Міністерство економічного розвитку і торгівлі України

Національний науковий центр «Інститут метрології»

СТЕЦЕНКО АНДРІЙ АНАТОЛІЙОВИЧ

УДК 681.121:006.91

УДОСКОНАЛЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО МЕТОДУ І ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ ТЕКУЧОГО СЕРЕДОВИЩА У ЗАКРИТИХ КАНАЛАХ

05.01.02 – стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному університеті радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Руженцев Ігор Вікторович,
Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри метрології та вимірювальної техніки, м. Харків.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Середюк Орест Євгенович,
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, професор кафедри методів та приладів контролю якості і сертифікації продукції, м. Івано-Франківськ;

кандидат технічних наук,
Борисенко Євген Анатолійович,
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем, м. Харків.

Захист відбудеться «02» липня 2015 року о $15^{\underline{00}}$ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.827.01 у Національному науковому центрі «Інститут метрології» за адресою 61002, м. Харків, вул. Мироносицька, 42.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного наукового центру «Інститут метрології».

Автореферат розісланий «29» травня 2015 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 64.827.01

к.т.н., с.н.с. В.В. Скляров

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Ситуація, що складається в Україні і світі з забезпеченням паливно-енергетичними ресурсами, потребує суворого державного контролю за їх використанням в усіх сферах господарства. Існуючі завдання та функції державного управління енергозбереженням реалізуються в рамках Національної енергетичної програми і передбачають:

- удосконалення обліку, контролю за витратами енергоресурсів та створення автоматизованих систем управління їх транспортуванням та споживанням у галузях господарства незалежно від адміністративної підпорядкованості та форм власності;
- скорочення втрат енергоресурсів на підприємствах побутової сфери, комунального господарства та житловому секторі.

Щорічно на житлові, комунальні та побутові потреби населення України витрачається п’ята частина паливних ресурсів та електроенергії і третина теплової енергії, які використовуються в національній економіці, тобто, за обсягами енергоспоживання ця галузь займає третє місце після енергетики та чорної металургії.

Закордонний досвід реалізації політики енергозбереження свідчить про комплексне впровадження енергозберігаючих заходів, зокрема, оснащення всіх енергоспоживачів пристроями вимірювання, обліку та регулювання, а також впровадження оплати вартості енергоносіїв, яка відповідає реальним витратам. Така стратегія суттєво впливає на скорочення споживання палива, енергії та інших ресурсів в економіці та невиробничій сфері.

Все це визначає важність удосконалення обліку, контролю за витратами енергоресурсів та створення автоматизованих систем управління їх транспортуванням та споживанням.

За кордоном серійні прилади для вимірювання витрати текучого середовища (рідин, газів і пари) виробляють, наприклад, фірми KROHNE (Німеччина), CONTRLONRON, PANAMETRICS (США) та інші. Такі прилади у відповідності з Законом «Про забезпечення єдності вимірювань» мають пройти процедуру сертифікації і внесення до Державного реєстру ЗВТ, що збільшує їх і так велику вартість. До того ж, методи випробувань цих приладів достатньо складні і потребують використання додаткового обладнання. В свою чергу, номенклатура вітчизняних ЗВТ з подібними до закордонних ЗВТ метрологічними характеристиками, дуже обмежена, що обумовлює необхідність створення сучасних вітчизняних витратомірів та засобів обліку текучого середовища (ТС), вибір найбільш перспективного методу вимірювання витрати ТС, його удосконалення і розробки на базі удосконаленого методу витратоміра, що відповідає сучасним вимогам. У зв’язку з цим робота, спрямована на розробку національних ЗВТ, метрологічні характеристики яких відповідають закордонним, є, безумовно, своєчасною.

З усіх відомих методів вимірювання витрат детально вивчені, відпрацьовані і доведені до стандартизованих у повному обсязі тільки метод змінного перепаду тиску і, частково, методи вимірювань за швидкістю в одній точці перерізу труби та «площа–швидкість». Для інших методів доведені до відносної досконалості вимірювальні перетворювачі (ВП), оцінені їх метрологічні характеристики, в той час як методи оброблення і подання результатів вимірювань глибоко не аналізувалися. Це

стосується навіть тих методів вимірювання витрат, що відносять до перспективних: електромагнітного, термоанемометричного, ультразвукового. Разом з цим, тенденції розвитку витратовимірювальної техніки останніх років дозволяють вважати останній зі згаданих методів одним із кращих завдяки, зокрема, можливості безконтактного вимірювання будь-яких речовин, надійності приймально-передавальних елементів, зумовленою відсутністю рухомих частин, і теоретично необмеженому діапазону вимірювань.

Удосконаленню саме ультразвукового методу та створенню на його основі сучасних ЗВТ витрати текучого середовища і, в першу чергу, паливно-енергетичних ресурсів, з метрологічними характеристиками на рівні найкращих закордонних витратомірів й присвячена робота А.А. Стеценка і тому вона є актуальною

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася на кафедрі метрології та вимірювальної техніки Харківського національного університету радіоелектроніки в рамках проведення науково-дослідної роботи «Розробка метрологічного забезпечення ультразвукових газових лічильників», яка є складовою частиною держбюджетної теми М6107 «Підвищення точності вимірювальних перетворювачів засобами вбудованого тестового контролю» (ГР N0109U002421, IHB0212U902268), де здобувач був виконавцем окремих етапів робіт.

Мета та завдання дисертаційної роботи. Метою дисертаційної роботи є підвищення якості обліку енергетичних ресурсів і води шляхом удосконалення ультразвукового методу вимірювання витрат текучих (плинних) середовищ і створення на його основі витратомірів з високими метрологічними характеристиками в умовах спотвореної структури потоку. У відповідності до мети були поставлені і вирішені наступні завдання:

1. Проаналізувати відомі методи і засоби вимірювання та обліку витрати ТС, сформулювати вимоги, які ставляться до сучасних системи автоматизованого обліку.

2. Удосконалити ультразвуковий метод вимірювання витрати ТС.

3. Розробити ультразвукові витратоміри на базі удосконаленого ультразвукового методу і нормувати їх метрологічні характеристики.

4. Удосконалити метрологічне забезпечення розроблених ультразвукових витратомірів ТС.

Об'єктом дослідження є процес вимірювань витрати ТС в закритих каналах.

Предметом дослідження є методи і засоби вимірювання витрати ТС при технологічному та комерційному його обліку.

Методи дослідження визначаються сукупністю вирішуваних завдань і включають: методи нечіткої математики, що використані при удосконаленні ультразвукового методу вимірювання витрат; методи натурного експерименту, теорії імовірностей, вимірювання, математичної статистики, які використані при удосконаленні науково-технічної бази системи вимірювання та обліку витрати ТС, метрологічних випробуваннях розроблених витратомірів і оцінюванні їх метрологічних характеристик.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше розроблена та апробована методологія калібрування (повірок) ультразвукових витратомірів газу, зокрема ГУВР–011, яка дає змогу шляхом комплексного використання експериментальних і імітаційних результатів дослідження підняти верхню границю вимірювань при збереженні їх високої точності.

2. Вперше розроблено метод оцінювання точності ультразвукових витратомі-

рів в умовах спотвореної структури потоку та наявності різного роду місцевих опорів шляхом використання удосконаленого CFD – моделювання та експериментальних даних реального УЗВ.

3. Удосконалено функцію перетворення часово–імпульсного ультразвукового вимірювального перетворювача швидкості ТС, який, на відміну від відомих, використовує багаторазове відбиття сигналу для подовження шляху проходження сигналу через вимірювальне середовище та однотипні канали з метою усереднення їх результатів, що дозволило підвищити чутливість та зменшити основну похибку вимірювання.

4. Отримав подальший розвиток метод обробки результатів вимірювань доплерівського ультразвукового витратоміра, який, на відміну від відомих, використовує нечітку математику для оцінювання «центра тяжіння» спектра відбитого сигналу, що забезпечує використання декількох варіантів вторинної обробки результатів вимірювання з високою точністю.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що:

- вперше розроблено, апробовано та впроваджено в експлуатацію ультразвукові витратоміри, які реалізують як багатократне відбиття акустичного сигналу, так і використання двох і більше однотипних каналів, що дозволяє вимірювати витрати рідини у широкому діапазоні з нормованою точністю;

- вперше розроблено методику визначення коефіцієнтів корекції моделі ультразвукового витратоміру від числа Рейнольдса в умовах спотвореної структури потоку на основі удосконаленого CFD- моделювання та експериментальних даних реального витратоміру.

- розроблено, проведено державні приймальні випробування із внесенням до Державного реєстру засобів вимірювальної техніки та налагоджене серійне виробництво ультразвукових лічильників газу ГУВР-011 і ультразвукових витратомірів-лічильників рідини УВР-011 на підприємствах ПрАТ «Тахіон», ПрАТ «Енергооблік».

Дані витратоміри впроваджені на підприємствах енергетичної, хімічної та нафто-газової промисловості як в Україні, так і за її межами.

Отримані в роботі наукові результати впроваджені в навчальний процес кафедри метрології та вимірювальної техніки Харківського національного університету радіоелектроніки.

