

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

На правах рукопису

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

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник:
Руженцев Ігор Вікторович,
доктор технічних наук,
професор

Ідентичність всіх примірників дисертації
ЗАСВІДЧУЮ

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 64.827.01

к.т.н., с.н.с. Склярів В.В. /

Харків—2015

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів.....	5
ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ ТЕКУЧОГО СЕРЕДОВИЩА.....	15
1.1 Аналіз методів і засобів вимірювання витрати текучого середовища	16
1.2 Метод змінного перепаду тиску.....	18
1.3 Електромагнітний метод	21
1.4 Турбінний метод	24
1.5 Термоанемометричний метод	26
1.6 Вихровий метод.....	28
1.7 Ультразвуковий метод	30
1.8 Алгоритмічні методи оброблення вимірювальної інформації ультразвукового методу вимірювання витрати.....	36
1.9 Висновки по розділу 1.....	40
1.10 Постановка задачі для дисертаційного дослідження.....	42
РОЗДІЛ 2 УДОСКОНАЛЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО МЕТОДУ ТА ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ І ВИТРАТОМІРІВ ТЕКУЧИХ СЕРЕДОВИЩ.....	43
2.1 Удосконалення часово-імпульсного ультразвукового методу вимірювання витрати текучого середовища	46
2.1.1 Математична модель ультразвукового одноканального вимірювального перетворювача швидкості плинних середовищ.....	47
2.1.2 Математична модель одноканального ультразвукового вимірювального перетворювача з хордовим розташуванням акустичного каналу.....	54

2.1.3	Математична модель двоканального та багатоканального ультразвукового вимірювального перетворювача швидкості текучих середовищ	58
2.2	Розробка методу визначення «центру тяжіння» доплерівського спектра ультразвукового вимірювання витрати.....	67
2.3	Висновки по розділу 2.....	77
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ВИТРАТИ ТЕКУЧИХ СЕРЕДОВИЩ		79
3.1	Розробка повірочних установок дослідження основних характеристик ультразвукових витратомірів	80
3.1.1	Автоматизована повірочна установка АПУ–011/40.....	80
3.1.2	Автоматизована повірочна установка АПУ–Г–011/2500.....	84
3.2	Метрологічне дослідження часово–імпульсних витратомірів.....	88
3.2.1	Метрологічне дослідження одноканальних витратомірів.....	89
3.2.2	Метрологічні дослідження двоканальних витратомірів.....	90
3.2.3	Метрологічні дослідження багатоканальних витратомірів.....	93
3.2.4	Результати метрологічних досліджень і експлуатації часово–імпульсних витратомірів.....	96
3.3	Метрологічне дослідження доплерівських витратомірів.....	99
3.4	Метрологічне дослідження витратомірів газу.....	96
3.4.1	Експериментальні дослідження ультразвукових витратомірів газу на різних робочих середовищах.....	99
3.4.2	Метрологічне дослідження двоканального витратоміра газу ГУВР–011.....	101
3.4.3	Порівняння методів розрахунку метрологічних характеристик газового витратоміра ГУВР–011.....	103
3.5	Рекомендації щодо використання розроблених витратомірів.....	105
3.6	Висновки по розділу 3.....	106

РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА МЕТОДУ ОЦІНЮВАННЯ ТОЧНОСТІ УЗВ ТА МЕТОДУ ЇХ КАЛІБРУВАННЯ.....	109
4.1 Розробка методології калібрування ультразвукових витратомірів в діапазоні витрат, що перевищує верхню границю існуючих витратовимірювальних установок.....	110
4.2 Удосконалення методу оцінювання точності ультразвукових витратомірів в умовах спотвореної структури потоку на основі CFD–моделювання та експериментальних даних.....	117
4.2.1 Обґрунтування методу CFD–моделювання ультразвукового витратоміра газу.....	120
4.2.2 Методика дослідження похибки УЗВ на основі CFD–моделювання...	123
4.2.3 Застосування методики CFD–моделювання для дослідження похибки УЗВ ГУВР	131
4.3 Висновки по розділу 4.....	140
ВИСНОВКИ.....	142
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	145
ДОДАТКИ.....	158
ДОДАТОК А Акти впровадження.....	159
ДОДАТОК Б Класифікація основних видів витратомірів.....	161
ДОДАТОК В Фізичні якості текучого середовища.....	162
ДОДАТОК Д Густина та швидкість розповсюдження ультразвуку.....	166
ДОДАТОК Е Основні технічні дані автоматизованих повірочних установок	167
ДОДАТОК Ж Характеристики витратомірів типу УВР–11.....	169
ДОДАТОК К Дані первинної та періодичних повірок.....	170
ДОДАТОК Л Результати оцінки відхилення коефіцієнтів калібрування.....	171

