

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

Й. Й. Білинський, М. В. Гладишевський, К. В. Огородник

**МЕТОДИ УЛЬТРАЗВУКОВИЙ ЗАСІБ
ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ВИТРАТ
ПЛИННИХ СЕРЕДОВИЩ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2019

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/507>

Видавництво Вінницького національного технічного університету

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog>

УДК 681.12

Б-61

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 5 від 29.11.2018 р.)

Рецензенти:

О. Є. Середюк, доктор технічних наук, професор

І. В. Ділай, доктор технічних наук, доцент

Білинський, Й. Й.

Б-61 Метод і ультразвуковий засіб вимірювального контролю витрат плинних середовищ : монографія / Й. Й. Білинський, М. В. Гладішевський, К. В. Огородник. – Вінниця : ВНТУ, 2019. – 124 с.

ISBN 978-966-641-763-6

В монографії проаналізовано сучасний стан методів та засобів вимірювального контролю витрат плинних середовищ. Запропоновано математичну модель поширення ультразвукової хвилі в плинному середовищі, ультразвуковий амплітудно-частотний метод вимірювання швидкості потоку. Розроблено математичну модель ультразвукового вимірювального перетворювача швидкості плинних середовищ, засіб вимірювального контролю витрат природного газу, який може бути застосований в газопроводах невеликого перерізу. Отримано аналітичні залежності статичних метрологічних характеристик та оцінено впливні величини на вимірювальний канал засобу контролю.

УДК 681.12

ISBN 978-966-641-763-6

© Й. Білинський, М. Гладішевський, К. Огородник, 2019

ЗМІСТ

ВСТУП	5
Розділ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ВИТРАТ ПЛИННИХ ТА ГАЗОПОДІБНИХ СЕРЕДОВИЩ І КЛАСИФІКАЦІЯ НА ЇХ ОСНОВІ	8
1.1 Класифікація методів витрат плинних середовищ.....	8
1.2 Аналіз ультразвукових засобів вимірювального контролю витрати плинних середовищ.....	21
1.3 Вибір критерію оцінювання ефективності вимірювальних перетворювачів	32
Розділ 2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ПЛИННИХ СЕРЕДОВИЩ НА ОСНОВІ УЛЬТРАЗВУКОВОГО МЕТОДУ.....	35
2.1 Дослідження об'єкта контролю.....	35
2.2. Модель поширення ультразвукових хвиль в плинному середовищі.....	39
2.3 Розробка ультразвукового амплітудно-частотного методу вимірювального контролю плинних середовищ та його експериментальні дослідження	45
2.4. Розробка математичної моделі ультразвукового амплітудно-частотного вимірювального перетворювача витрат плинних середовищ.....	55
Розділ 3 РОЗРОБКА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЗАСОБУ КОНТРОЛЮ ВИТРАТ ПЛИННИХ СЕРЕДОВИЩ НА ОСНОВІ АМПЛІТУДНО-ЧАСТОТНОГО МЕТОДУ	65
3.1 Розробка засобу вимірювального контролю витрат плинних середовищ та виведення функції перетворення засобу вимірювального контролю	65
3.1.2 Моделювання роботи основних блоків вимірювального перетворювача	75
3.1.3 Розробка алгоритму мікропроцесорної обробки результатів вимірювального контролю плинних середовищ	80

3.2 Підвищення вірогідності вимірювального контролю амплітудно-частотного засобу вимірювання витрат плинних середовищ	82
3.3 Аналіз похибок засобу вимірювального контролю витрат плинних середовищ	85
3.4 Складова похибки квантування (похибка АЦП)	87
Розділ 4 АПАРАТНО-ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСОБУ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ПЛИННИХ СЕРЕДОВИЩ	
4.1 Рекомендації щодо інженерного проектування засобу вимірювального контролю плинних середовищ	90
4.2 Алгоритм вимірювального контролю витрат плинних середовищ	93
4.3 Оцінювання загальної похибки вимірювання швидкості плинного середовища	95
4.4 Оцінювання вірогідності контролю швидкості плинного середовища	98
4.5 Експериментальні дослідження амплітудно-частотного засобу витрат плинних середовищ	101
4.5.1 Експериментальна установка дослідження амплітудно-частотного вимірювального перетворювача плинних середовищ	101
4.5.2 Методика проведення досліджень вимірювача швидкості плинних середовищ	104
4.5.3 Результати експериментальних досліджень	105
4.5.4 Експериментальні дослідження похибок засобу вимірювального контролю швидкості плинних середовищ	108
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	113

ВСТУП

В умовах ринкової економіки енергетична безпека України має бути побудована на ефективному використанні енергетичних ресурсів, скороченні їх споживання та зменшенні втрат, підвищенні точності і вірогідності їх обліку. Це стосується, насамперед, таких вуглеводневих енергоносіїв, як нафтопродукти та природний газ. Основною проблемою комерційних відносин при поставках енергоносіїв як плинного середовища є дисбаланс, що виникає при фізичному обліку від постачальника до споживача, тобто в результаті транспортування. Загальними факторами, 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].

Проблеми підвищення точності та вірогідності вимірювального контролю витрат плинних середовищ розглядаються в наукових працях багатьох вітчизняних і зарубіжних вчених, зокрема І. С. Бродіна, Є. П. Пістуна, О. Є. Середюка, І. С. Петришина, С. А. Чеховського, О. М. Дерев'ягіна, П. П. Кремльовського, В. І. Свистуна, А. А. Тупіченкова, Є. Т. Володарського, В. С. Осадчука, А. С. Фоміна, М. А. Данілова (Росія), М. Ван дер Беека (Нідерланди), Р. Крамера, Д. Допхайде (Німеччина), Г. Маттінглі, А. Джонсона (США) та ін.

На сьогодні одними з найбільш прогресивних засобів вимірювального контролю витрати рідин і газів є витратоміри з ультразвуковими первинними перетворювачами. Частка ультразвукових витратомірів на світовому ринку серед усіх засобів контролю витрат різних енергоносіїв становить більше 10 %. [2]

Ультразвукові витратоміри мають низку важливих переваг [3]:

- широкий динамічний діапазон вимірювань;
- відсутність втрат напору завдяки відсутності елементів приладу в вимірювальному каналі;
- відсутність впливу на гідродинаміку потоку;
- відсутність рухомих елементів і, як наслідок, підвищена надійність;

- можливість вимірювання витрати нафтопродуктів, агресивних, неелектропровідних, непрозорих неоднорідних рідин та суспензій, зокрема, багатокомпонентних середовищ;
- низьке енергоспоживання;
- можливість монтажу без зупинення технологічного процесу (для накладних приладів);
- збереження техніко-експлуатаційних характеристик у часі;
- відносна похибка таких засобів, як правило, знаходиться в межах 1%–1,5%.

Ультразвукові витратоміри поділяють, як правило, на три основні групи за методом вимірювання швидкості газового потоку [1].

Це витратоміри, основані на принципі переміщення ультразвукових коливань рухомим газовим потоком за та проти потоку (transit time flowmeters). До них відносяться фазові, часово-імпульсні, частотні та кореляційні.

До другої групи відносяться ультразвукові витратоміри, основані на явищі Доплера (Doppler flowmeters), до третьої – довгохвильові витратоміри, які застосовують хвилі зі звукового діапазону частот.

На сьогодні найбільш перспективними засобами контролю та обліку витрати плинних середовищ є ультразвукові часово-імпульсні витратоміри з діаметральними акустичними каналами [2].