Особистий внесок здобувача. Наукові та прикладні результати, викладені в дисертаційній роботі, отримані здобувачем самостійно. В наукових працях (статтях), написаних в співавторстві, дисертанту належить наступне: в [16] розглянуто питання можливості удосконалення науково-технічної бази системи вимірювання та обліку витрат ТС з використанням сучасних інформаційних технологій; в [17] розглянуті проблеми метрологічного забезпечення та нормативної бази з обліку газів, нафти та нафтопродуктів, проведено аналіз шляхів їх вирішення; в [18] за критерієм нормованого показника метрологічної надійності – імовірності роботи протягом міжповірочного інтервалу без метрологічних відказів – було запропоновано можливість збільшення міжповірочного інтервалу витратомірів-лічильників; в [19] удосконалена система вимірювання та обліку витрат речовини на базі ультразвукового доплеровського методу із застосуванням сучасних інформаційних технологій; в [20] розглянуто питання можливості побудови системи вимірювання та обліку витрати речовини на базі ультразвукового часово-імпульсного методу з використанням сучасних технологій, що практично реалізована на базі витратоміру-лічильника УВР-011; в

[21] проведено порівняльний аналіз різних методів повірки лічильників газу: методу за критерієм максимально допустимої похибки та методу розрахунку невизначеності вимірювань; в [22] вирішена задача оптимізації багатоканальної системи зондування потоку речовини ультразвукових витратомірів, що забезпечує зменшення їх сумарної похибки; в [23] розроблено методику дослідження похибки ультразвукових витратомірів, викликаної спотворенням структури потоку місцевими опорами.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати досліджень по темі дисертації доповідалися та обговорювалися більш ніж на 50 міжнародних та національних науково-технічних і науково-практичних конференціях, зокрема:

- III Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми обліку теплоти та води в Україні», Київ, 2002 р.;
- XII Міжнародній науково-практичній конференції «Совершенствование измерений расхода жидкости, газа и пара» (Санкт-Петербург, Росія, 2002 р.);
- на III – VIII Науково-технічних конференціях «Витратометрія» (м. Івано-Франківськ, 2003-2013 рр.);
- Міжнародній науково-практичній конференції «Измерение. Качество. Безопасность», Єкатеринбург, 2012 р.;
- на V – IX Міжнародних науково-технічних конференціях «Метрологія та вимірювальна техніка» (м. Харків, 2006-2014 рр.);
- на I – III Всеросійських науково-практичних конференціях «Актуальные вопросы метрологического обеспечения учета жидкостей и газов». (ВНИИР, Казань, 2010-2014 гг.);
- Міжнародній науково-практичній конференції «FORGAZ-2014», Польща, 2014 р.

Публікації. За результатами дисертаційних досліджень опубліковано 65 статей, в тому числі 8 у наукових виданнях та збірниках наукових праць, які входять до переліку фахових видань України, 7 з них – у наукових виданнях, що включені до Міжнародної наукометричної бази даних, 1 в закордонному журналі. За тематикою дисертаційної роботи отримано 3 патенти.

Структура роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та сими додатків. Загальний обсяг дисертації складає 171 сторінка. Робота містить 144 сторінок основного тексту, у тому числі 56 рисунка, 7 таблиць (із них 1 таблиця займає окрему сторінку), список використаних джерел із 126 найменувань на 13 сторінках, 8 додатків на 13 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та основні завдання дослідження, показано зв’язок дисертації з науковими програмами та планами, визначено об’єкт та предмет дослідження, наукову новизну, практичне значення та особистий внесок здобувача в одержані результати, подано відомості про їх апробацію та впровадження.

У першому розділі проведено аналіз існуючих методів і засобів вимірювання витрати ТС, діючих нормативних документів та науково-технічної літератури, що їх стосується. Аналіз публікацій з питань витратометрії у літературних джерелах вітчизняних і закордонних періодичних виданнях та мережі Інтернет дало змогу навес-

ти відсоткове розподілення оприлюднених матеріалів, присвячених найбільш розповсюдженим типам витратомірів (рис. 1).

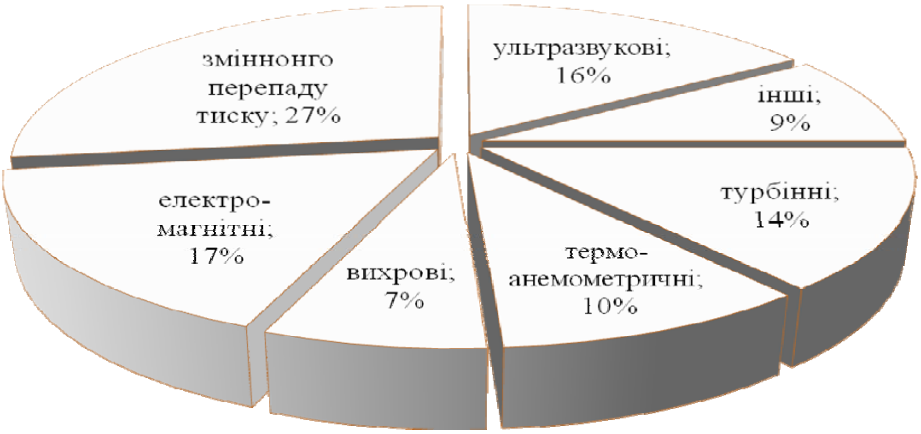

Рисунок 1 – Розподілення кількості публікацій, присвячених основним типам витратомірів

Серед проаналізованих методів вимірювання витрати ТС у закритих каналах можна виділити, як найбільш перспективний ультразвуковий метод. Його основними перевагами є те, що створювані на його основі ультразвукові витратоміри (УЗВ) забезпечують можливість вимірювання будь-яких ТС, мають теоретично необмежений діапазон вимірювань, високу надійність, стабільність метрологічних і експлуатаційних характеристик. У той же час показано що, існує перспектива покращання метрологічних характеристик УЗВ і, зокрема, основної похибки вимірювання. Це зумовило низку завдань дисертаційного дослідження:

1. Удосконалити одноканальний і багатоканальний часово-імпульсний ультразвуковий метод вимірювання витрати ТС на базі удосконалених їх математичних моделей, що дозволить зменшити похибку вимірювання різниці часу розповсюдження сигналів вздовж і проти потоку і забезпечити потенційну точність вимірювання за рахунок підвищення точності вимірювання довжини шляху поширення акустичних сигналів та їх багатоканальної обробки.

2 Удосконалити ультразвуковий метод, який використовує ефект Допплера для вимірювання витрати ТС, що забезпечить реалізацію декількох варіантів обробки для вимірювального блоку витратоміра.

3. Розробити та провести експериментальні дослідження витратомірів, що реалізують удосконалений ультразвуковий метод вимірювання витрати ТС.

4. Розробити методологію дослідження похибки ультразвукових витратомірів в умовах спотвореної структури потоку.

5. Розробити метод калібрування ультразвукових витратомірів в діапазоні витрат, що перевищує верхню границю існуючих витратовимірювальних установок.

В другому розділі приведено результати досліджень, направлених на удосконалення витратомірів, створених на основі ультразвукового методу.

У розділі розглянуті існуючі часово-імпульсні та доплерівські витратоміри, побудовані на базі ультразвукового методу, що можуть бути реалізованими у вигля-

ді структури, поданої на рис. 2. Структуру витратоміра подано як сукупність первинного перетворювача (ПП), вимірювального блоку (ВБ) та відлікового пристрою (ВП). Функції ВБ і ВП можуть бути об'єднані у структурі обчислювального пристрою (ОП).

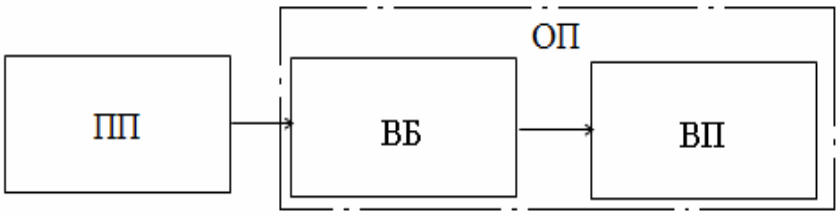

Рисунок 2 – Структурна схема витратоміра

При цьому вважається, що передавальні і приймальні або приймально-передавальні перетворювачі електроакустичні (ПЕА) розміщені під кутом до потоку вимірюваної речовини і утворюють акустичні канали: один, два або декілька.

В результаті проведених досліджень запропоновано до реалізації:

1. Одноканальний ультразвуковий метод вимірювання витрати текучого середовища із діаметральним розміщенням акустичних каналів, математична модель якого має вигляд:

$$Q = \frac{L \cdot S}{2\cos\varphi} \cdot \left(\frac{1}{t_{\uparrow}} - \frac{1}{t_{\downarrow}} \right) = \frac{L \cdot S}{2\cos\varphi} \cdot \left(\frac{\Delta t}{t_{\uparrow} \cdot t_{\downarrow}} \right), \qquad (1)$$

де $t_{\downarrow}$, $t_{\uparrow}$ - час розповсюдження ультразвукової хвилі проти і вздовж напрямку потоку вимірюваного середовища, с; L – довжина акустичного каналу, м; φ - кут нахилу акустичного каналу, град; S – площа трубопроводу, м^2.

Запропоновано метод, який, на відміну від відомих, дозволяє за рахунок багаторазового відбиття сигналу зменшити відносну похибку вимірювання витрати потоку вимірюваного середовища у кількість разів, пропорційну кількості перетинань сигналом перерізу трубопроводу:

$$\Delta Q_n = \frac{\partial Q_n}{\partial \Delta t} = \frac{n \cdot L \cdot S}{2\cos\varphi} \cdot \frac{1}{n^2 \cdot t_{\uparrow} \cdot t_{\downarrow}} = \frac{\Delta Q}{n}, \qquad (2)$$

де Δt - різниця часів розповсюдження сигналів вздовж і проти потоку, с; n - кількість відбиттів.

