the ultrasound method is the most prospective one due to its wide dynamic range, reliable operation, high precision and convenient diagnostics. In spite of its evident advantages, ultrasound flowmeters are rather expensive and their increased number of channels leads to much more complicated information processing software realization.

### REFERENCES

1. Ряховский С. В. Основные принципы создания единой системы учета газа в региональной компании поставщика газа / С. В. Ряховский, Л. Г. Паскаль // Энергосбережение. – 2005. – № 10. – С. 54 – 58.
2. Тюленев Л. Н. Методы и средства измерений, испытаний и контроля / Л. Н. Тюленев, В. В. Шушерин, А. Ю. Кузнецов; под ред. С. В. Кортов. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ УПИ, 2005. – 76 с.
3. ЭлектроТехИнфо: информационная торговая система [Электронный ресурс]: Тахометрические счетчики и расходомеры. Устройство, принцип действия, типы и виды тахометрических счетчиков и расходомеров. – Режим доступа: [http://www.eti.su/articles/izmeritelnaya-tehnika/izmeritelnaya-tehnika\\_527.html](http://www.eti.su/articles/izmeritelnaya-tehnika/izmeritelnaya-tehnika_527.html). – Назва з екрану.
4. MESKOTEX MESS- UND KONTROLLTECHNIK [Электронный ресурс]: Диафрагменные расходомеры. – Режим доступа: <http://www.meskotex.com/diaphragm.htm>. – Назва з екрану.
5. DS/OM–RU Редакция 2 [Электронный ресурс]: Компактный диафрагменный расходомер OriMaster. Техническое описание. – Режим доступа: [http://www05.abb.com/global/scot/scot203.nsf/veritydisplay/0b3b45a281a88c9bc12575a80037b487/\\$file/ds\\_om-ru\\_2.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot203.nsf/veritydisplay/0b3b45a281a88c9bc12575a80037b487/$file/ds_om-ru_2.pdf). – Назва з екрану.
6. To build [Электронный ресурс]: Виды газовых счётчиков: мембранные, ротационные, турбинные счётчики. Вихревой расходомер. – Режим доступа: <http://gas.to-build.ru/content/view/56/44/>. – Назва з екрану.
7. LICON [Электронный ресурс]: Типы расходомеров. – Режим доступа: [http://eclicon.ru/?page\\_id=1450](http://eclicon.ru/?page_id=1450). – Назва з екрану.
8. MESKOTEX MESS- UND KONTROLLTECHNIK [Электронный ресурс]: Турбинные расходомеры. – Режим доступа: <http://www.meskotex.com/hm.htm>. – Назва з екрану.
9. Правила метрологии ПР 50.2.019-2006 «Методика выполнения измерений при помощи турбинных, ротационных и вихревых счетчиков» / ред. В. Н. Копысов. – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2007. – 33 с.
10. Журнал «Энергетика и ТЭК» [Электронный ресурс]: Расходомеры: принципы работы и опыт эксплуатации. – Режим доступа: [http://www.energetika.by/arch/~page\\_\\_m21=6~news\\_\\_m21=140](http://www.energetika.by/arch/~page__m21=6~news__m21=140). – Назва з екрану
11. Газовик [Электронный ресурс]: Турбинные счетчики газа. – Режим доступа: <http://gazovik-gaz.ru/spravochnik/consum/turbinnye-schetchiki-gaza.html>. – Назва з екрану.
12. YOKOGAWA [Электронный ресурс]: Вихревой расходомер, вихревой расходомер – принцип действия. – Режим доступа: <http://www.yokogawa.ru/measurementcharge?prod=443>. – Назва з екрану.
13. Технический паспорт D184S035U03 Rev. 12 [Электронный ресурс]: 2-проводное компактное устройство. Измерительный преобразователь на базе цифрового сигнального процессора. – Режим доступа: [http://www05.abb.com/global/scot/scot211.nsf/veritydisplay/53187d45f8a21695c1257950003daaec/\\$file/D184S035U03-RU-12-11\\_2011.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot211.nsf/veritydisplay/53187d45f8a21695c1257950003daaec/$file/D184S035U03-RU-12-11_2011.pdf). – Назва з екрану.
14. Руководство по эксплуатации 00809-0107-4860 [Электронный ресурс]: Расходомеры вихревые Rosemount 8600D. – Режим доступа: <http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Rosemount%20Documents/00809-0107-4860.pdf>. – Назва з екрану.
15. Научно-производственная фирма "Раско" [Электронный ресурс]: О применимости различных методов измерения расхода для коммерческого учета газа. – Режим доступа: <http://www.rasko.ru/node/1763>. – Назва з екрану.
16. Руководство по эксплуатации 2.784.000 РЭ [Электронный ресурс]: СЧЁТЧИК ГАЗА РОТАЦИОННЫЙ