Разом з тим, аналіз конструктивних особливостей і технічних характеристик відомих ультразвукових витратомірів показує, що проблеми створення перетворювачів витрати, що досить надійно працюють, вирішені далеко не повністю. Кожен з наведених вище типів витратомірів має свої недоліки, основними з яких є, зокрема, необхідність забезпечити надійне визначення витрати в «забруднених» газових середовищах, а також в моменти виникнення різкої зміни швидкості потоку в трубопроводі, яка спричиняє зміну виду потоку; низька точність реєстрації положення початку імпульсного сигналу; дискретність вимірювань, складність обробки сигналу. Окрім того, часово-імпульсні чи частотні витратоміри застосовують, як правило, для вимірювання витрат у трубопроводах великого діаметра. А в трубопроводах малого діаметра або в хордових каналах вони мають досить велику зону нечутливості. Тому й відсутні ультразвукові витра-

томіри з діаметром трубопроводу меншим за 25 мм, оскільки ускладнюється конструкція, а вартість не задовольняє користувача.

В цілому, всі виробники ультразвукових витратомірів використовують однаковий підхід в галузі вимірювання витрати газу і мають незначні відмінності в моделі побудови таких витратомірів та в кінцевому результаті обробки отриманих даних. Така одноманітність спонукає до більш глибокого дослідження ультразвукових методів вимірювання задля усунення спільних проблем шляхом впровадження нових методів ультразвукових вимірювань. Проведений аналіз дозволяє зробити висновок про те, що з огляду на безупинний розвиток промисловості та високі вимоги до вимірювального обладнання залишається актуальним завдання розробки сучасних методів і засобів акустичного контролю плинних середовищ, зокрема для малого діаметра трубопроводу.

У монографії узагальнено результати досліджень з розробки методу та ультразвукового засобу вимірювального контролю витрат плинних середовищ, що дозволяє в промислових умовах у реальному часі забезпечити високу вірогідність контролю.

Монографія розрахована на наукових і інженерно-технічних працівників, що займаються дослідженням і проектуванням елементів, пристроїв і систем вимірювальної техніки, радіоелектроніки і систем керування, а також на аспірантів, магістрів і студентів вищих навчальних закладів.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ВИТРАТ ПЛИННИХ ТА ГАЗОПОДІБНИХ СЕРЕДОВИЩ І КЛАСИФІКАЦІЯ НА ЇХ ОСНОВІ

Вимірювальний контроль витрат плинних середовищ у різних галузях промисловості передбачає використання різноманітних методів та засобів вимірювального контролю, вибір яких визначається особливостями кожного конкретного місця застосування.

1.1 Класифікація методів витрат плинних середовищ

На сьогодні існує величезна кількість витратомірів, які використовуються для комерційного і технологічного контролю потоків рідин, газу та пари. На основі проведеного аналізу методів контролю витрати речовини [26–58] запропоновано класифікацію, яка показана на рис. 1.1, в основу її покладено чотири головні 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 , що вимірюється в одиницях об’єму за одиницю часу, і масову витрату Q_M , відповідно:

$$Q_V = V / t, \quad (1.1)$$

$$Q_M = m / t, \quad (1.2)$$

де V – об’єм рідини або газу, які пройшли через переріз труби за час t ; M – маса рідини або газу, які пройшли через поперечний переріз труби за час t [26].

Таким чином за вимірюваною величиною розрізняють об’ємні та масові витратоміри.

За фізичними явищами, покладеними за основу принципу дії, витратоміри об’єму поділяються на механічні, механіки рідин і газів, електродинамічні, хвильові, а масові лічильники – на теплові і механічні.

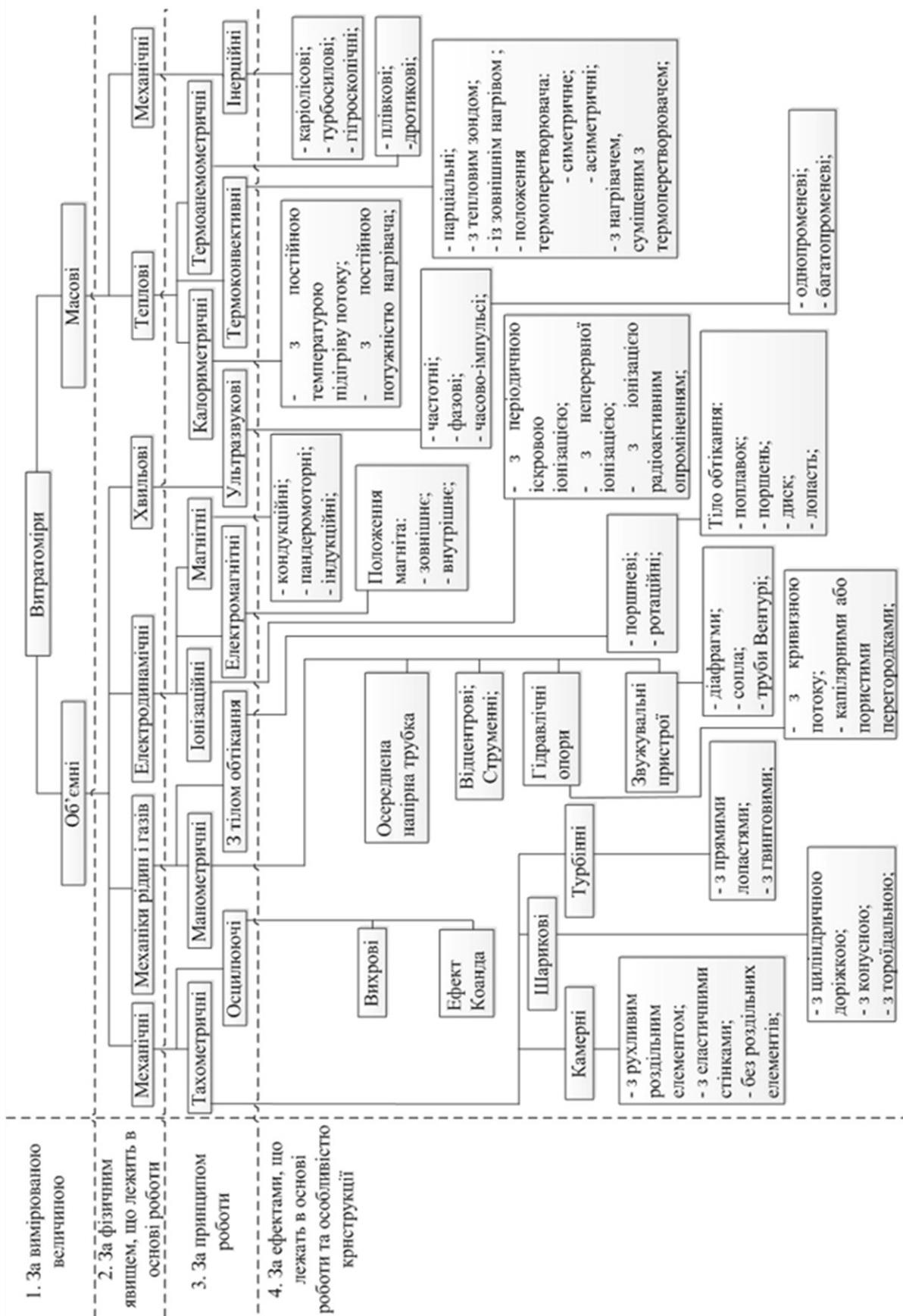


Рисунок 1.1 – Класифікація методів та засобів вимірювання витрат

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

За ефектами, що використовуються в тахометричних витратомірах, можна виділити основні три групи: камерні (інші назви: діафрагмові або мембранні), турбінні і шарикові [27]. Найчастіше використовуються перші два види.