2. Одноканальний ультразвуковий метод вимірювання витрати текучого середовища, який, на відміну від відомих, передбачає хордове розміщення акустичних каналів за дельта–схемою, що дозволяє зменшити відносну похибку вимірювання витрати потоку вимірюваного середовища, аналогічно (2), пропорційно кількості перетинань сигналом перерізу трубопроводу шляхом підвищення точності вимірювання довжини шляху R поширення акустичних сигналів і

$$R = n \cdot L = n \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{D}{4} \cdot \sqrt{3 \cdot ctg^2\alpha - 1}, \qquad (3)$$

де L – відстань вздовж осьової лінії труби між центрами двох відбиваючих областей на внутрішній поверхні трубопроводу або між центром області відбиття і віссю ПЕА, м; D – внутрішній діаметр трубопроводу, м; n – кількість перетинань.

3. Двоканальний ультразвуковий метод вимірювання витрати текучого середовища, який, на відміну від відомих, передбачає обробку результатів вимірювання швидкості потоку вимірюваного середовища і, як результат, зменшення абсолютної похибки визначення часу поширення сигналу вздовж і проти потоку, а значить і витрати (1), приблизно у 1,4 рази.

4. Оптимізований багатоканальний ультразвуковий метод вимірювання витрати текучого середовища, який, на відміну від відомих, передбачає взаємне розташування n акустичних каналів у перерізі трубопроводу відповідно до вибраних апроксимаційних відповідних квадратурних формул, що дозволило врахувати профіль швидкості і забезпечило додаткове зменшення абсолютної похибки визначення часу поширення сигналу вздовж і проти потоку.

5. Удосконалений ультразвуковий доплерівський метод вимірювання витрати текучого середовища, що, на відміну від відомих, передбачає декілька варіантів визначення «центру тяжіння» доплерівського спектру прийнятого сигналу і дозволило підвищити точність вимірювання витрати УЗВ до двох разів.

У третьому розділі дисертаційної роботи розглянуто питання удосконаленого метрологічного забезпечення експериментального дослідження удосконалених витратомірів.

З метою здійснення контролю технічних та метрологічних характеристики витратомірів рідини в режимах вимірювання об’ємної витрати, об’єму та маси, розроблена, виготовлена та досліджена автоматизована повірочна установка (АПУ) АПУ–011/40, зовнішній вигляд якої наведено на рис. 3.

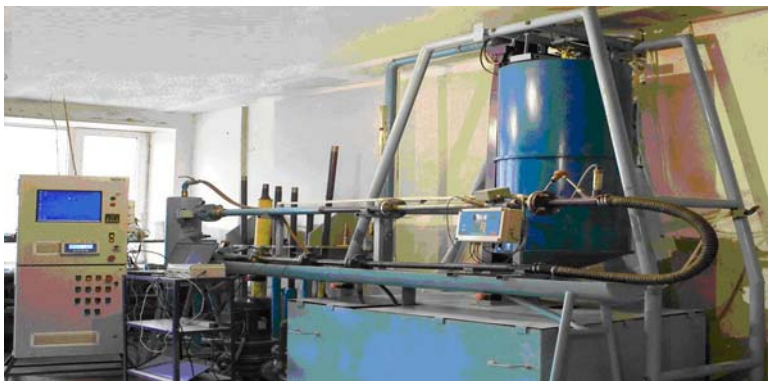

Рисунок 3 – Зовнішній вигляд АПУ–011/40

Рисунок 4 – Зовнішній вигляд АПУ–Г–011/2500

Особливістю установки є те, що використовуються кранові ваги на одному прецизійному силовимірювальному тензодатчику розтягування, що зменшує похибку при вимірюванні маси та об’єму вимірюваної рідини (води).

В результаті атестації ваг, виконаних ННЦ «Інститут метрології» (м. Харків), дискретність їх відліку складає ± 20 г, границі похибки ± 20 г при зважуванні від 0,1 кг до 400 кг включно, і ± 40 г при зважуванні від 400 кг до 500 кг.

На відміну від більшості установок аналогічного призначення, де густину води задають константою, що відповідає дистильованій воді при температурі 20 °С, в

ЕОМ АПУ оператор періодично заносить дані про температуру води, яка безперервно вимірюється електронним термометром. Густину води ЕОМ розраховує, використовуючи відому функціональну її залежність від температури для дистильованої води.

Установка АПУ–011/40 в лютому 2008 року атестована ДП «Харківстандартметрологія». Її характеристики:

- границі відносної похибки визначення маси води шляхом зважування дорівнюють ± 0,06 %;
- границі відносної похибки визначення об'єму води шляхом зважування дорівнюють ± 0,08 %;
- границі відносної похибки визначення об'єму води за показами еталонних витратомірів дорівнюють ± 0,25 %.

На основі результатів, отриманих в роботі, розроблена установка АПУ–Г–011/2500, яка призначена для метрологічних досліджень витратомірів повітря, природного газу, інших газів та їх сумішей. На рис. 4 наведено її зовнішній вигляд.

Робоче середовище установки – повітря. Збудником витрати повітря, потік якого утворюється в трубопровідному тракті установки розрідженням, слугує блок із двох вентиляторів різної потужності. Витрата повітря регулюється як зміненням частоти обертання вентилятора, так і за допомогою діафрагменого затвора.

Установка АПУ-Г-011/2500 в 2009 році атестована ДП «Івано-Франківськстандартметрологія». Її характеристики:

- границі основної відносної похибки вимірювання об'єму газу за показами 4-х еталонних лічильників в її робочих діапазонах не перевищують ± 0,25 %;
- діапазон витрати повітря, відтворюваний установкою – від 0,5 м^3/год до 2500 м^3/год;
- діаметр умовного проходу лічильників, що калібруються (повіряються), DN – від 40 до 200.

В розділі проведено метрологічне дослідження розроблених витратомірів відповідно до існуючих Програм і Методик за допомогою створених автоматизованих повірочних установок АПУ–011/40 і АПУ–Г–011/2500 (ПРАТ «Енергооблік», м. Харків). а також, на еталонних витратомірних установках РОУ–180 (ННЦ «Інститут метрополії»), РОУ–500 (ВНДІАЕН, м. Суми), в умовах експлуатації на нафтопроводі Лисичанськ–Кременчук, (DN 514), на нафтоперекачувальній станції (НПС) «Кременчук» (DN 514), на НПС «Мозир» нафтопроводу «Дружба», у лабораторних умовах на установці Danfoss Carlig (границі похибки вимірювання ± 0,2 %) фірми «Дивайс» (м. Харків),

При метрологічному дослідженні одноканальних часово–імпульсних витратомірів використовувалась секція витратоміра УВР–011, , який реалізує одноканальний ультразвуковий метод вимірювання з діаметральним розміщенням ПЕА у V–спосіб. Дослідження здійснювалося за методикою, розробленою і затвердженою ДП «Харківстандартметрологія», шляхом звірення витрати, виміряної штатним витратоміром «Кор–Мас», атестованим по класу 0,15, з результатами вимірювання УВР-011. Вимірювання проводилися тільки при значеннях витрати 900 м^3/год і 1800 м^3/год. Результати дослідження наведено на рис. 5.

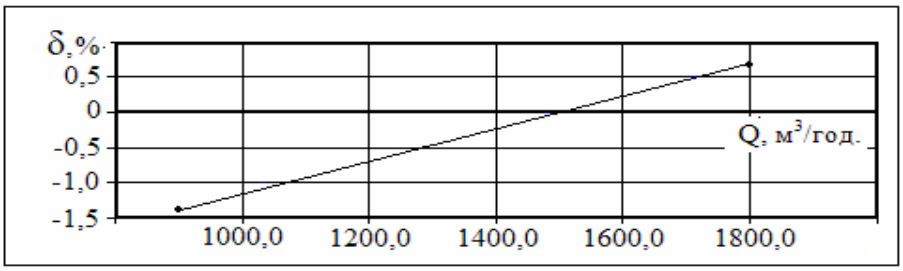

Рисунок 5 – Результати метрологічного дослідження витратоміру УВР–011 (ПЕА розміщені у V–спосіб)

Показано, що значення відносної похибки вимірювання витрати розробленим витратоміром не виходить за границі ± 1,5%.

На рис. 6 наведені результати дослідження витратоміра УВР–011 DN50 із врізаною секцією, який реалізує одноканальний ультразвуковий метод вимірювання з розміщенням ПЕА за дельта–схемою. Дослідження виконувалися на витратовимірювальних установках Danfoss Carlig фірми «Дивайс», м. Харків, і на трубопоршневій установці (границі похибки ±0,06%) нафтопроводу Лисичанськ–Кременчук, м. Кременчук в умовах експлуатації. Похибки вимірювання витрати середовища отримані при збільшені витрати та її наступному зменшені і практично співпадають.

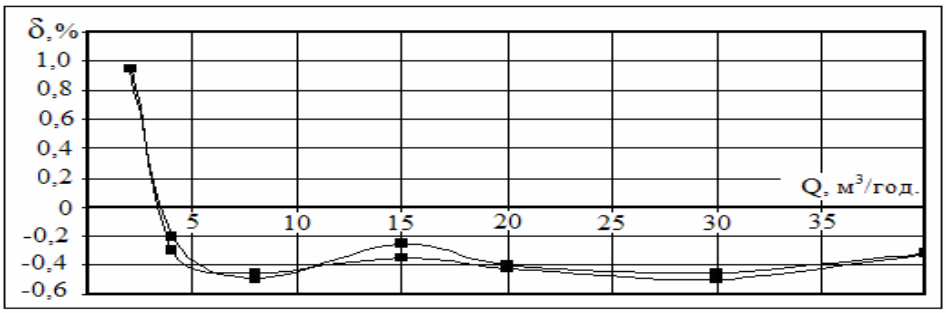

Рисунок 6 – Результати метрологічного дослідження витратоміру УВР–011 (ПЕА розміщені за дельта–схемою)

Встановлено, що значення відносної похибки вимірювання витрати середовища витратоміром УВР–011 не перевищує ± 1,0%.