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

АСУ	– автоматизована система управління
АПУ	– автоматизована повірочна установка
ВАТ	– відкрите акціонерне товариство
ВБ	– вимірювальний блок
ВВР	– відомості Верховної Ради України
ВТ	– вимірювальний трубопровід
ДПВ	– державні приймальні випробування
ПАВС	– персональна автоматизована вимірювальна система
ВП	– відліковий пристрій
год	– година (годин)
ДНВО	– Державне науково–виробниче об’єднання
ВНС	– водонапірна насосна станція
DN	– номінальний діаметр трубопроводу
ДП	– державне підприємство
ЕОМ	– електронна обчислювальна машина
ЕРС	– електрорушійна сила
ЗВТ	– засоби вимірювальної техніки
ЗОТ	– засоби обчислювальної техніки
ІПС	– інтерактивне програмне середовище
ІС	– інформаційна система
КМЗ	– концептуальна модель застосування
МО	– місцевий опір
МХ	– метрологічні характеристики
НДР	– науково–дослідницька робота
ННЦ	– Національний науковий центр
НПС	– нафтопереробна станція

ОП	– обчислювальний пристрій
ПАТ	– приватне акціонерне товариство
ПЕА	– перетворювач електроакустичний
ПЗ	– програмне забезпечення
ПЛІС	– програмована логічна інтегральна схема
ПЛМ	– програмована логічна матриця
ПП	– первинний перетворювач
ПУ	– повірочна установка
СТП	– стандарт підприємства (предприятия – рос.)
ТС	– текуче середовище
УЗВ	– ультразвуковий витратомір
УЗПВ	– ультразвуковий перетворювач витрат
ЧЕ	– чутливий елемент
с	– швидкість звуку в середовищі
CFD	– computational fluid dynamics (обчислювана гідродинаміка)
ISO	– The International Organization for Standardization (Міжнародна організація зі стандартизації)
Q	– об’ємна витрата
M	– масова витрата
TR	– технічний регламент

ВСТУП

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 [1], як це зазначено в Законі України «Про енергозбереження» №74-94-ВР (в редакції станом на 01.01.2013).

Визначені завдання та функції державного управління енергозбереженням реалізуються в рамках Комплексної Державної програми енергозбереження України [2] 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.

Відмічено [2], що «щорічно на житлові, комунальні та побутові потреби населення України витрачається п'ята частина паливних ресурсів та електроенергії і третина теплової енергії, які використовуються в економіці, тобто по обсягах 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 енергоприймачів 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.

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» [3] 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.

Таким чином, завдання [1, 2] з використання інформаційних технологій не можна вважати вирішеним.

Також, до сьогоднішнього дня залишаються невирішеними завдання метрологічного забезпечення (калібровка, повірка) витратомірів природного газу великих діаметрів ($DN > 300$); підвищення точності, достовірності вимірювання витрати газу в умовах спотвореної структури його потоку та наявності різноманітних місцевих опорів в магістральних газопроводах; створення національних витратомірів природного газу з метрологічними характеристиками на рівні кращих сучасних закордонних аналогів.

Важливість вирішення для національної економіки цих задач визначено та унормовано низкою документів декларованих органів держави і зокрема:

- Постановою Кабінету Міністрів України від 21.08.2001 № 1089 «Про концепцію створення єдиної системи обліку природного газу»;
- Закон України «Про засади функціонування ринку природного газу», Відомості Верховної Ради України (ВВР) , 2010, №48, ст. 566;
- Закон України «Про забезпечення комерційного обліку природного газу», Відомості Верховної Ради України (ВВР) , 2012, №5, ст. 28.