Камерні витратоміри призначені для вимірювання витрат прозорих рідин в замкнених трубопроводах [28]. Принцип роботи таких лічильників оснований 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 викликає спадання тиску речовини у 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 спаданням тиску і витратою описується:

$$Q = K\sqrt{\Delta P}, \quad (1.3)$$

де Q – витрата речовини; K – константа для цього приладу; ΔP – різниця тисків на кінцях звуження (це значення залежить від діаметра каналу звуження) [29].

Камерні витратоміри характеризуються такими перевагами:

- можливість використання на (в) трубах з великим діаметром;
- не потребують значних затрат під час монтажу;
- перевірені часом, забезпечують надійну роботу протягом багатьох років;
- економічний вид обліку при невеликих коливаннях витрати;
- відсутність рухомих компонентів;
- місце встановлення, монтажне положення і напрямок потоку не впливають на його роботу [30].

До недоліків описаних вище витратомірів відносять:

- динамічний діапазон обмежений значенням 4:1 або 5:1;
- можливе блокування системи через вигинання діафрагми від гідравлічного удару;

- установочна довжина вимірювальної системи може мати велике значення;
- через ерозію може змінюватись геометрія кромки отвору, що знижує точність всієї системи [31].

Виробниками камерних витратомірів є відомі міжнародні компанії: ООО «АППЭК» (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 [32].

Такі витратоміри, в основному, застосовують на підприємствах з дуже високим споживанням природного газу, а також на магістралях з відносно високим тиском. Сучасний лічильний механізм турбінного витратоміра – це своєрідна комп'ютерна міні-система. Вона не лише підраховує імпульси і переводить їх в цифровий еквівалент, а й слідкує за правильністю роботи лічильника, сигналізує про несанкціоноване втручання в його роботу. Останнім часом такі механізми оснащуються модемами, завдяки яким всі показання напряму передаються на сервери служб підтримки [30].

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

$$\Delta P = \Delta P_p \left(\frac{\rho_c \cdot P}{\rho_{cp} \cdot P_p} \right) \cdot \left(\frac{Q}{Q_p} \right)^2, \quad (1.4)$$

де ΔP_p – перепад тиску на лічильнику, регламентований в технічній документації, Па; P – тиск газу (абсолютний) за конкретних робочих умов, МПа; P_p – значення тиску газу за стандартних умов, для яких регламентовано втрати тиску; ρ_c – значення густини газу за стандартних умов; ρ_{cp} – значення густини газу за стандартних умов, для яких регламентовано втрати тиску; Q – витрата газу за конкретних робо-

чих умов, м³/год; Q_p – витрата газу, для якої регламентовано втрати тиску, м³/год [33].

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

- змашувальні властивості середовища;
- зміну стану і розмірів лопастей;
- зношеність підшипників і тертя;
- температуру, тиск і в'язкість вимірюваного середовища;
- спад тиску на витратомірі;
- профіль швидкості на вході і ефекти завихрень.

Саме через ці фактори необхідно виконувати калібрування і перевірку турбінних лічильників в робочих умовах.

До основних переваг таких витратомірів відносять:

- відмінну точність ($\pm 0,5\%$ від фактичного значення);
- максимальний динамічний діапазон до 10:1;
- витратоміри із байпасними каналами відносно дешеві [31];
- енергонезалежність;
- низький рівень шуму [34].

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 становлять 2 і 1 діаметр умовного проходу витратоміра, відповідно. Також до недоліків належить підвищена похибка при вимірюванні пульсуючих потоків газу.

Рекомендується обирати витратоміри тих типів, у яких перетворювач температури і отвір для відбору тиску розміщені в корпусі. Не бажано встановлювати лічильники на ділянках, де можливе накопичення конденсату [35].

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

Осцилювальні витратоміри поділяються на вихрові лічильники і лічильники, що використовують ефект Коанда. Найпоширенішими витратомірами цього класу є вихрові, які застосовуються на масштабних підприємствах, де відбувається споживання величезної кількості

природного газу. Як і на турбінних витратомірах, лічильний механізм вихрового витратоміра являє собою комп'ютерну мінісистему. Важливою перевагою цієї системи є нечутливість до пневмоударів і можливість роботи на забруднених газах [30].

В задній частині тіла особливої форми, яке обдувається потоком середовища, утворюються завихрення. Ці завихрення утворюють так звану доріжку Кармана. Зрив завихрень з обтічного тіла можна виявити і розрахувати. В деякому діапазоні їх кількість пропорційна витраті, що дозволяє виміряти швидкість руху середовища [36].

Частота утворення вихрів і швидкість середовища мають майже лінійну залежність, яка визначається

$$f = S_t \cdot (v / d), \quad (1.5)$$

де f – частота виникнення вихорів; S_t – число Струхаля, яке визначається експериментально; v – швидкість потоку середовища; d – ширина тіла обтікання [36].

Частота утворення завихрень не змінюється при зміні густини середовища [37].

До переваг вихрових витратомірів належать:

- досить великий динамічний діапазон;
- малий опір потоку;
- відсутність рухливих деталей;
- лінійний вихідний сигнал;
- невелика втрата тиску;
- простота і надійність в експлуатації, оскільки п'єзодатчики не контактують із середовищем [36].

Недоліками вихрових лічильників є:

- можливий вплив вібрації на точність вимірювань;
- значну роль відіграє правильна установка;
- максимальні витрати відповідають швидкості потоку 80 або 100 м/с;
- 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;

- необхідно передбачити прямі ділянки трубопроводу до і після витратоміра без перешкод [38].

Відома фірма – виробник «Endress+Hauser» ProlineProwirl [39]. Іншими виробниками таких витратомірів є ИПФ «Сибнефтеавтоматика» (Росія), «Emerson» (витратоміри Rosemount, США), корпорація «YokogawaElectricCorporation» (витратоміри YEWFL0, Японія).

Об'ємні витратоміри механіки рідин і газів за принципом дії поділяються 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 використовуються на підприємствах, де споживання природного газу не перевищує 200 м³/год [30]. Принцип роботи таких витратомірів оснований на обертанні двох співвісно розташованих роторів під впливом потоку газу. Відліковий пристрій показує кількість газу (м³), яка пройшла через лічильник за робочого тиску P і температури T . Перерахунок в об'ємні одиниці, V_H , до умов за ГОСТ 2939 виконують за формулою

$$V_H = V_p \frac{P \cdot T_H}{T \cdot K \cdot P_H}, \quad (1.6)$$

де V_p – різниця показів лічильника за період вимірювання, м³; 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 [40].

Такий витратомір є довговічним, має велику пропускну здатність за відносно невеликих розмірів і маси, витримує перенавантаження, автоматичний перерахунок об'єму газу виконується за допомогою коректорів (обчислювачів) [41].

Незважаючи на наведені вище переваги, ротаційний витратомір має низку недоліків, до яких відносять високу вартість. Вимірювальна система лічильника потребує ретельної підгонки всіх деталей і не здатна працювати при забрудненому газі [39].

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

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

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

Струменеві витратоміри дозволяють вимірювати невеликі витрати газу, оскільки мають високий поріг чутливості [41]. Принцип роботи полягає у вимірюванні частоти перемикання струменевого автогенератора (САГ), що пропорційна швидкості витрат газу. Частота коливань потоку пропорційна витраті через сопло САГ:

$$f = Sh \cdot \frac{q}{l \cdot b \cdot h}, \quad (1.7)$$

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

Згідно з формулою витрати

$$q = \mu \cdot h \cdot b \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}}, \quad (1.8)$$

отримуємо, що частота коливань потоку САГ пропорційна перепаду тиску на струменевому елементі (швидкості потоку через нього) і густині середовища [43]:

$$f = Sh \cdot \frac{\mu}{l} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}}. \quad (1.9)$$

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 також поділяють ще на три групи.