Виконані метрологічні дослідження двоканальних УВР-011, який реалізує двоканальний ультразвуковий метод вимірювання з діагональним взаємо–перпендикулярним розміщенням ПЕА у V–спосіб. Отримані результати дослідження представлені на рис. 7.

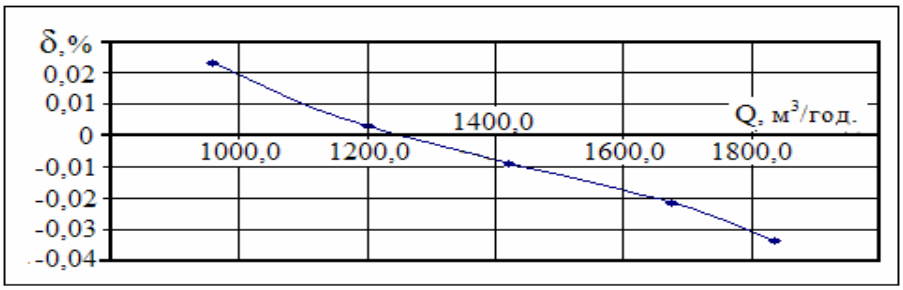

Рисунок 7 – Результати метрологічного дослідження двоканального витратоміру УВР–011 (ПЕА розміщені у V–спосіб)

Дослідження здійснювалося за умов, викладених у попередньому підпункті. Вимірювання проводилися в діапазоні витрати газу 950 м^3/год і 1850 м^3/год.

Показано, що значення відносної похибки вимірювання витрати газу в цому випадку не перевищує ± 0,5 %. У порівнянні з результатами, описаними для одноканальних часово–імпульсних витратомірів (рис.5), де похибка знаходилася в границях ±1,5 %, досягнуто майже трикратне зменшення похибки. Доведено, що це забезпечується зменшенням впливу гідродинамічної складової похибки, зумовленої асиметрією потоку.

В розділі велика увага приділяється метрологічному дослідженню багатоканальних витратомірів з врізаними ПЕА, які реалізують акустичне зондування за п'ятьма паралельними просторовими хордами, розміщеними вздовж перерізу трубопроводу відповідно до значень абсолютних абсцис апроксимацій. Показано, що метрологічні характеристики таких УЗВ в значній мірі визначаються реалізованими розрахунковими формулами, які апроксимують епюри швидкостей вимірюваного потоку вздовж хорд. На рис. 8 наведено залежності значень похибок вимірювань від числа Re, отримані при апроксимації розподілу усереднених швидкостей по перерізу розвиненого турбулентного потоку степеневою формулою:

$$\frac{V(x,y)}{V_{\max}} = \left[1 - \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{0{,}25 \cdot D^2}\right]^{\frac{1}{m}}, \qquad (4)$$

де $m = \frac{1}{\sqrt{\lambda}}$, $\lambda = 0{,}0032 + \frac{0{,}221}{\mathrm{Re}^{0{,}237}}$ – коефіцієнт, що розраховується по формулі Никурадзе

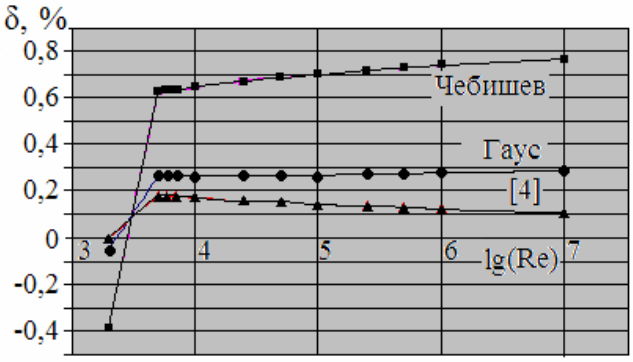

Рисунок 8 – Залежність похибки від числа Рейнольда для апроксимації степеневою формулою

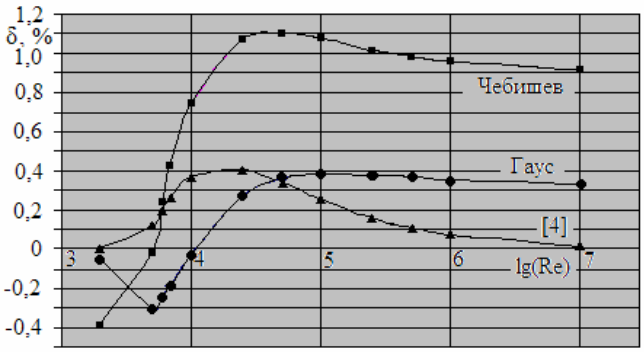

Рисунок 9 – Залежність похибки від числа Рейнольдса для апроксимації уточненою формулою

На рис. 9 наведено аналогічні залежності δ від числа Re, отримані при апроксимації розподілу усереднених швидкостей по перерізу розвиненого турбулентного потоку уточненою формулою:

$$\hat{V}(x,y) = \frac{\lambda}{16} \cdot \frac{\mathrm{Re}}{c} \cdot \left\{ arctg\left[c \cdot (1 - r)\right] - \frac{\ln\left[1 + c^2 \cdot (1 - r^2\right]}{2 \cdot c} \right\}, \qquad (5)$$

де $\hat{V}(x,y) = \dfrac{V(x,y)}{\overline{V}}$ – розподіл відносних усереднених швидкостей по перерізу трубопроводу; $\mathrm{Re} = \dfrac{\overline{V} \cdot D}{\nu}$ – число Рейнольдса; D – діаметр трубопроводу, м; $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ – радіус–вектор точки з координатами $\{x, y\}$, $\overline{V}$ – середня по перетину трубопроводу швидкість потоку, м/с; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості вимірюваного середовища, м^2/с; с –параметр потоку, який визначається із трансцендентного рівняння:

$$\frac{5}{2 \cdot c^2} + \frac{c^2 - 3}{c^3} arctg\,(c) - \frac{3 \cdot c^2 - 1}{2 \cdot c^4} \ln(c^2 + 1) = \frac{16}{\lambda \cdot \mathrm{Re}}, \qquad (6)$$

Отримані результати виконаних досліджень дозволили зробити висновки, що зміна структури потоку (ламінарний або турбулентний) має найменший вплив на покази витратоміра з акустичним зондуванням за п'ятьма паралельними просторовими хордами,та вибрати відповідну апроксимуючу епюру швидкості формулу.

Виконані дослідження розробленого доплерівського витратоміра УДР–011 (DN 100), з накладними ПЕА. Дослідження здійснювалося на АПУ–011/40 за затвердженою методикою, шляхом звірення витрати, виміряної еталонним витратоміром (границі відносної похибки вимірювання ± 0,25 %) з результатами вимірювання досліджуваним витратоміром. Вимірювання проводилися при витраті 2,0 м^3/год, 10,59 м^3/год, 20,0 м^3/год, 29,0 м^3/год і 38,0 м^3/год. Робоча рідина – вода. На рис. 10 наведено результати виконаних досліджень, усереднені за чотирма серіям.

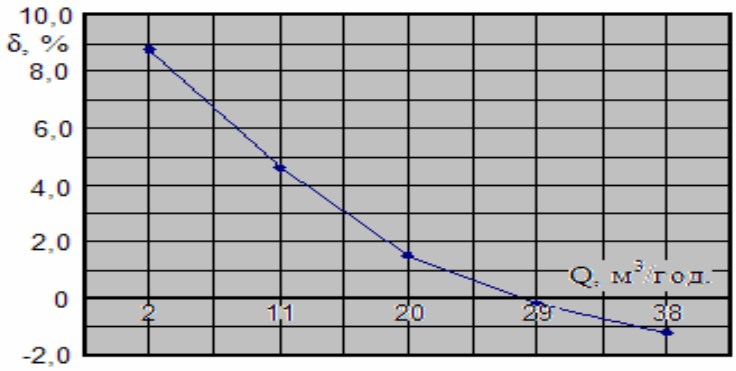

Рисунок 10 – Результати метрологічного дослідження доплерівського витратоміра УДР–011

Показано, що значення відносної похибки вимірювання витрати створеними витратомірами УДР-011 не перевищують їх відповідних значень, нормованих в діючих нормативних документах (табл.1).

Таблиця 1 – Вимоги до точнісних характеристик доплерівських витратомірів

Витрата, м³/год			Допустима похибка (%) в діапазонах		
Q_1	Q_2	Q_3	Q_1	Q_2	Q_3
2,90	24,40	48,80	10,0	4,0	2,0

Калібровку (повірку) витратоміри, як правило, проходять на повірочних стендах з використанням в якості вимірюваного середовища повітря при тиску, близькому до атмосферного. Це зумовлено декількома причинами: гарантується повна безпека досліджень, не потрібно визначати щільність робочого середовища забезпечується висока повторюваність результатів дослідження.

Однак, в умовах експлуатації витратоміри використовують для обліку природного газу і під більш високим тиском, через що виникає питання про коректність таких метрологічних процедур з точки зору реальної похибки витратоміра в робочих умовах. Закордонні виробники проводять калібрування витратомірів як на повітрі при атмосферному тиску, так і на природному газі для різних тисків. Аналіз результатів випробувань турбінних лічильника газу TZ80 G160 виробництва фірми «Actaris», витратоміра MTS 50 (Schlumberger, Франція), роторних лічильників газу NB500 (Gaselan, Німеччина) і цифрового лічильника фірми ROMET Limited (Канада) показує, що метрологічні характеристики витратомірів відрізняються в залежності від значень тисків вимірюваного середовища і виду цього середовища приблизно на ± 1,0 %.