Очевидно, що вирішення цих актуальних задач у сфері витратометрії природного газу неможливе без вивчення та удосконалення існуючих методів і засобів вимірювальної техніки витрати текучого середовища у закритих каналах.

Відмітимо, що з усіх відомих методів вимірювання витрат детально вивчені, відпрацьовані і доведені до стандартизованих у повному обсязі тільки метод змінного перепаду тиску [4] і частково методи вимірювань за швидкістю в одній точці перерізу труби [5] та «площа–швидкість» [6]. Для інших методів доведені до відносної досконалості ВП, оцінені їх МХ [7, 8], 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 [8].

Все це визначає актуальність удосконалення обліку, контролю за витратами енергоресурсів та розроблення автоматизованих систем управління їх транспортуванням та споживанням, створення сучасних вітчизняних витратомірів і засобів обліку текучого середовища на базі найбільш перспективного методу вимірювання витрати текучого середовища, його удосконалення і розробки на його основі витратоміра, що відповідає сучасним вимогам [8–12].

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася на кафедрі метрології та вимірювальної техніки Харківського національного університету радіоелектроніки в рамках 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, ІНВ0212U902268), де здобувач був виконавцем окремих етапів робіт.

Тема дисертації спрямована на вирішення науково-технічної задачі розробки, удосконалення та впровадження сучасних методів та засобів вимірювання витрати текучого середовища у закритих каналах.

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

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

Мета та завдання досліджень. Метою роботи є підвищення точності ультразвукового вимірювання витрат текучих (плинних) середовищ шляхом удосконалення методів і засобів вимірювання в умовах спотвореної структури потоку.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі *завдання*:

- проаналізувати відомі методи і засоби вимірювання та обліку витрати текучих середовищ, сформулювати вимоги, які ставляться до сучасних систем їх автоматизованого обліку;
- удосконалити метрологічне забезпечення розроблених ультразвукових витратомірів плинних середовищ;
- удосконалити функцію перетворення ультразвукового вимірювального перетворювача швидкості текучих середовищ;
- розробити ультразвукові витратоміри на базі удосконаленого ультразвукового методу і оцінити їх метрологічні характеристики.

Методи дослідження визначаються сукупністю вирішуваних завдань і включають: методи нечіткої математики, що використані для удосконалення ультразвукового методу вимірювання витрат; методи натурного експерименту, теорії ймовірностей, математичної статистики, вимірювань, які використані при удосконаленні науково–технічної бази системи вимірювання та обліку витрати текучого середовища, 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 нормованої точності.

2. Удосконалено функцію перетворення часово–імпульсного ультразвукового вимірювального перетворювача швидкості текучих середовищ, 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.

3. Удосконалено метод оцінювання точності ультразвукових витратомірів в умовах спотвореної структури потоку та наявності різного роду місцевих опорів шляхом використання CFD – моделювання та експериментальних даних реального УЗВ.

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.

Теоретична цінність результатів роботи полягає в тому, що отримало подальший розвиток вимірювання витрати з використанням ультразвукових методів, створені і частково реалізовані передумови подальшого розвитку ультразвукової витратометрії.

Практичне значення отриманих результатів:

- 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;

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

- розроблено на базі комплексного методу обробки експериментальних і імітаційних результатів та апробовано методику калібрування ультразвукових витратомірів газу ГУР-011 в діапазоні витрат, що перевищує верхню границю існуючих витратовимірювальні установок;

- розроблено, проведено ДПВ 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 (акти впровадження НГВУ «Полтаванафтогаз» ПАТ «Укрнафта», НГВУ «Охтирканафтогаз» ПАТ «Укрнафта» НАК «Нафтогаз України»), Додаток А.