- Витратоміри з осцилювальним струменем (різновид вихрових витратомірів). Як і у вихровому методі, тут використовується принцип створення аеродинамічного генератора коливань з частотою, пропорційною витраті газу [41, 43].

Витратоміри цієї групи, окрім спільних недоліків з вихровими лічильниками, мають також надзвичайно великі розміри струменевого елемента відносно величини вимірюваної витрати і нестабільний коефіцієнт перетворення.

- Ударно-струменеві витратоміри. Ці витратоміри вимірюють залежний від витрати перепад тиску, що виникає при ударі струменя рідини або газу. Такі лічильники використовують лише для вимірювання малих витрат.

- Витратоміри із відхиленням витікаючого струменя. Принцип дії оснований на залежності перепаду тиску від вимірюваної швидкості газу, що виникає при відхиленні струменя допоміжного газу або рідини [43].

Виробниками струменевих витратомірів є російські компанії «Газовик», ООО «Глобус», ГК «Промприбор», «ТБН энергосервис».

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

Недоліками таких пристроїв є:

- висока трудомісткість монтажу;
- невисока точність за невеликого діапазону вимірювання витрати (1:3);
- значна втрата тиску на звужувальних пристроях, що зі свого боку призводить до додаткових затрат на роботу насосів [44].

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

Цей прилад створює перепад тисків пропорційний квадрату швидкості потоку згідно з теоремою Бернуллі: сума енергій в будь-якій точці труби є сумою статичної енергії (тиск, що створюється речовиною у всіх напрямках); кінетичної (швидкість речовини) і потенційної енергії (гравітаційна складова). В такому випадку теорема Бернуллі записується

$$\frac{v_1}{2g} + \frac{p_1}{\rho} = \frac{v_2}{2g} + \frac{p_2}{\rho}, \quad (1.10)$$

де v – швидкість потоку; g – гравітаційна стала; p – тиск; ρ – густина речовини [45].

Осереднена напірна трубка знаходить використання в більш ніж мільйоні витратомірних вузлах і в трубах з великим діаметром. Це пояснюється стабільною і точною роботою з гарною повторюваністю результату. Також прилад має суттєві переваги перед традиційними звужувальними діафрагмами завдяки простоті встановлення і низьким втратам тиску.

Недоліками витратомірів змінного перепаду тиску є низька точність їх застосування при вимірюванні малих витрат в трубах невеликого діаметра (менше 50 мм) і пульсуючих потоків [45].

Промисловий випуск осереднених напірних трубок налагоджений деякими зарубіжними фірмами. Наприклад, фірма США Honeywell (Австрійська філія) випускає витратоміри з напірними трубками типу Annubar.

Об'ємні електродинамічні витратоміри поділяються на іонізаційні, магнітні і електромагнітні витратоміри.

Принцип дії іонізаційних витратомірів полягає у вимірюванні інтенсивності випромінювання, направлено поперек потоку. Для зменшення складової похибки від мінливості джерела випромінювання переважно використовуються диференційні перетворювачі з двома приймачами іонізаційного потоку (або ультразвукового випромінювання) [46].

До недоліків таких витратомірів потрібно віднести вплив параметрів газу, температури і тиску на величину іонізації. Уникнення цих факторів значно ускладнює конструкцію імпульсних і чутливих еле-

ментів. Крім того, іонізаційні лічильники не можуть застосовуватись для вимірювання витрати сильно іонізованих і розпечених газів [47].

Розробником іонізаційних витратомірів є ТОВ «Промінь» (Україна).

Принцип дії магнітно-індуктивних витратомірів оснований на вимірюванні пропорційної витрати електрорушійної сили, що індуквана в потоці електропровідної речовини під дією зовнішнього магнітного поля (закон Фарадея). Відповідно до цього закону для будь-якого замкнутого контуру індуквана 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 і антикорозійні покриття дозволяють вимірювати витрати агресивних і абразивних середовищ [48].

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

Незважаючи на недоліки магнітно-індуктивні витратоміри знайшли широке використання в металургії, харчовій промисловості, в будівництві, біохімії, виробництві збагачення руди, в медицині, оскільки вони мають малу інерційність порівняно із витратомірами інших типів [49].

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

Сьогодні **набув популярності ще один метод вимірювання витрати – ультразвуковий**. Він базується на залежності часу поширення ультразвукових коливань через потік газу в трубопроводі заданого діаметра [50].

Різниця часу $\Delta \tau$ прямо пропорційна швидкості потоку v

$$\Delta \tau = \frac{2L}{c^2} v, \quad (1.11)$$

де c – швидкість звуку в середовищі; L – відстань проходження ультразвукових коливань [51].

В ультразвуковому лічильнику розташовано пари первинних перетворювачів. Наявність декількох пар дозволяє отримувати більш точні значення витрати. Кожен з датчиків здатен приймати і передавати сигнал. Вимірювання часу проходження сигналу між кожною парою відбувається одночасно. Сигнал генерується п'єзоелектричними кристалами, до яких прикладена напруга, і навпаки, коли ультразвукова хвиля вдаряється об кристал, на кристалі виникає напруга. Збільшуючи кількість пар датчиків, можна точно визначити і математично компенсувати спотворення профілю потоку в усьому поперечному перерізі труби. Коли в трубі відсутній рух речовини, час передачі сигналу однаковий за течією і протитечії. Як тільки речовина починає текти по вимірювальному трубопроводу, швидкість звукових сигналів збільшується в тому напрямку, в якому тече рідина і зменшується в протилежному напрямку[53].

Ультразвукові витратоміри також поділяються на:

- частотні витратоміри, в яких вимірюється різниця частот повторення коротких імпульсів чи пакетів ультразвукових коливань;
- фазові витратоміри, в яких вимірюється різниця фазових зсувів ультразвукових коливань;
- часово-імпульсні витратоміри, в яких відбувається безпосереднє вимірювання різниці часу проходження коротких імпульсів [51];
- резонансні витратоміри;
- одноканальні (з двома п'єзоелементами);
- двоканальні (наявні чотири п'єзоелементи);
- багатоканальні [53].

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

- відсутність рухомих частин і частин, що виступають в потік;
- не створюють додаткових втрат напору;
- впродовж тривалого часу можуть працювати від вбудованого автономного джерела живлення;
- точність можна калібрувати до $<0,1\%$;
- вимірювання є відносно точними, навіть коли датчик виходить з ладу [54].

В інших первинних вимірювальних пристроях, таких як **турбінні витратоміри**, важко зрозуміти чи дійсно вони все ще точно працюють після деякого періоду експлуатації. Такий фактор 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 пропонується електронна діагностика, яка допомагає перевірити належний робочий стан, і тим самим знижує внутрішнє втручання, яке часто потрібне для інших вимірювальних пристроїв. Внутрішня діагностика може також використовуватись для перевірки інших показників вимірювальної конструкції, таких як температура і газ [52].

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

- обмеження за мінімальною швидкістю потоку;
- складність і висока вартість пристроїв, яка за інших рівних умов в 3–4 рази перевищує вартість тахометричних і електромагнітних витратомірів;
- вплив на покази бульбашок повітря в потоці;
- необхідність значних довжин прямих ділянок до і після перетворювача [55].

На сьогодні існує величезна кількість компаній, які займаються розробкою ультразвукових витратомірів: «Krohne» (серія UFM, GFM, Altosonic) (Велика Британія), «Emerson» (SeniorSonic, JuniorSonic) (США), «SickMaihak» (Німеччина), RMG (Німеччина).