- РГ-К-Ех. – Режим доступа: [http://www.ppx.ru/product/re\\_rgk.pdf](http://www.ppx.ru/product/re_rgk.pdf). – Назва з екрану.
17. ПРАМЕНЬ [Электронный ресурс]: Струйные расходомеры. – Режим доступа: <http://nporamen.ru/information/other-flowmeters/specific-methods/3-jet-flowmeters>. – Назва з екрану.
18. Научно-производственная фирма "Раско" [Электронный ресурс]: О применении струйного автогенераторного метода измерения в бытовых счетчиках газа и поверочных установках. – Режим доступа: <http://www.packo.ru/node/2151>. – Назва з екрану.
19. Чаплыгин Э. И. Математическая модель струйного расходомера. / Э. И. Чаплыгин, Ю. В. Земсков, В. В. Корзин // Журнал технической физики. – 2004. – т. 74. – № 4. – С. 16 – 19.
20. Измерение расхода с использованием осредняющих напорных трубок [Электронный ресурс] / В. Н. Жук // Энергетика и ТЭК. – 2010. – № 2. [http://www.energetika.by/arch/~year\\_m21=2010~month\\_m21=2~page\\_m21=1~news\\_m21=568](http://www.energetika.by/arch/~year_m21=2010~month_m21=2~page_m21=1~news_m21=568).
21. ETS [Электронный ресурс]: Основные принципы измерения расхода газа с помощью осредняющей напорной трубки. – Режим доступа: <http://www.ets.inf.ua/PDF/Intra/%D0%9E%D1%81%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%BD%D1%8B%D0%B5%20%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%BD%D1%86%D0%B8%D0%BF%D1%8B%20%D0%B8%D0%B7%D0%BC%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F%20%D1%80%D0%B0%D1%81%D1%85%D0%BE%D0%B4%D0%B0%20ГАВАР-%D0%B7%D0%BE%D0%BD%D0%B4.pdf>. – Назва з екрану.
22. Автоматизация производственных процессов [Электронный ресурс]: Ионизационные расходомеры. – Режим доступа: <http://ru-auto.info/post/101488904990008/>. – Назва з екрану.
23. Мегапаскаль – инфопортал [Электронный ресурс]: Ионизационные расходомеры. – Режим доступа: <http://megapaskal.ru/pribory/rashod-pribor/228-i-snova-rashodomery-rashodomery-ionizacionnye.html>. – Назва з екрану.
24. Прамень [Электронный ресурс]: Электромагнитные расходомеры. – Режим доступа: <http://nporamen.ru/information/other-flowmeters/physycal-phenomena/12-electromagnetic-flowmeters>. – Назва з екрану.
25. Расходомер.ру. [Электронный ресурс]: Что такое электромагнитный расходомер?!. – Режим доступа: [http://www.td-rashodomer.ru/info/articles/elektromagnitnij\\_rashodomer.htm](http://www.td-rashodomer.ru/info/articles/elektromagnitnij_rashodomer.htm). – Назва з екрану.
26. Новый способ измерения расхода природного газа ультразвуковым методом [Электронный ресурс] / А. М. Деревягин, А. С. Фомин, В. В. Козлов // Газпром Россия. – 2008. – Режим доступа: <http://nrovumpel.ru/files/pdf/hyperflow-us.pdf>.
27. Андріішин М. П. Вимірювання витрати та кількості газу: Довідник / М. П. Андріішин. – Івано-Франківськ: ПП “Сімик”, 2004. – 160 с.
28. American school of gas measurment technology [Электронный ресурс]: Fundamentals of multipath ultrasonic flow meters for gas measurement. – Режим доступа: <http://asgmt.com/wp-content/uploads/pdf-docs/2011/1/F05.pdf>. – Назва з екрану.
29. Взлет.ру. [Электронный ресурс]: От однолучевых ультразвуковых расходомеров к многолучевым: критерий выбора. – Режим доступа: <http://www.vzljot.ru/files/publications/odnoluch-ultrasonic.pdf>. – Назва з екрану.
30. Chattopadhyay P. Flowmeters & Flow Measurement Ч. 2. / P. Chattopadhyay. – New Delhi, 2006. – 76 с.
31. Электротехинфо. [Электронный ресурс]: Ультразвуковые расходомеры. Устройство, принцип действия, типы и виды ультразвуковых расходомеров. – Режим доступа: [http://www.eti.su/articles/izmeritelnaya-tehnika/izmeritelnaya-tehnika\\_529.html](http://www.eti.su/articles/izmeritelnaya-tehnika/izmeritelnaya-tehnika_529.html). – Назва з екрану.
32. YOKOGAWA. [Электронный ресурс]: Измерения расхода с помощью кориолисовых расходомеров в случае двухфазного потока. – Режим доступа: <http://www.yokogawa.ru/default.aspx?mode=binary&id=502>. – Назва з екрану.
33. Естествознание и математика. [Электронный ресурс]: Сила кориолиса в общем курсе физики. – Режим доступа: [http://www.pskgu.ru/projects/pgu/storage/wt/wt141/wt141\\_02.pdf](http://www.pskgu.ru/projects/pgu/storage/wt/wt141/wt141_02.pdf). – Назва з екрану.
34. Autoworks. [Электронный ресурс]: Измерение массового расхода. Кориолисовый расходомер. – Режим доступа: <http://autoworks.com.ua/teoreticheskie-svedeniya/izmerenie-massovogo-rasxoda-koriolisovyj-gasxodomer/>. – Назва з екрану.
35. Организация учета природного газа. Основные принципы, методы и средства обеспечения метрологической надежности узлов коммерческого учета газа [Электронный ресурс] / С. А. Золотаревский, О. Г. Гушин // Ежегодный сборник научно-технических статей, выпускаемый ООО “ЭЛЬСТЕР Газэлектроника”. – 2012. – Режим доступа: <http://www.packo.ru/node/2150>.

**Bilynskiy Yosyp** – Dc. Sc. (Eng.), Prof., Head of the Department of Electronics  
Vinnytsia National Technical University

**Stasiuk Marina** – Master’s course student of the Department of Electronics  
Vinnytsia National Technical University.

**Gladyshevskiy Mykola** – Leading specialist of the Metrological Centre of National Joint-Stock Company  
"Naftogas of Ukraine".