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 текучого середовища з використанням сучасних інформаційних технологій. Запропоновані технічні рішення можуть бути використані як елементи для побудови автоматизованої системи вимірювання та обліку текучого середовища; 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 міжпіврічного інтервалу без метрологічних відказів –було запропоновано можливість збільшення міжпіврічного інтервалу витратомірів-лічильників; в [19] удосконалена система вимірювання та обліку витрат речовини на базі ультразвукового доплерівського 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. Запропонована система вимірювання практично реалізована на базі витратоміру-лічильника УВР-011; в [21] у статті було проведено порівняльний аналіз різних методів повірки лічильників газу: методу за критерієм максимально допустимої похибки та методу розрахунку невизначеності вимірювань. Автором було обґрунтовано відповідність розробленого ім

ультразвукового лічильника газу ГУВР-011 сучасним вимогам та критеріям оцінки метрологічних характеристик; в [22] вирішена задача оптимізації багатоканальної системи зондування потоку речовини ультразвукових витратомірів, що забезпечує зменшення їх сумарної похибки; в [23] на основі методу кінцевих об'ємів автором розроблено методику дослідження похибки ультразвукових витратомірів, викликаній спотворенням структури потоку місцевими опорами, що дає можливість вибору оптимальних параметрів вимірювального трубопроводу та вузла обліку в цілому для забезпечення мінімальної сумарної похибки вимірювання витрати середовища.

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.;
- на III – VIII Науково-технічних конференціях «Витратометрія» (м. Івано-Франківськ, 2003-2013 рр.);
- XII Міжнародній науково-практичній конференції «Совершенствование измерений рас хода жидкости, газа и пара» (Санкт-Петербург, Росія, 2002 р.);
- 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. Отримано 3 патента, за тематикою дисертаційної роботи.

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

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ ТЕКУЧОГО СЕРЕДОВИЩА

В залежності від агрегатного стану всі речовини можуть знаходитися в твердому, рідинному і газоподібному станах. Два останніх у гідромеханіці об'єднують поняттям «рідини», які, у свою чергу, поділяють на ті, що мало стискаються (крапельні), і ті, що стискаються, тобто змінюють свій об'єм; розрізняють також пару як газоподібну речовину з нестійким агрегатним станом [24, 25]. Далі в роботі під терміном «речовина» будемо розуміти деяке текуче середовище (ТС) – будь-яка рідина, газ, пара або їх суміш, яке переміщається (транспортується) у закритому каналі (трубопроводі).

Витрата – це кількість речовини в одиницях маси (кг/с, кг/год) або в одиницях об'єму ($\text{м}^3/\text{с}$, $\text{м}^3/\text{год}$), яка протікає через переріз трубопроводу за одиницю часу [7].

Одиниці маси дають більш повні відомості про кількість або витрату речовини, ніж одиниці об'єму, тому, що об'єм речовин, а особливо газів, залежить від тиску і температури. Тому при вимірюванні об'ємних витрат газів для одержання порівняльних значень результати їх вимірювань призводять до стандартних умов: тиск $P_n = 101,32472$ кПа (760 мм рт. ст.), температура $T = 293,15$ К (20°C), відносна вологість $\varphi = 80\%$. За кордоном стандартною температурою вважають $T = 288,15$ К (15°C) [7].

Сучасні цифрові технології дозволяють визначати об'ємну і/або масову витрату речовини, накопичувати дані щодо кількості речовини за деякий відрізок часу на виході первинного перетворювача будь-якого типу, тому, через неprincipову відмінність від термінів «витратомір» і «лічильник», далі за текстом будемо використовувати термін «витратомір». В Додатку Б наведена класифікація основних видів сучасних витратомірів [7, 26].

В технологічних процесах виробництва нафтогазових об'єктів (видобуток, збирання, транспортування, підготовка, зберігання, реалізація) оперативні вимірювання та облік газорідинної продукції здійснюють традиційно в одиницях об'єму, а склад і кількість продукції – в одиницях об'єму і маси.

В товарних операціях (при комерційному обліку реалізації продукції) оперативні вимірювання газорідинної продукції здійснюють в одиницях об'єму, а облік – з перерахуванням в одиниці маси як найбільш достовірної величини на всіх стадіях виробничого процесу.