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

Коріолісові витратоміри разом із турбосиловими і гігроскопічними належать до інерційних лічильників. В середині кожного коріолісового витратоміра розташована трубка (наприклад, фірма Yokogawa пропонує рішення з двома трубками) [56]. Так званий збудник примушує трубку коливатися з певною тактовою частотою. Якщо в трубці відсутній рух вимірюваного середовища – вона коливається рівномірно.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ф. Матіко, В. Роман і Р. Федоришин, «Порівняльний аналіз методів визначення швидкості звуку,» *Вимірювальна техніка та метрологія*, № 73, с. 56–62, 2012.
2. О. М. Богуш, «Промышленные ультразвуковые расходомеры газа,» *ООО «Пьезоэлектрик»*, Ростов-на-Дону, Россия, 2012.
3. С. Н. Марущенко, «Оценка метрологических характеристик различных типов ультразвуковых расходомеров на основе разработанной классификации,» *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*, № 56, с. 107–115, 2012.
4. Й. Й. Білінський, Б. П. Книш і М. В. Гладишевський, «Визначення кількісного вмісту компонентів скрапленого нафтового газу,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 1, с. 112–119, 2014.
5. М. П. Андрійшин, Р. А. Домницький, С. І. Дехтярчук, А. В. Едель і М. В. Гладишевський, «Вплив фізико-хімічних показників газу на ефективність роботи газових приладів,» *Нафтогазова галузь України*, № 6, с. 34–39, 2014.
6. Й. Й. Білінський, М. О. Стасюк і М. В. Гладишевський, «Аналіз методів і засобів контролю витрат рідких і газоподібних середовищ і класифікація на їх основі,» *Наукові праці ВНТУ*, № 1, 2015, [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/3748/5468>.
7. М. В. Гладишевський, «Аналіз системи вимірювання витрат газу,» на *IX Міжнародній науково-практичній конференції. Політ. Сучасні проблеми науки*, Київ, 2009, с. 56.
8. В. С. Єременко і М. В. Гладишевський, «Методика обліку природного газу на базі ультразвукового лічильника,» на *XI Міжнародній науково-технічній конференції. Політ. Сучасні проблеми науки*, Київ, 2011, с. 125.
9. J. Bilynsky, K. Ogorodnik, A. Lazarev, A. Syrovatskyi, “Development and research of an ultrasonic resonance method mathematical model of measuring medium parameters” in *14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2018 – Proceedings*. Lviv-Slavske, Ukraine, 2018, pp. 1192–1194. DOI: 10.1109/TCSET.2018.8336408.
10. Й. Й. Білінський і М. В. Гладишевський, «Аналіз ультразвукових засобів вимірювального контролю витрати плинних середовищ,» *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, № 2, с. 23–29, 2016.

11. Й. Й. Білінський і М. В. Гладішевський, «Розробка ультразвукового методу вимірювання швидкості плинних середовищ,» *Технологічний аудит та резерви виробництва*, № 4/1, с. 19–24, 2015.

12. Й. Й. Білінський і М. В. Гладішевський, «Новий ультразвуковий метод вимірювання витрат плинних середовищ,» *Нафтогазова галузь України*, № 2, с. 35–39, 2016.

13. Й. Й. Білінський і М. В. Гладішевський, «Методика проектування амплітудно-частотного вимірювального перетворювача швидкості потоку,» на *XV Міжнародній науково-технічній конференції. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, Одеса, 2015, с. 37–39.

14. Й. Й. Білінський і М. В. Гладішевський, «Математична модель ультразвукового вимірювального перетворювача швидкості плинних середовищ,» на *III Міжнародній науковій конференції. Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах*, Вінниця, 2015, с. 128–129.

15. Й. Й. Білінський і М. В. Гладішевський, «Експериментальне дослідження підсилювача для ультразвукового витратоміра,» на *Міжнародній науково-практичній конференції. Потенціал сучасної науки*, Вінниця, 2016, с. 21–23.

16. Й. Й. Білінський і М. В. Гладішевський, «Моделювання роботи підсилювача для ультразвукового витратоміра,» на *XIII Міжнародній конференції. Контроль та управління в складних системах (КУСС-2016)*, Вінниця, 2016, с. 71–73.

17. Й. Й. Білінський і М. В. Гладішевський, «Алгоритм мікропроцесорної обробки вимірювання швидкості потоку,» на *X Міжнародній науково-технічній конференції. Метрологія та вимірювальна техніка*, Харків, 2016, с. 94.

18. Й. Й. Білінський, М. В. Гладішевський і В. Б. Бурдейний, «Моделювання поширення ультразвукових хвиль в плинному середовищі,» *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*, № 42(1214), с. 17–21, 2016. Doi. 10.20998/2413-4295.2016.42.03.

19. Й. Й. Білінський, М. В. Гладішевський і В. Б. Бурдейний, «Моделювання ультразвукового амплітудно-частотного вимірювача швидкості плинних середовищ,» *Методи та прилади контролю якості*, № 2(37), с. 67–71, 2016.

20. Й. Й. Білінський, М. В. Гладішевський і В. Б. Бурдейний, «Моделювання ультразвукового засобу вимірювального контролю витрати плинних середовищ,» *Вісник Хмельницького національного університету, Серія: Технічні науки*, № 1(245), с. 191–195, 2017.

21. Й. Й. Білінський, Б. П. Книш і М. В. Гладішевський, «Аналізатор кількісного вмісту скрапленого нафтового газу,» на *7-й Міжна-*

родній науково-технічній конференції і виставці Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання, Івано-Франківськ, 2014, с. 37.

22. М. В. Гладішевський, А. А. Рижкова і Д. О. Харламов, «Шляхи забезпечення єдності вимірювань на підприємствах,» на *X Міжнародній науково-технічній конференції. АВІА-2011*, Київ, 2011, с. 71–74.

23. В. С. Єременко і М. В. Гладішевський, «Сучасні прилади обліку витрат газу,» на *X Міжнародній науково-технічній конференції. Політ. Сучасні проблеми науки*, Київ, 2010, с. 152.

24. Й. Й. Білінський і М. В. Гладішевський, «Ультразвуковий метод вимірювання швидкості плинних середовищ,» на *I Міжнародній науково-технічній конференції. Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення 2015*, Житомир, 2015, с. 53–54.

25. С. В. Ряховський і Л. Г. Паскаль, «Основные принципы создания единой системы учета газа в региональной компании поставщика газа,» *Энергосбережение*, № 10, 2005.

26. Л. Н. Тюленев, В.В. Шушерин и А. Ю. Кузнецов, «Методы и средства измерений, испытаний и контроля,» *Конспект лекций ГОУ ВПО УГТУ УПИ*, Екатеринбург, Россия, № 2, с. 76, 2005.

27. ЕлектроТехИнфо: інформаційна торгова система, «Тахометрические счетчики и расходомеры. Устройство, принцип действия, типы и виды тахометрических счетчиков и расходомеров,» [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.eti.su/articles/izmeritelnaya-tehnika/izmeritelnaya-tehnika_527.html.

28. MESKOTEXMESS-UNDKONTROLLTECHNIK, «Диафрагменные расходомеры,» [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.meskotex.com/diaphragm.html>.

29. DS/OM–RU Редакция 2, «Компактный диафрагменный расходомер OriMaster. Техническое описание,» [Електронний ресурс]. Режим доступу: [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).

30. To build, «Виды газовых счётчиков: мембранные, ротационные, турбинные счётчики. Вихревой расходомер,» [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://gas.to-build.ru/content/view/56/44/>.