Приймаючи до уваги наведені факти, в роботі проведені репрезентативні дослідження метрологічних характеристик розроблених витратомірів ГУВР-011 при вимірюваннях повітряних і газових потоків. Дослідження виконувались відповідно до розробленої ННЦ «Інститут метрології» методик, на атестованих стендах та повірочних установках уповноважених організацій України та закордонних фірм, а також на автоматизованій повірочній установці АПУ–011/2500 (повітря, атмосферний тиск) ПРАТ «Енергооблік».

На рис. 11 наведені результати метрологічного дослідження витратоміра газу ГУВР–011 (DN150), попередньо відкаліброваного на установці АПУ–Г–011/2500, на стенді лабораторії філії «Газтехніка» ВАТ «Київоблгаз» (повітря, атмосферний тиск), на стенді вимірювальної лабораторії ВАТ «Івано–Франківськгаз» (природний газ, тиск 0,4 МПа) і на установці «Force Technology», Данія (природний газ, тиск 0,4 МПа).

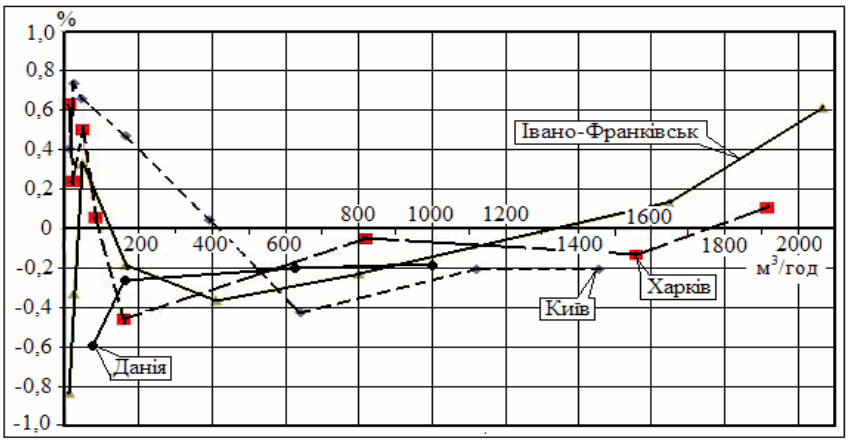

Рисунок 11 – Порівняльні результати метрологічного дослідження витратоміру ГУВР–011

В результаті проведених досліджень встановлено, що розбіжності калібрувальних характеристик витратоміра ГУВР-011 на робочому середовищі «повітря» та «природний газ» не перевищують значення 0,5 % у основному діапазоні витрат, що лежить в границях похибки експерименту.

Аналогічні результати отримані при дослідженні врізаної секції DN100 розробленого двоканального газового ультразвукового витратоміра ГУВР–011 на «Робочому еталоні одиниць об'єму та об'ємної витрати газу дзвонового типу РКДУ–044», м. Івано-Франківськ, на середовищі «повітря» в діапазоні витрат 1:20 і на «Установці для повірки лічильників на природному газі» на середовищі «природний газ» в діапазоні витрат 1:100.

Результати цих репрезентативних експериментальних досліджень дозволили зробити надто важливий для витратометричній практики природного газу висновки, що метрологічні характеристики УЗВ ГУВР-011 не залежать від типу газу та його калібрування (повірки) при роботі на природному газі можливо здійснювати на повітрі.

Динамічні дослідження тієї ж секції проводилися у вересні 2007 р. на установці ТЕМП–1 (м. Чугуїв) для витрати близько 100 м^3/год в діапазоні витрат 1:100 (рис. 12): верхня крива – в першому каналі, нижня крива – в другому каналі, середня крива – в комбінаційному, який розроблено раніш (п.4, 2 розділ), каналі витратоміра. Установлено, що розбіжності між першим і другим каналами близько 10 % зумовлені асиметрією і викривленнями потоку, які вносить еталонний лічильник.

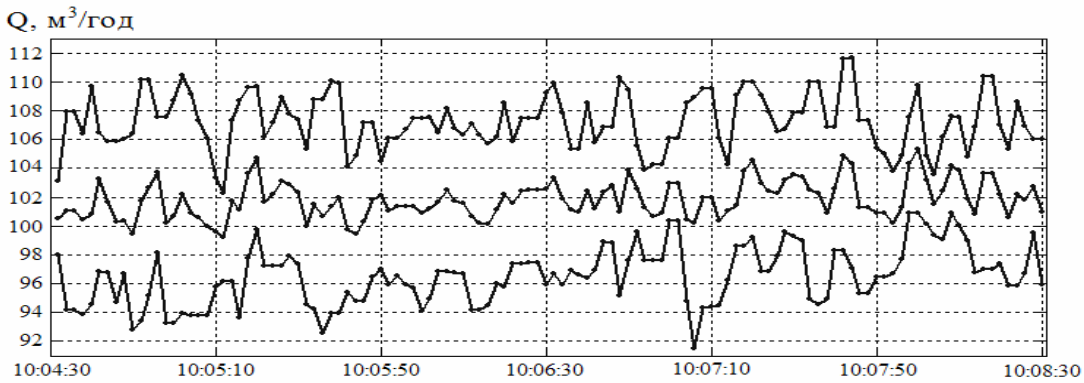

Рисунок 12 – Результати динамічних досліджень
УЗВ ГУВР–011

Показано, що розроблена реалізація комбінаційного каналу УЗВ ГУВР-011 компенсує цю асиметрію, в результаті чого показання УЗВ в залежного від викривлення вимірюваного потоку не виходить за границі ± 1,0 %.

Із витратомірів, метрологічні характеристики яких були розглянуті в даному розділі, серійно виготовляються і занесені до Державних реєстрів засобів вимірювальної техніки України, Росії та країн СНД, ультразвукові часо–імпульсні витратоміри УВР–011 – для «чистих» рідин, та доплерівські витратоміри УДР–011 – для рідин з домішками, а також газові витратоміри ГУВР–011. Їх виробництво сертифіковане міжнародним бюро " Bureau Veritas " на відповідність вимогам стандарту ISO 9001–2000.

На основі виконаних в розділі досліджень установлено, що широкий діапазон вимірювання, висока чутливість, надійність елементної бази розроблених УЗВ дозволяють використовувати їх в:

- галузях газо– та нафтовидобування, транспортування газу, нафти, нафтопродуктів та інших рідин для комерційного та технологічного обліку, а також для виявлення несанкціонованих витоків;

- житлово-комунальному господарстві для обліку витрат енергоресурсів (води, теплоносіїв, пари тощо), обліку балансу водопостачання та водовідведення, виявлення втрат енергоресурсів тощо.

Потенційні можливості розроблених витратомірів не обмежують перелічені галузі застосування.

У четвертому розділі розглянути питання щодо удосконалення метрологічного забезпечення УЗВ ТС, наведені результати розробки та досліджень двох методів: методу калібрування УЗВ в діапазоні витрат, що перевищують верхні границі існуючих витратомірних установок та повірочних стендів, а також, методу визначення похибок УЗВ на основі CFD- моделювання при різних умовах їх експлуатації.

Показано, що при випуску з виробництва єдиним прямим способом встановлення метрологічних характеристик УЗВ є процедура його калібрування (первинної повірки), виконувана методом звірення показань цього витратоміра з високоточним еталоном об’єму (тобто виконується «проливка» витратоміра на еталонній установці).

Однак, незважаючи на переконливі переваги, даний спосіб має й недоліки.

По-перше, на даний час провідні виробники ультразвукових витратомірів в якості високоточних еталонів об'єму використовують громіздкі еталонні установки з прокачуванням робочого середовища, що мають великі габаритні розміри і розміщені, як правило, на підприємствах.

По-друге, парк вищевказаних еталонних установок, застосовуваних при проливному методі калібрування (повірки), обчислюється одиницями в Європі та десятками в усьому світі.

По-третє, проведення періодичних калібрувань ультразвукових лічильників витратомірів великих діаметрів (300 мм і більше) ускладнюється у зв′язку з обмеженістю технічних можливостей, а саме, обмеженістю верхнього діапазону відтворюваних витрат існуючих повірочних установок. Як показав аналіз метрологічної бази України, повірочних установок і калібрувальних стендів, що забезпечують калібрування (повірку) таких лічильників та витратомірів, в країні практично немає. Так, наприклад, для калібрування (повірки) лічильників, призначених для комерційного обліку природного газу, в Україні існує єдина атестована калібрувальна установка, що забезпечує відтворення і передачу одиниці витрати до 6500 $м^3$/год включно, в той час як виробниками розробляються і впроваджуються у національне господарство лічильники великих калібрів (DN ≥ 300) з максимальними витратами до 16000 $м^3$/год.

Таким чином, вимоги національної економіки з розширення верхньої границі вимірюваних витрат УЗВ наштовхуються на відсутність в Україні відповідного метрологічного забезпечення – відповідних витратовимірювальних установок, за допомогою яких можна здійснити калібрування (повірку) зазначених лічильників.

У цьому зв'язку, імітаційні способи і методи калібрування (повірки), зокрема, ультразвукових лічильників газу, набувають все більшої актуальності.

Разом з тим, імітаційним методам притаманні недоліки, головним з яких є те, що вони не враховують характеру протікання середовища, а також, всіх збурюючих факторів, які виникають у вимірювальних трубопроводах при протіканні середовища. Тому вони не можуть бути повноцінною заміною методу прямого звірення.

З метою зведення цих недоліків до прийнятного мінімуму, саме і запропоновано комбінований метод калібрування (повірки), розробці якого присвячено даний розділ роботи.