Гази і рідини навіть одного виду в реальних умовах можуть відрізнятися за компонентним складом в достатньо широких границях [24, 27–33], тобто вони можуть мати різні параметри: фізичні якості ТС (Додаток В), теплопровідність, теплоємність, і т. п. Ці параметри змінюються при змінненні температури і тиску і, як слід, обумовлюють додаткові похибки при виконанні вимірювань. Тому вимірювання витрати текучого середовища зазвичай має доповнюватися контролем і обліком температури, тиску та теплофізичних параметрів ТС.

1.1 Аналіз методів і засобів вимірювання витрати текучого середовища

Методи вимірювань витрати ТС базуються на перетворенні енергії потоку в інші види енергії, більш зручні для вимірювань, або в електричний сигнал. Тому структуру витратоміра можна подати як сукупність первинного перетворювача (ПП), вимірювального блоку (ВБ) та відлікового пристрою (ВП) (рис. 1.1). Функції ВБ і ВП можуть бути об'єднані у структурі обчислювального пристрою (ОП).

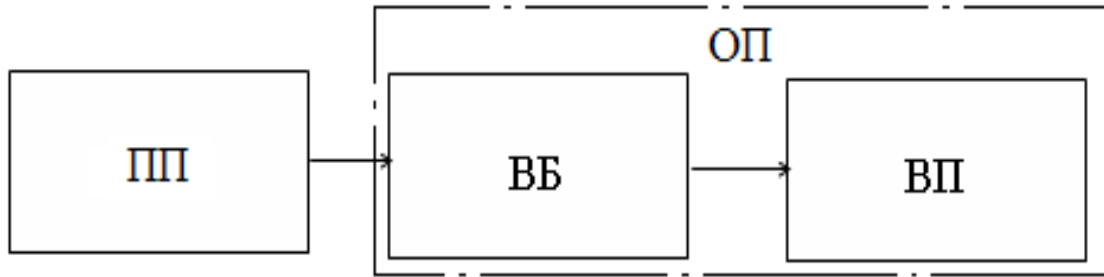


Рисунок 1.1 – Структурна схема витратоміра

Аналіз публікацій з питань витратометрії у літературних джерелах [7, 8] вітчизняних і закордонних періодичних виданнях та мережі Інтернет [9, 10, 24] дає змогу навести приблизне відсоткове розподілення оприлюднених матеріалів, присвячених найбільш розповсюдженим типам витратомірів за видами фізичних процесів, що лежать в основі їх побудови (рис. 1.2).

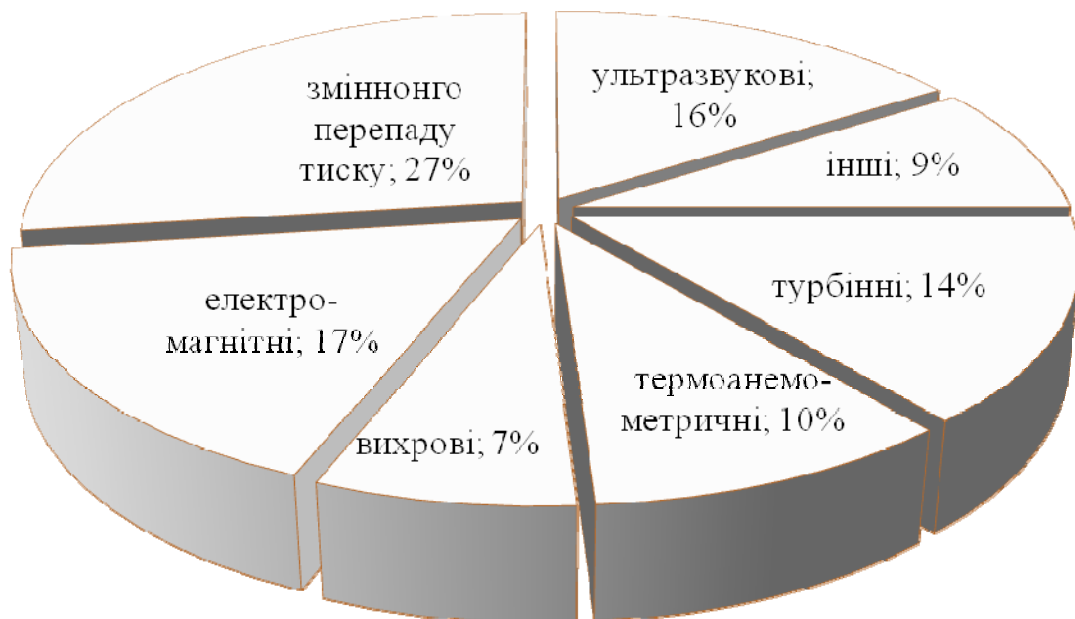


Рисунок 1.2 – Розподілення кількості публікацій, присвячених основним типам витратомірів