31. LICON, «Типы расходомеров,» [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://eclicon.ru/?page_id=1450.

32. MESKOTEXMESS-UNDKONTROLLTECHNIK, «Турбинные расходомеры,» [Електронний ресурс]. Доступно: <http://www.meskotex.com/hm.htm>.

33. Правила метрологии ПР 50.2.019-2006, «Объем и энергосодержание природного газа. Государственная система обеспечения единс-

тва измерений. Методика выполнения измерений при помощи турбинных, ротационных и вихревых счетчиков», *Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии*, Москва, Россия, 2006.

34. Д. В. Тросников и В. Н. Жук, «Расходомеры: принципы работы и опыт эксплуатации», *Энергетика и ТЭК*, № 4, 2008.

35. Газовик, «Турбинные счетчики газа», [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://gazovik-gaz.ru/spravochnik/consum/turbinnnye-schetchiki-gaza.html>.

36. YOKOGAWA, «Вихревой расходомер, вихревой расходомер – принцип действия», [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.yokogawa.ru/measurementcharge?prod=443>.

37. Технический паспорт D184S035U03 Rev. 12, «2-проводное компактное устройство. Измерительный преобразователь на базе цифрового сигнального процессора», [Электронный ресурс]. 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).

38. Руководство по эксплуатации 00809-0107-4860, «Расходомеры вихревые Rosemount 8600D», [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Rosemount%20Documents/00809-0107-4860.pdf>.

39. С. А. Золотаревский, «Расходомеры: принципы работы и опыт эксплуатации», *Энергоанализ и Энергоэффективность*, № 4, 2006.

40. Руководство по эксплуатации 2.784.000 РЭ, «СЧЁТЧИК ГАЗА РОТАЦИОННЫЙ РГ-К-Ех», [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.ppx.ru/product/re_rgk.pdf.

41. ПРАМЕНЬ, «Струйные расходомеры», [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://npoprampen.ru/information/other-flowmeters/specific-methods/3-jet-flowmeters>.

42. С. А. Золотаревский, О. Г. Гущин и И. Ю. Иванушкин, «Расходомеры: принципы работы и опыт эксплуатации», *Ежегодный сборник научно-технических статей, выпускаемый ООО “ЭЛЬСТЕР Газ-электроника”*, 2012.

43. Э. И. Чаплыгин, Ю. В. Земсков и В. В. Корзин, «Математическая модель струйного расходомера», *Журнал технической физики*, № 4(74), с. 16–19, 2004.

44. В. Н. Жук, «Измерение расхода с использованием осредняющих напорных трубок», *Энергетика и ТЭК*, № 2, 2010.

45. ETS, «Основные принципы измерения расхода газа с помощью осредняющей напорной трубки», [Электронный ресурс]. 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%20IT AVAR-%D0%B7%D0%BE%D0%BD%D0%B4.pdf.

46. ПРАМЕНЬ, «Струйные расходомеры», [Электронный ресурс]. Доступно: <http://ru-auto.info/post/101488904990008/>.

47. ПРАМЕНЬ, «Струйные расходомеры», [Электронный ресурс]. Доступно: <http://megapaskal.ru/pribory/rashod-pribor/228-i-snova-rashodomery-rashodomery-ionizacionnye.htm><http://ru-auto.info/post/101488904990008/>.

48. OILOTB, «Струйные расходомеры», [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ru-auto.info/post/101488904990008/>.

49. Расходомер.ру, «Струйные расходомеры», [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.td-rashodomer.ru/info/articles/elektromagnitnii_rashodomer.htm.

50. А. М. Деревягин, А. С. Фомин, В. В. Козлов, «Новый способ измерения расхода природного газа ультразвуковым методом», *Газпром*, Москва, Россия, 2008.

51. М. П. Андрієшин, «Вимірювання витрати та кількості газу», *Довідник ІІІ “Сімік”*, Івано-Франківськ, с. 160, 2004.

52. Thompson E, «Fundamentals of multipath ultrasonic flow meters for gas measurement», *Sick Maihak Inc.*, Huston, USA, 2008.

53. Взлет.ру, «От однолучевых ультразвуковых расходомеров к многолучевым: критерий выбора», [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.vzljot.ru/files/publications/odnoluch-ultrasonic.pdf><http://ru-auto.info/post/101488904990008/>.

54. P. Chattopadhyay, «Flowmeters & Flow Measurement», New Delhi, № 2, с. 76, 2006.

55. Электротехинфо, «Ультразвуковые расходомеры. Устройство, принцип действия, типы и виды ультразвуковых расходомеров», [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.eti.su/articles/izmeritelnaya-tehnika/izmeritelnaya-tehnika_529.html.

56. YOKOGAWA, «Измерения расхода с помощью кориолисовых расходомеров в случае двух фазного потока», [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.kip-pribor.com.ua/files/yokogawa/files/docs/doc_502.pdf.

57. ЕСТЕСТВОЗНАНИЕ И МАТЕМАТИКА, «Сила Кориолиса в общем курсе физики», [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.pskgu.ru/projects/pgu/storage/wt/wt141/wt141_02.pdf.

58. Autoworks, «Измерение массового расхода. Кориолисовый расходомер», [Электронный ресурс]. Режим доступа:

<http://autoworks.com.ua/teoreticheskie-svedeniya/izmerenie-massovogo-rasxoda-koriolisovyj-rasxodomer/>.

59. J. Lansing, «Principles of operation for ultrasonic gas flow meters», *American school of gas measurement technology*, USA, 2003.

60. R. C. Baker, «Flow measurement handbook: industrial designs, operating principles, performance and applications,» *Cambridge university press*, New York, 2000.

61. M. Rychagov, S. Tereshchenko, B. Deanand and L. Lynnworth, «Multipath Flowrate Measurements of Symmetric and Asymmetric Flows?» *1st World Congress on Industrial Process Tomography*, Buxton, 1999.

62. Honeywell Process Solutions, «Ultrasonic Flowmeter USM-GT-400,» *leaflet*, 2014.

63. Асунг.ру, «Рекомендации по подбору и применению ультразвукового счетчика газа Flowsic 600,» [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.asu-ng.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=75%3A-flowsic-600&catid=43%3Aflowsic-600&Itemid=108.

64. Sick.in.ua, «FLOWSIC600 2PLEX,» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://sick.in.ua/produksiya/rashodometry-gaza-dlya-promyshlennyh-izmerenij/dlya-transportirovki-gaza-i-promyshlennyh-izmerenij-s-povyshennoj-tochnostyu/flowsic600-2plex-2/#2>.

65. Sick.in.ua, «FLOWSIC600 QUATRO,» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://sick.in.ua/flowsic600-quatro>.

66. Energo.kh.ua, «Ультразвуковые счетчики газа ГУВР-011,» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://energo.kh.ua/rusvs/Produkcija/GUVR-011>.

67. Statusgas.com, «Q.Sonic®plus,» [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.statusgas.com/DS_QSonicplus_EN.pdf.

68. Sovlad.com.ua, «Счётчик газа ультразвуковой «Курс-01,» [Электронный ресурс]. *Руководство по эксплуатации*, Режим доступа: http://sovlad.com.ua/files/curs-01_manual_2009.pdf.