В основу розробленого метода лягли результати численних репрезентативних досліджень ультразвукових лічильників газу ГУВР–011 на установці АПУ-Г-011/2500 підприємства «Енергооблік», які переконливо доказали характерну закономірність поведінки їх калібрувальних коефіцієнтів – досить невелику мінливість в діапазоні витрат від $0{,}5 \cdot Q_{\max}$ до $Q_{\max}$.

Дослідженням підвергались метрологічні характеристики лічильників газу ГУВР–011 різних діаметрів в такій кількості:

- ГУВР–011 DN 100 – 34 лічильника,
- ГУВР–011 DN 150 – 52 лічильника,
- ГУВР–011 DN 200 – 26 лічильників.

Результати відхилення калібрувальних коефіцієнтів лічильників ГУВР–011 від їх значень при $Q = 0{,}5 \cdot Q_{\max}$ досліджених діаметрів наведено на рис. 13, які показують, що:

– калібрувальні коефіцієнти, відповідні інтервалу витрат, розташованому у верхній половині діапазону лічильника, залишаються практично постійними і рівними аналогічним коефіцієнтам, отриманим для його середини (максимальне відхилення не перевищило ± 0,3 %);

– характер поведінки калібрувальних коефіцієнтів, практично однаковий для діаметрів лічильників 100, 150 і 200 мм тобто, характер і величина відхилення коефіцієнтів калібрування, а значить і похибок УЗВ практично не залежить від їх діаметра, а значить и похибок УЗВ.

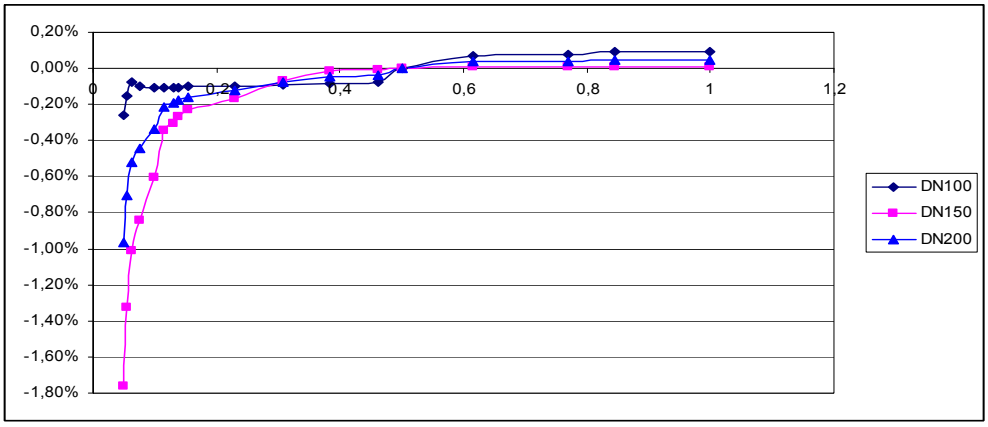

Рисунок 13 –Нормоване відхилення калібрувальних коефіцієнтів похибок лічильників ГУВР–011 DN 100, 150, 200

На основі отриманих результатів був розроблений комбінований метод калібрування (повірки) лічильників, суть якого полягає в наступному.

На першому етапі проводиться калібрування (повірка) УЗВ класичним методом – визначення його основної відносної похибки на повірочній установці методом безпосереднього звірення контрольного об'єму повітря (газу), який пройшов через еталонний лічильник, з об'ємом повітря (газу), виміряним ЗВТ, який калібрується (повіряється). Визначення похибки лічильника і його калібрувального коефіцієнта

$k_{50\%}$ проводять при нормованих в його експлуатаційній документації значеннях об'-ємної витрати до значення, рівного половині максимального.

Другий етап полягає в калібруванні (повірці) лічильника – визначенні його метрологічних характеристик імітаційним методом при значеннях витрати від $0{,}5 \cdot Q_{\max}$ до $Q_{\max}$.

На базі цього метода розроблена відповідно методика, для якої виконані наступні дослідження:

1. Калібрування комбінованим методом лічильника на повірочної установці до половини максимального діапазону витрат, підстановка коефіцієнта калібрування, отриманого при $0{,}5 \cdot Q_{\max}$, для значень витрат від $0{,}5 \cdot Q_{\max}$ до $Q_{\max}$, повірка лічильника на установці в усьому діапазоні витрат.

2. Калібрування лічильника на повірочної установці до чверті максимального діапазону витрат, підстановка коефіцієнта калібрування, отриманого при $0{,}25 \cdot Q_{\max}$, для значень витрат від $0{,}25 \cdot Q_{\max}$ до $Q_{\max}$, повірка лічильника на установці в усьому діапазоні витрат.

3. Калібрування лічильника класичним традиційним методом у всьому діапазоні витрат.

4. Повірка імітаційним методом у всьому діапазоні.

5. Порівняння отриманих результатів.

Результати реалізації перерахованих вище методів калібрування приведені на рис. 14.

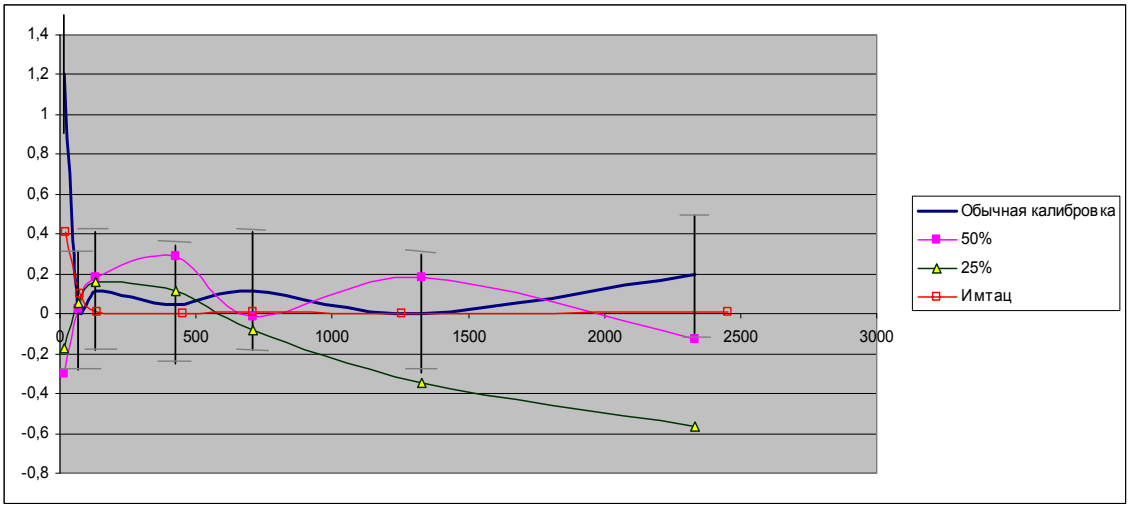

Рисунок 14 – Залежності похибок лічильників ГУВР–011 при перелічених методах калібрування

Отримані результати показали що:

1. Розроблений комбінований метод дозволяє провести калібрування та повірку УЗВ газу в діапазоні витрат, що перевищує верхні границі існуючих витратомірних установок, як мінімум в два рази. Даний метод забезпечує калібрування (повірку) лічильників різного діаметру, і в першу чергу, лічильників з діаметром більше 300 мм.

2. Відповідно, відхилення результатів калібрування (повірки) розробленим методіом, тобто отриманих при підстановці коефіцієнтів в діапазоні витрат від $0{,}5 \cdot Q_{\max}$ до $Q_{\max}$, від результатів, отриманих традиційним методом, не виходить за границі ± 0,3 %.

3. Відхилення результатів калібрування (повірки), отриманих при підстановці коефіцієнтів в діапазоні витрат від $0{,}25 \cdot Q_{\max}$ до $Q_{\max}$, від результатів, отриманих традиційним методом, хоча і перевищує значення ± 0,3 %, але знаходиться в границях допуску максимальної допустимої похибки лічильника ± 1 %.

Перевага розробленого комбінованого методу полягає в наступному: в умовах відсутності можливості проведення повірки «проливним» методом у всьому діапазоні витрат, комбінований метод забезпечує повноцінну повірку лічильників в половині діапазону витрат з подальшою перевіркою їх метрологічних характеристик у верхньому діапазоні витрат. Зважуючи на повноцінну повірку лічильника в половині діапазону витрат, даний метод, очевидно, є більш достовірним, ніж існуючі імітаційні методи, засновані на вимірі швидкості ультразвуку в лічильнику.

В розділі, як відзначалось раніше, приведені результати робіт по подальшому розвитку методу CFD–моделювання стосовно к визначенню похибок УЗВ, що обумовлені їх чутливістю, що, втім, до спотворень структури потоку викликаної наявністю місцевих опорів. Усунення спотворень структури потоку здійснюють двома шляхами: встановленням прямолінійних ділянок достатньої довжини, або застосуванням спеціальних пристроїв для підготовки потоку (ППП) перед УЗВ. Встановлення ППП не знімає повністю питання вибору довжини прямолінійних ділянок, оскільки для УЗВ із встановленим ППП також необхідно витримати певну мінімальну їх довжину.

Отже актуальними є дослідження, спрямовані на визначення мінімальних довжин прямолінійних ділянок після місцевого опору, за умови встановлення яких похибка вимірювання УЗВ не перевищуватиме нормованих границь.

Потужним інструментом для дослідження газодинамічних явищ у трубопроводах є методи обчислювальної гідродинаміки CFD–моделювання (Computational Fluid Dynamics). Ці методи, у поєднанні із результатами експериментальних досліджень, дозволяють будувати досконалі моделі газодинамічних процесів у ділянках газопроводів складних конфігурацій, і, як слід, досліджувати конфігурації вимірювальних трубопроводів та конструкції не охоплені у повній мірі експериментальними дослідженнями.