Коротко розглянемо і проаналізуємо методи вимірювання витрати текучого середовища, що складають понад 90% всіх згаданих вище, тобто

методи змінного перепаду тиску, електромагнітні, ультразвукові, турбінні, термоанемометричні та вихрові методи.

1.2 Метод змінного перепаду тиску

Метод вимірювання витрат за перепадом тиску базується на залежності перепаду тиску в нерухомому встановленому в трубопроводі пристрої, що звужується, від витрати вимірюваної речовини (рідини, газу, пари). Звужуючий пристрій – наприклад, діафрагма (рис. 1.3) – тонкий диск з круглим отвором уздовж осі труби. Вхідна частина отвору має циліндричну форму, що переходить в конічне розширення. Після перерізу А струмінь звужується і середня швидкість потоку підвищується. Завдяки інерційності струмінь продовжує звужуватися і на деякій відстані після діафрагми. Місце найбільшого звуження знаходиться в перерізі В. Зростання швидкості на ділянці АВ супроводжується зменшенням статичного тиску від початкового значення P_A до мінімального P_B [4, 7, 34].

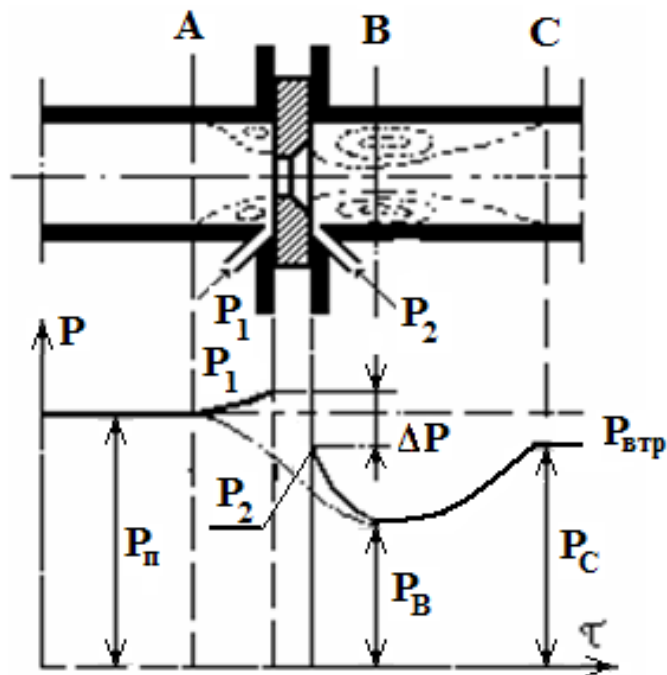


Рисунок 1.3 – Принцип вимірювання витрати за перепадом тиску

Після перерізу В починається розширення струменя, котре закінчується в перерізі С. Цей процес супроводжується зменшенням швидкості до початкової, зростанням статичного тиску до P_C , яке менше початкового P_n на величину втрати тиску $P_{втр}$ в пристрої, який звужується (рис. 1.3). Це зумовлене втратою енергії потоку в “мертвих” зонах, які знаходяться за діафрагмою, через сильне вихоретворення в них [34].

В витратомірах звичайно вимірюється перепад тиску не в перерізах А і В (тобто $P_A - P_B$), а безпосередньо до та після звужуючого пристрою ($\Delta P = P_1 - P_2$) (рис. 1.3), і рівняння для масової (M , кг/год) та об’ємної (Q , м³/год) витрат відповідно мають вигляд [25]:

$$M = \alpha \cdot \varepsilon \cdot S_0 \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta P}, \quad (1.1)$$

$$Q = \alpha \cdot \varepsilon \cdot S_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \Delta P}, \quad (1.2)$$

де α – коефіцієнт витрати, який залежить від так званого модуля звужуючого пристрою $m = S_0/S$ (тут S_0 – площа отвору звужуючого пристрою, а S – площа перерізу трубопроводу, м²), який визначається за спеціальними графіками;

ε – поправочний множник (на розширення вимірюваного середовища);

ρ – густина середовища в перерізі А (в незбуреному потоці), кг/м³.