69. RMA Mess-und Regeltechnik GmbH & Co. KG, «Ultrasonic gas meter ECOSONIC X12,» *Інструкція з експлуатації*, 2012.

70. Honeywell Process Solutions, «Ultrasonic flow meter USZ-08,» *Інструкція з експлуатації*, 2010.

71. Elster Instromet, «Q. Sonic Ultrasonic gas flow meters,» *Інструкція з експлуатації*, 2009.

72. SICK MAIHAK GmbH, «FLOWSIC Volume Flow and Gas Flow Measuring Devices,» *Інструкція з експлуатації*, 2008.

73. Sick.in.ua, «FLOWSIC500 CIS Ультразвуковой счетчик газа,» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://sick.in.ua/wp-content/uploads/2015/07/FLOWSIC500-CIS.pdf>.

74. И. В. Лазарев, «Метод синтеза структур адаптивных измерителей временных параметров импульсов сложной формы по критерию «Эффективность – интегрированные затраты» в условиях параметрической априорной неопределенности,» *Вестник Воронежского института МВД России*, № 1, с. 144–148, 2010.

75. Е. П. Осадчий, «Проектирование датчиков для измерения механических величин,» *Машиностроение*, с. 480, Росія, 1979.

76. E. J. Thompson, «Two beam ultrasonic flow measurement,» *Ph. D. Thesis*, University of London, 1978.

77. Krohne, «Fundamentals of Ultrasonic flow measurement,» *Інструкція з експлуатації*, 2001.

78. R. E. Fischbacker, «The ultrasonic flow meter,» *Trans. Soc. Inst. Tech.*, № 11(114), 1959.

79. Е. А. Воробьев, «Теория ультразвуковых колебаний как основа построения и применения технических средств получения информации,» *Учебное пособие*, с. 54, 2002.

80. В. Т. Грінченко, І. В. Вовк і В. Т. Маципура, «Основи акустики,» *Наукова думка*, с. 640, 2007.

81. ГОСТ 30319.2-2015, «Газ природный. Методы расчета физических свойств. Вычисление физических свойств на основе данных о плотности при стандартных условиях и содержании азота и диоксида углерода,» *Издательство стандартов*, Москва, с. 72, 1997.

82. Д. И. Блохинцев, «Акустика неоднородной движущейся среды,» *Издательство Москва*, № 2, 1981.

83. Л. А. Чернов, «Акустика движущейся среды,» *Обзор, Акустический журнал*, № 4(4), с. 299–306, 1958.

84. В. И. Татарский, «Распространение волн в турбулентной атмосфере,» *Аэроакустика*, Москва, 1981.

85. H. Tijdeman, «On the propagation of sound waves in cylindrical tubes,» *Journal of Sound and Vibration*, № 39(1), с. 1–33, 1975, doi:10.1016/S0022-460X(75)80206-9.

86. O. J. Bjerring and T. M. Sand, «Non-invasive measurement of pressure gradients in pulsatile flow using ultrasound,» *IEEE International Ultrasonics Symposium*, с. 2022–2025, 2013. doi: 10.1117/12.2006732.

87. T. Gudra and L. Palasz, «Ultrasonic transducers with directional converters of vibration of longitudinal-longitudinal type and longitudinal-longitudinal-longitudinal type intended to work in gaseous media,» *The Journal of the Acoustical Society of America*, № 133(5), с. 3600, 2013, doi: 10.1121/1.4806670.

88. И. И. Крюков, «О размере ближней зоны плоских ультразвуковых преобразователей, находящихся на одной оси,» *Акустический журнал*, № 1(44), с. 101–105, 1995.

89. S. Mensah and E. Franceschini, «Near-field ultrasound tomography,» *The Journal of the Acoustical Society of America*, № 121(3), с. 1423–1433, 2007.

90. H.-M. Zhu and Q.-H. Qin, «Statistics of ultrasonic speckles reflected from a rough surface,» *Archive of Applied Mechanics*, № 72(2), с. 189–198, doi: 10.1007/s00419-002-0205-1.

91. E. Blomme and O. Leroy, «Plane-wave analysis of the near field of light diffracted by ultrasound,» *The Journal of the Acoustical Society of America*, № 91(3), с. 1474–1483, 1992.

92. Y. Takeda, «Ultrasonic Doppler velocity profile for fluid flow,» *Springer Japan*, 2012.

93. E. Iervolino, M. Ricciob, A.W. van Herwaarden, A. Iraceb, G. Bregliob, W. van der Vlistcand and P. M. Sarroc, «Temperature dependence of the resonance frequency of thermogravimetric devices,» *Procedia Engineering*, № 5, с. 948–951, 2010, doi: 10.1016/j.proeng.2010.09.265.

94. A. A. Kofi and A. C. Makinwa, «MOS Temperature-to-Frequency Converter With an Inaccuracy of Less Than 0.5 C From 40 C to 105 C,» *IEEE JOURNAL OF SOLID-STATE CIRCUITS*, № 41(12), 2006.

95. J. L. Murgatroyd and J. D. Holder, «A Multipoint Temperature-to-Frequency Transducer,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation*, № 26(1), с. 27–29, 1979, doi: 10.1109/TIECI.1979.351602.

96. SignalProcessing. [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.signal-processing.com/us_field.html.

97. Й. Й. Білинський і М. В. Гладішевський, «Ультразвуковий метод вимірювання швидкості плинних середовищ,» на *Всеукраїнському семінар-наradі. Облік природного газу та метрологія*, Рівне, 2015, с. 13–14.

98. Й. Й. Білинський, М. В. Гладішевський і О. С. Городецька, «Ультразвуковий спосіб вимірювання витрат рідких і/або газоподібних середовищ,» *98518 МПК G0FB 1/00 № U201413183*, Квіт. 27, 2015.

99. Й. Й. Білинський, М. В. Гладішевський і О. С. Городецька, «Ультразвуковий витратомір,» *99227 МПК G0FB 1/00 № U201413183*, Трав. 25, 2015.

100. Й. Й. Білинський, М. В. Гладішевський, О. С. Городецька і Я. В. Яхимович, «Ультразвуковий спосіб вимірювання витрат рідких і/або газоподібних середовищ,» *Патент України G01F 1/66 № U201706593*, 11.12.2017.

101. H.Wang, Y.Zhu, J.Chen, «A design method of decoupling IMC controller for multi-variable system based on Butterworth filter,» *American*

Control Conference, с. 5714–5721, 2017, doi: 10.23919/ACC.2017.7963845.

102. Расчет аналогового нормированного фильтра нижних частот Баттерворта [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://dsplib.ru/content/filters/butterex/butterex.html>.

103. Analog devices, «AD8055/AD8056 Datasheet,» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.darasheetcatalog.com>.

104. G. Paul and I. Huray, «Appendix A: Measurement Errors in Maxwell's Equations,» *Wiley-IEEE Press*, № 1, с. 275, 2010, doi: 10.1002/9780470549919.app1.

105. J. Vincent, «Measurements and Uncertainty,» *Wiley Telecom*, с. 584, 2016, doi: 10.1002/9781119011897.ch11.

106. Ю. Ф. Павленко, «Дослідження методу вимірювання девіації частоти частотно модульованого сигналу з використанням електронно-лічильного частотоміру,» *Вісник НТУ «ХПИ»*, № 42(948), с. 4, 2012.

107. F. Akasheh, T. Myers, J. Fraser, S. Bose and A. Bandyopadhyay, «Development of piezoelectric micromachined ultrasonic transducers,» *Sensors and Actuators*, № 111(2–3), с. 275–287, 2004, doi: 10.1016/j.sna.2003.11.022.

108. C. Keng, «Chapter 11 – Error Amplifiers, In Switch-Mode Power Converters,» *Academic Press*, с. 237–248, 2006, doi: 10.1016/B978-012088795-8/50011-8.

109. A. Grami, «Chapter 5 - Analog-to-Digital Conversion, In Introduction to Digital Communications,» *Academic Press*, с. 217–264, 2016, doi: 10.1016/B978-0-12-407682-2.00005-3.