Внаслідок неточностей відтворення конструкції витраиомірів та відмінностей модельованої структури потоку від дійсної, відхилення результатів CFD–моделювання від експериментальних даних можуть бути значними. Тому необхідно виконувати коректування моделі витратомірів введенням емпіричних залежностей.

В роботі розроблено відповідний CFD-метод стосовно до УЗВ, який опробовано при дослідженні похибки УЗВ ГУВР–011. Під час моделювання відтворені конфігурації вимірювального трубопроводу (ВТ) із встановленими місцевими опорами (МО), які досліджувались експериментально у лабораторії ПРАТ «Енергооблік». Це дало можливість порівняти результати CFD–моделювання цього УЗВ із даними експериментальних досліджень впливу структури потоку після місцевого опору на УЗВ

ГУВР–011, тобто зробити висновок про адекватність розробленого методу експериментальним результатам. Метод містить таку послідовність операцій:

1. Визначення конструктивних характеристик моделі УЗВ, які беруться з паспортних даних на ГУВР–011.

2. Визначення параметрів вимірюваного середовища.

Значення параметрів середовища повітря, які отримуються за результатами метрологічної перевірки УЗВ встановленого на прямій ділянці ВТ, наведені у табл. 2.

Таблиця 2 – Параметри потоку під час перевірки УЗВ ГУВР–011

№	T_{ET}, °C	P_{ET}, кПа	$q_{р.ET}$, м³/год.	$T_{ГУВР}$, °C	$P_{ГУВР}$, кПа
1	16,97	100,75	612,71	17,09	100,08
2	16,98	101,18	324,72	17,13	100,94
3	17,16	101,44	64,26	17,35	101,32
4	17,17	101,47	37,87	17,44	101,39
5	17,37	101,40	20,78	17,55	101,04
6	17,42	101,47	9,30	17,70	101,34
7	17,47	101,49	4,31	17,75	101,42

3. Знаходження коректувального коефіцієнта моделі УЗВ з визначенням характеристик вимірювального трубопроводу, створенням тривимірної моделі ВТ та УЗВ, встановленням параметрів CFD–моделювання та побудовой залежності коректувального коефіцієнта моделі УЗВ від числа Рейнольдса.

Під час моделювання УЗВ ГУВР встановленого на прямолінійній ділянці ВТ для визначення коректувального коефіцієнта моделі, за еталонне значення витрати приймаємо значення масової витрати, отримане за значеннями параметрів з еталонного лічильника. За модельовані значення тиску P та температури T приймаємо значення відповідно $P_{ГУВР}$ та $T_{ГУВР}$ УЗВ ГУВР–011.

В результаті CFD–моделювання отримана залежність коректувального коефіцієнта від числа Рейнольдса, апроксимується за допомогою виразу, що має наступний вигляд:

$$k = \begin{cases} 38{,}79\,\mathrm{Re}^{-0{,}7837} + 1{,}01; & \mathrm{Re} = 1000 \div 5000 \\ -1{,}148 \cdot 10^{-10}\,\mathrm{Re}^2 + 2{,}675 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{Re} + 1{,}049; & \mathrm{Re} = 5000 \div 1{,}5 \cdot 10^4 \\ -3{,}567 \cdot 10^{-8}\,\mathrm{Re} + 1{,}063; & \mathrm{Re} = 1{,}5 \cdot 10^4 \div 15 \cdot 10^4 \end{cases}. \quad (7)$$

Показано, що відносне відхилення значень коректувального коефіцієнта, отриманих за формулою (7) не перевищує 0,01 %, що дозволяє застосовувати формулу під час дослідження роботи цього УЗВ у найбільш цікавому діапазоні чисел Рейнольдса від $1 \cdot 10^3$ до $1{,}5 \cdot 10^5$.

4. Дослідження похибки УЗВ в умовах потоків із спотвореною структурою.

Для дослідження похибки, виконання експериментальних досліджень УЗВ та моделювання вибрано МО двох типів – «90° коліно» і «два коліна в різних площинах (l < 5D)». МО типу «90° коліно» і «два коліна в різних площинах (l<5D)» є найбільш поширеними МО, які формують спотворення структури потоку, що суттєво впливають на покази УЗВ.

За результатами CFD–моделювання обчислено значення витрати повітря та їх відносне відхилення від значень витрати, отриманих експериментально за показами УЗВ ГУВР–011.

Показано, що для випадку моделювання УЗВ встановленого після МО «90° коліно» максимальне відносне відхилення між модельованими значеннями витрати та експериментальними значеннями складає 0,86%. а для встановлення УЗВ після МО «два коліна в різних площинах» значення відносного відхилення у вказаному діапазоні зміни витрати не перевищує 1,04%. Це свідчить про адекватність розробленого методу і можливість його застосування для дослідження впливу спотворень потоку після різного роду МО на похибку вимірювання витрати УЗВ.

Таким чином, за результатами виконаної роботи можна стверджувати, що засоби CFD–моделювання є потужним інструментом для дослідження газодинамічних явищ у трубопроводах. Показано, що у поєднанні із результатами експериментальних досліджень, методи обчислювальної гідродинаміки дозволяють будувати досконалі моделі газодинамічних процесів у ділянках газопроводів складних конфігурацій.

На основі одного із таких методів, а саме методу кінцевих об’ємів, що реалізований в програмному пакеті для CFD–моделювання SolidWorks, розроблено методику дослідження похибки УЗВ викликаної спотворенням структури потоку місцевими опорами.

Отже, розроблена методика може бути застосована для подальшого дослідження впливу різноманітних МО та конфігурацій ВТ на похибку діючих моделей УЗВ, а також для удосконалення конструкції існуючих і розробки нових ЗВТ витрати газу та рідини.

У Висновках приводяться найбільш важливі наукові і практичні результати, що отримані в результаті виконання роботи.

У Додатках наведено таблиці з класифікацією основних видів витратомірів, фізичні якості текучого середовища, значення густини та швидкості розповсюдження ультразвуку. Представлені основні технічні дані автоматизованих повірочних установок, характеристики витратомірів типу УВР-011. Відображено дані первинної та періодичних повірок витратомірів УВР-011, результати оцінки відхилення коефіцієнтів калібрування чотирьох ультразвукових витратомірів.

ВИСНОВКИ

В результаті виконаних в дисертаційній роботі теоретичних та експериментальних досліджень вирішена актуальна для національної економіки наукова задача підвищення якості обліку енергетичних ресурсів і води шляхом удосконалення ультразвукового методу вимірювання витрат текучих (плинних) середовищ і створення на його основі витратомірів з високими метрологічними характеристиками в умовах спотвореної структури потоку, і, зокрема, отримані наступні основні нові наукові результати:

1. Вперше розроблено та проведено експериментальне дослідження витратомірів, що реалізують удосконалений ультразвуковий метод вимірювання витрати текучого середовища, що дало можливість:

- розробити, виготовити на рівні, сертифікованому міжнародним органом з сертифікації «Bureau Veritas» на відповідність вимогам стандарту ISO 9001, атестувати та занести до реєстрів ЗВТ України, РФ, країн СНГ;

- ультразвукові витратоміри УЗВ УВР-011, ГУВР-011, УДР-011, метрологічні характеристики яких знаходяться на рівні найкращих аналогічних ЗВТ рідин та газів впровадити в національну та закордонну метрологічну практику.

2. Розроблено, виготовлено, атестовано відповідним чином та введено в експлуатацію автоматизовані повірочні установки АПУ-011/40 і АПУ-Г-011/2500, які забезпечують можливість калібрування (повірки) та дослідження нових принципів побудови та конструктивних рішень ЗВТ витрати різних текучих середовищ у широкому діапазоні з нормованою похибкою: границі відносної похибки вимірювання об'єму та об'ємної витрати рідини першої установки дорівнюють ± 0,08 %, об'єму та об'ємної витрати газу другої - ± 0,3 %.

3. Вперше розроблено та апробовано методологію калібрування ультразвукових витратомірів газу, зокрема ГУВР–011, яка дає змогу шляхом комплексного використання експериментальних і імітаційних результатів дослідження підняти ні менш, ніж в 2 рази верхню границю динамічного діапазону існуючих витратомірних установок при збереженні високої точності вимірювань.

4. Вперше на основі репрезентативних метрологічних досліджень розробленого УЗВ ГУВР-011 доказано, що калібрування (повірку) цих ЗВТ, призначених вимірювати витрату природного газу, можна виконувати на повітряному середовищі, що є актуальним для національної економіки.

5. Вперше розроблено метод оцінювання точності УЗВ в умовах спотвореної структури потоку та наявності різного роду місцевих опорів шляхом використання удосконаленого CFD - моделювання та експериментальних даних реального УЗВ, що дало змогу виконувати оперативні дослідження впливу спотворень потоку після різного роду місцевих опорів на похибку вимірювання витрати середовища за допомогою створюваних та існуючих УЗВ.

6. Удосконалено одноканальний і багатоканальний часово–імпульсний ультразвуковий метод вимірювання витрати ТС на основі розвитку їх математичних моделей, що дозволило зменшити похибку вимірювання різниці часу розповсюдження сигналів вздовж і проти потоку та забезпечити підвищення точності вимірювання довжини шляху поширення акустичних сигналів та їх багатоканальної обробки, і, як слід, знизити похибку вимірювання витрати середовища до 15 %.

7. Удосконалено ультразвуковий метод, який використовує ефект Доплера для вимірювання витрати ТС, що забезпечило реалізацію декількох варіантів обробки результатів вимірювання вимірювальним блоком витратоміра, що дозволило зменшити похибки вимірювання витрати доплерівських УЗВ практично вдвічі.