Перепад тиску, який створюється в пристрої, що звужується, вимірюється за допомогою дифманометра, шкала якого градується в одиницях витрати. Для одержання рівномірної шкали витратоміра в кінематичну (або електронну) схему дифманометра або вторинного приладу (який перетворює покази дифманометра в електричний сигнал та реєструє його) включають пристрій для добування квадратного кореня. Наявність такого пристрою є одним із недоліків розглянутого методу вимірювань [34].

Крім діафрагм для звужування потоку використовують також сопла (рис. 1.4) і труби (рис. 1.5) Вентурі. Як відмічалось раніше, всі звужуючі пристрої і правила вимірювання витрати газів та рідин з їх допомогою стандартизовані та нормалізовані [4].

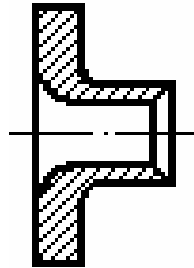


Рисунок 1.4 – Сопло Вентурі

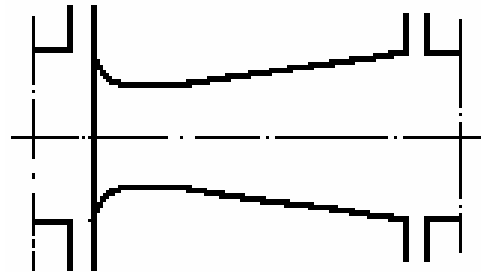


Рисунок 1.5 – Труба Вентурі

Перевагами методу змінного перепаду тиску (фактично єдиного стандартизованого у повному обсязі) є:

- зручність і універсальність;
- уніфікація і взаємозамінність елементів вимірювальної схеми (звужуючого пристрою, дифманометра, з'єднувачів, допоміжних і вторинних пристроїв);
- можливість визначення градуювальної характеристики витратоміра розрахунковим шляхом;
- можливість вимірювання витрати рідин, газів і пари при різних температурах і тисках.

Однак, даному методу властиві й серйозні недоліки, основні з яких зумовлені:

- нелінійністю зв'язку об'єкта вимірювання (перепаду тиску) з вимірюваним параметром (Q або M);
- можливістю застосування для вимірювання тільки однофазних текучих середовищ;
- складністю промислового застосування при невеликих витратах ТС, у пульсуючих потоках, потоках, що містять сторонні домішки;
- невеликим діапазоном вимірювання;

- потребою в наявності достатньо довгих прямих відрізків трубопроводу;
- обмеженням максимального діаметра трубопроводу;
- невисокою точністю вимірювань при реальних умовах експлуатації: границі відносної похибки вимірювання витрати такими ЗВТ, як правило, складають $\pm (1,5-8) \%$, які при індивідуальній атестації ЗВТ і застосуванні високоточних дифманометрів можуть досягати $\pm (0,5-1,0) \%$.

1.3 Електромагнітний метод

До найбільш ефективних засобів вимірювання гідродинамічних параметрів рухомих середовищ відносяться засоби, що реалізують електромагнітний метод вимірювання витрат.

Електромагнітні витратоміри мають низку переваг і, в першу чергу:

- покази витратоміра не залежать від в'язкості і густини рідини, наявності непровідних твердих та газоподібних включень;
- шкала приладу лінійна;
- перетворювач витрат практично безінерційний і не створює втрат тиску.

Електромагнітний метод вимірювання витрат базується на фундаментальному законі електродинаміки, згідно з яким, під час руху електропровідної рідини у магнітному полі в ній індукується електрорушійна сила (ЕРС) E , пропорційна векторному множенню швидкості V рідини та індукції B магнітного поля [35, 36]:

$$E = [V \cdot B]. \quad (1.3)$$

Вимірюючи цю ЕРС, яка у рідині не залежить від її провідності, за допомогою, зокрема, вимірювальних електродів, що контактують з потоком, при відомому B визначають швидкість рідини і, як наслідок, її витрату [46].