110. F. Heijden, M. Korsten and W. Olthius, «Chapter 6 – Analogue to Digital and Digital to Analogue Conversion,» *Measurement Science for Engineers*, с. 141–161, 2004, doi: 10.1016/B978-190399658-4/50007-1.

111. J. Smith, «Chapter 11 – Analog-to-Digital Conversion, In Embedded Technology,» *Newness Programming the PIC Microcontroller with MBASIC*, с. 211–230, 2005, doi: 10.1016/B978-075067946-6/50013-4.

112. Rosemount™, «3144P Temperature Transmitter,» *Product Data Sheet*, № RB, 2017.

113. Rosemount™, «2088 Absolute and Gage Pressure Transmitter,» *Product Data Sheet*, № PD, 2016.

114. Z. Fang, L. Hu, L. Qin, K. Mao, W. Chen and X. Fu, «Estimation of ultrasonic signal onset for flow measurement,» *Flow Measurement and Instrumentation*, № 55, с. 1–12, 2017, doi:10.1016/j.flowmeasinst.2017.04.002.

115. H. Zhou, T. Ji, R. Wang, X. Ge, X. Tang and S. Tang, «Multipath ultrasonic gas flow-meter based on multiple reference waves,» *Ultrasonics*, № 82, с. 145-152, 2018, doi: 10.1016/j.ultras.2017.07.010.

116. P. LaNasa and E. Loy Upp, «7 – Flow,» *Fluid Flow Measurement*, № 3, с. 107–116, 2014, doi: 10.1016/B978-0-12-409524-3.00007-1.

117. S. Mokhatab, W. Poe and J. Mak, «Chapter 1 – Natural Gas Fundamentals,» *Handbook of Natural Gas Transmission and Processing*, Gulf Professional Publishing, № 3, с. 1–36, 2015, doi: 10.1016/B978-0-12-801499-8.00001-8.

118. ДСТУ ГОСТ 8.586.1-5:2009 (ИСО 5167-1-5:2003), «Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини й газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв,» *Державний стандарт України*, 2009.

119. A. Morris and R. Langari, «Chapter 4 – Statistical Analysis of Measurements Subject to Random Errors», *Measurement and Instrumentation*, Academic Press, № 2, с. 75-130, 2016, doi: 10.1016/B978-0-12-800884-3.00004-6.

120. S. Narasimhan and C. Jordache, «2 – Measurement Errors and Error Reduction Techniques,» *Data Reconciliation and Gross Error Detection*, Gulf Professional Publishing, с. 32–58, 1999, doi: 10.1016/B978-0-88415255-2/50003-3.

121. R. Acharya, «Chapter 7 – Errors and Error Corrections,» *In Understanding Satellite Navigation*, Academic Press, с. 243-279, 2014, ISBN 9780127999494, doi: 10.1016/B978-0-12-799949-4.00007-5.

122. M. Parker, «Chapter 3 - Sampling, Aliasing, and Quantization, In Digital Signal Processing 101,» *Newness*, № 2, с. 21–30, 2017, doi: 10.1016/B978-0-12-811453-7.00003-2.

123. L. Tan and J. Jiang, «Chapter 2 - Signal Sampling and Quantization,» *Digital Signal Processing*, Academic Press, № 2, с. 15–16, 2013, doi: 10.1016/B978-0-12-415893-1.00002-0.

124. P. West, «A guide to the flowmeter maze», *World Pumps*, № 2001(420), с. 48–54, 2001, doi: 10.1016/S0262-1762(01)80364-3.

125. M. Dell'Isola, M. Cannizzo and M. Diritti, «Measurement of high-pressure natural gas flow using ultrasonic flowmeters,» *Measurement*, № 20(2), с. 75–89, 1997, doi: 10.1016/S0263-2241(97)00016-X.

126. F. Cascetta, «Application of a portable clamp-on ultrasonic flowmeter in the water industry,» *Flow Measurement and Instrumentation*, № 5(3), с. 191–194, 1994, doi: 10.1016/0955-5986(94)90019-1.

127. Q. Chen, W. Li and J. Wu, «Realization of a multipath ultrasonic gas flowmeter based on transit-time technique,» *Ultrasonics*, № 54(1), с. 285–290, 2014, doi: 10.1016/j.ultras.2013.06.001.

128. V. Button, «Chapter 7 – Flow Transducers,» *Principles of Measurement and Transduction of Biomedical Variables*, Academic Press, с. 271–323, 2015, doi: 10.1016/B978-0-12-800774-7.00007-6.

129. А. Г. Сергеев, М. В. Латышев и В. В. Терегеря, *Метрология, стандартизация, сертификация*. Москва, Россия: Юрайт, 345 с., 2011.
130. В. В. Онушко, Д. Р. Піталов і І. В. Щупак, «Особенности поверки вимірювальних комплексів «Суперфлоу» на прикордонних ГВС,» на *VI Всеукр. наук.-техн. конф. Вимірювання витрат та кількості газу*, Івано-Франківськ, 2009, с. 41.
131. О. Н. Партала, «Цифровая электроника,» *Наука и техника*, с. 208, 2000.
132. Государственная система обеспечения единства измерений, «Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений относительной влажности газов: ГОСТ 8.547-86», *Госстандарт СССР, Издательство стандартов*, с. 8, 1986.
133. Б. Б. Дунаев, *Точность измерений при контроле качества*. Київ: Техніка, 1981.
134. Е. Т. Володарский и И. П. Москаленко, «Уменьшение влияния погрешности измерительного канала на достоверность контроля,» *Измерения – 98*, с. 266–267, 1998.
135. Б. Г. Федорков, *Микросхемы ЦАП и АЦП: функционирование, параметры, применение*. Москва: Энергоатомиздат, 1990.
136. Е. С. Венцель и Л. А. Овчаров, *Теория случайных процессов и ее инженерные приложения*. Москва: Наука, 1991.
137. В. Н. Лавренчик, *Постановка физического эксперимента и статистическая обработка его результатов*. Москва: Энергоатомиздат, 1986.
138. Д. А. Браславский и В. В. Петров, *Точность измерительных устройств*. Москва: Машиностроение, 1976.
139. А. Е. Егоров, Г. Н. Азаров и А. В. Коваль, *Исследование устройств и систем автоматического планирования эксперимента*. Київ: Вища школа, 1986.
140. Х. Шенк, *Теория инженерного эксперимента*. Москва: Мир, 1972.
141. В. В. Онушко, А. М. Власюк і В. М. Ярошевич, «Комплекс вимірювальний роторний КВР-1,» на *X Між нар. наук.-техн. конф.*, с. 223–224, Київ, 2011.
142. В. П. Максимов, И. В. Егоров и В. А. Карасев, *Измерение, обработка и анализ быстротекающих процессов*. Москва: Машиностроение, 1987.

Наукове видання

**Білінський Йосип Йосипович
Гладишевський Микола Володимирович
Огородник Костянтин Володимирович**

**МЕТОД І УЛЬТРАЗВУКОВИЙ ЗАСІБ
ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ВИТРАТ
ПЛИННИХ СЕРЕДОВИЩ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено К. Огородником

Підписано до друку 18.04.2019 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 7,16.
Наклад 300 (1-й запуск 1–75) пр. Зам № В2019-11

Вінницький національний технічний університет,
ІРВЦ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 65-18-06.

press.vntu.edu.ua; *email*: kivc.vntu@gmail.com.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано ФОП Барановська Т. П.
21021, м. Вінниця, вул. Порики, 7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 4377 від 31.07.2012 р.