Достовірність отриманих в дисертації результатів підтверджується результатами репрезентативних метрологічних досліджень практичним застосуванням розроблених УЗВ в умовах експлуатації при технологічну та комерційному обліку природного газу.

Декілька напрямків дослідження захищені патентами України і Росії.

Отримані в дисертації результати можуть бути рекомендовані до використання при розробці еталонних засобів вимірювальної техніки в галузі витратометрії, а також так званих смарт–приладів – «розумних» ЗВТ, здатних до самокалібрування, діагностування та запобігання впливу на процес вимірювання будь–яких небажаних факторів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Стеценко А.А. Науково–технічна база системи вимірювання та обліку витрат текучого середовища/ А.А. Стеценко// Зб. наук. праць Харк. ун–ту Повітряних Сил. – 2013. – Вип. 3 (36). – С. 193–198.

2. Стеценко А.А. Проблемы нормативного обеспечения единства измерений в расходометрии/ А.А. Стеценко, В.В. Костылев, С.Д. Недзельский// Системи обробки інформації. – 2011. — Вип.. 6 (96). – С. 14– 16.

3. Стеценко А.А. Обґрунтування збільшення міжповірочного інтервалу витратоміра–лічильника ультразвукового УВР–011/ А.А. Стеценко, С.Д. Недзельский// Метрологія та прилади. – 2013. – №1. – С. 43–44.

4. Козлов В.Є. Інформаційна технологія реалізації ультразвукового доплерівського методу вимірювання витрати рідини/ В.Є. Козлов, С.Д. Недзельський, А.А. Стеценко// Метрологія та прилади. – 2013. – №5. – С. 40–44.

5. Недзельський С.Д. Система обліку речовин на базі ультразвукових витратомірів/ С.Д. Недзельський, А.А. Стеценко// Системи обробки інформації. – 2013. – Вип. 6 (113). – С. 110–113.

6. Стеценко А.А. Сравнительный анализ методов определения метрологических характеристик счетчиков газа ГУВР–011/ А.А. Стеценко, В.Л. Сорокопут, С.Д. Недзельский// Системи обробки інформації. – 2013. – Вип. 3(110). – С. 178–181.

7. Стеценко А.А. Принципы построения многоканального ультразвукового расходомера/ А.А. Стеценко, В.Л. Сорокопут// Энергетика Татарстана. – 2014. – № 2. – С. 42–45.

8. Пістун Є. Дослідження похибки ультразвукових витратомірів за умов спотвореної структури потоку на основі CFD–моделювання/ Матіко Ф., Роман В., Стеценко А. // Метрологія та прилади – 2014. – Випуск 4.– С.13–23.

АНОТАЦІЯ

Стеценко А.А. Удосконалення ультразвукового методу і засобів вимірювання витрати текучого середовища у закритих каналах.

Дисертація на здобуття наукового степеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.01.02 – стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення. ННЦ «Інститут метрології» Мінекономрозвитку і торгівлі України, Харків, 2015.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної наукової задачі підвищення якості обліку енергетичних ресурсів і води для України і, зокрема, удосконаленню ультразвукового методу і засобів вимірювання витрати текучого середовища в закритих каналах. В роботі розроблено та проведено експериментальне дослідження витратомірів, що реалізують удосконалений ультразвуковий метод вимірювання витрати текучого середовища. Отримало подальший розвиток метрологічне забезпечення витратомірів текучого середовища на основі ультразвукового методу. Достовірність отриманих в дисертації результатів підтверджується результатами метрологічних випробувань, практичним застосуванням витратомірів в умовах експлуатації для технологічного та комерційного обліку, що демонструє працездатність удосконаленого методу; декілька напрямків дослідження захищені патентами Укра-

їни і Росії. Удосконалено одноканальний і багатоканальний часово–імпульсний ультразвуковий метод вимірювання витрати текучого середовища на базі їх математичних моделей, що дозволяє зменшити похибку вимірювання різниці часу розповсюдження сигналів вздовж і проти потоку і забезпечити потенційну точність вимірювання за рахунок підвищення точності вимірювання довжини шляху поширення акустичних сигналів та їх багатоканальної обробки. Удосконалено ультразвуковий метод, який використовує ефект Доплера для вимірювання витрати текучого середовища, що забезпечує реалізацію декількох варіантів обробки для вимірювального блоку витратоміра. Отримані в дисертації результати можуть бути рекомендовані до використання при розробці еталонних засобів вимірювальної техніки в галузі витратометрії, а також так званих смарт–приладів – “розумних” приладів, здатних до самокалібрування, діагностування та запобігання впливу на процес вимірювання будь–яких небажаних факторів.

Ключові слова: ультразвуковий метод, текуче середовище, вимірювання витрати, закриті канали, метрологічне забезпечення, похибка вимірювання.

АННОТАЦИЯ

Стеценко А.А. Усовершенствование ультразвукового метода и способов измерения расхода текучей среды в закрытых каналах.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.01.02 - стандартизация, сертификация и метрологическое обеспечение. ННЦ «Институт метрологии» Минэкономразвития и торговли Украины, Харьков, 2015.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научной задаче повышения качества учета энергетических ресурсов и воды для Украины и , в частности, усовершенствованию ультразвукового метода и способов измерения расхода текучей среды в закрытых каналах.

Разработано и проведены экспериментальные исследования ультразвукового метода измерения расхода текучей среды. Предложены, изготовлены и введены в эксплуатацию автоматизированные поверочные установки, которые обеспечивают возможность поверки (калибровки) и отработку новых принципов построения и конструктивных решений для средств измерения расхода разных текучих сред в широком диапазоне с необходимой точностью, использованием разных способов размещения первичных преобразователей относительно канала транспортирования измеряемой среды. Впервые разработана и опробована методика калибровки ультразвуковых расходомеров в диапазоне расходов, которые превышают верхнюю границу существующих установок, которые измеряют расход. Разработана методика исследования погрешности ультразвуковых расходомеров в условиях искаженной структуры потоков на основе CFD-моделирования и экспериментальных данных реального ультразвукового расходомера. Проведен сравнительный анализ методик оценивания метрологических характеристик ультразвукового расходомера, основанного на критерии максимальной допустимой ошибки, и на вычислении неопределенности измерений, с дальнейшим выводом о адекватности методик и соответствии метрологических характеристик разработанных автором ультразвукового расходомера требованиям методик и критериям оценки. Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается результатами метрологических испыта-

ний, практическим использованием расходомеров в условиях эксплуатации для технологического и коммерческого учета, что демонстрирует работоспособность усовершенствованного метода. Несколько направлений исследования защищены патентами Украины и России. Проведено усовершенствование одноканального и многоканального частотно-импульсного ультразвукового метода измерения расхода текучей среды на базе их математической модели, что позволяет уменьшить ошибку измерения разницы времени распространения сигнала вдоль и против потока и обеспечить потенциальную точность измерений за счет повышения точности измерений длины пути распространения акустических сигналов и их многоканальной обработки. В ходе диссертационных исследований усовершенствован ультразвуковой метод, который использует эффект Доплера для измерения расхода текучей среды. Что обеспечивает реализацию нескольких вариантов обработки измерительного блока расходомера. Полученные в диссертационной работе результаты могут быть рекомендованы к использованию при разработке эталонных средств измерительной техники в области расходометрии, а также, в так называемых, «умных» приборах, способных к самокалибровки, диагностики и предотвращению воздействию на процесс измерения любых нежелательных факторов.

Ключевые слова: ультразвуковой метод, текучая среда, измерение расхода, закрытые каналы, метрологическое обеспечение, погрешность измерений.

ABSTRACT

Stetsenko A. A. Improvement of the ultrasonic method and ways to measure a fluid flow in closed conduits. - Manuscript.

Thesis for Ph.D. degree by specialty 05.01.02 - Standardization, Certification and Metrological Assurance. - National Scientific Centre «Institute of metrology» of Economic Development and Trade of Ukraine Kharkov, 2015.

The thesis is devoted to solving actual scientific problem raising money account energy and water and Ukraine, including the improvement of the ultrasonic method and means for measuring flow of fluid in closed channels. This paper designed and conducted experimental studies of flow, implementing improved method of ultrasonic flow measurement fluid. Further developed metrological support fluid flow based on ultrasonic method. The reliability of the results obtained in the thesis is confirmed by metrological tests, practical application of flow in operation for technological and commercial accounting, demonstrating the improved performance of the method; several areas of research covered by patents of Ukraine and Russia. Improved single-channel and multi-time-pulsed ultrasonic flow measurement method fluid based on their mathematical models which can reduce measurement error propagation time difference signals along and against the flow and provide potential measurement accuracy by increasing the accuracy of measurement path length propagation of acoustic signals and their multi-channel treatment. Improved ultrasonic method that uses Doppler effect to measure the flow of fluid to realize several treatment options for flow measuring unit. The obtained results in the thesis can be recommended for use in the development of standard measuring instruments in vytratometriyi and so-called smart devices - "smart" devices capable of self-calibration, diagnostics and prevention of the measurement process in any adverse factors.

Keywords: ultrasonic method, fluid flow measurement, closed channels, metrological support, measurement error.

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 0.9. Тир. 100 прим. Зам. 191-15.
Підписано до друку 25.05.15. Папір офсетний.

Надруковано з макету замовника у ФОП Бровін О.В.
61022, м. Харків, вул. Трінклера, 2, корп.1, к.19. Т. (057) 758-01-08, (066) 822-71-30
Свідоцтво про внесення суб'єкта до Державного реєстру
видавців та виготовників видавничої продукції серія ДК 3587 від 23.09.09 р.

СТИЛЬ-ИЗДАТ®
ТИПОГРАФИЯ
www.stil-izdat.com