Виходячи з того, що величина індукованої у рідині ЕРС не залежить від її провідності, засновники електромагнітного методу вимірювань, а за ними і сучасні розробники електромагнітних (магнітодинамічних - МГД) вимірювачів постулювали, що показники таких ЗВТ не залежать від фізико-хімічних властивостей вимірюваної рідини. Це обумовило підвищений інтерес до МГД вимірювачів витрати рідинних потоків і, як наслідок, розробку та впровадження у витратомірну практику широкої гамми електромагнітних витратомірів (ЕМВ) (рис. 1.6).

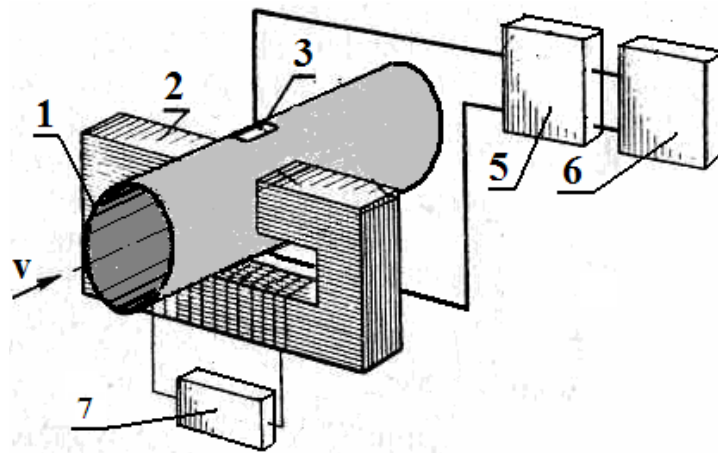


Рисунок 1.6 – Схема електромагнітного витратоміра

В електромагнітному витратомірі між полюсами магніту 2 розташований корпус 1 перетворювача з немагнітного матеріалу, який укритий усередині електричною ізоляцією (резиною, емаллю, фторопластом і т. ін.). Через стінку труби, в площині, перпендикулярній полюсам магніту 2 і, ізольовано від неї, введені та на її внутрішній поверхні розміщені електроди 3 і 4 (E_1 і E_2), які знаходяться в електричному контакті з рідиною (електрод 4 (E_2) на рисунку не показано). Силві лінії магнітного поля спрямовані перпендикулярно до площини, яка проходить через вісь труби і лінію електродів. У відповідності до закону електромагнітної індукції (1.3) між електродами буде наводитись ЕРС. Джерело живлення 7 магніту створює змінне (для зведення до мінімуму поляризації електродів E_1 і E_2) магнітне поле.

Вимірювання наведеної ЕРС здійснюється вимірювальним перетворювачем 5 і відображається на відліковому пристрої 6.

Незважаючи на значні зусилля розробників, границі відносної похибки вимірювання кращих традиційних ЕМВ на сьогоднішній день знаходяться на рівні $\pm (0,2 - 0,3) \%$ [37]. Це обумовлене незовсім адекватним тлумаченням механізму формування сигналу МГД - вимірювачів взагалі і ЕМВ, зокрема. Реально в МГД засобах вимірювальної техніки вимірюють не індуковану в потоці ЕРС E , а падіння напруги U між їх електродами E_1 та E_2 (рис. 1.6), яке в умовах вимірювання рідини з іонною провідністю – провідника другого роду – визначається формулою [38]:

$$U = U(E_1, E_2) = \varphi_{(E_1)} - \varphi_{(E_2)} = \int_{E_1}^{E_2} E_L dl = \int_{E_1}^{E_2} \left\{ \frac{j_L}{\sigma} - [V \cdot B]_L \right\} dl = \int_{E_1}^{E_2} \frac{j_L}{\sigma} dl \cdot \quad (1.4)$$

При цьому реалізовано такі відомі положення:

- у рідині з іонною провідністю індуковане електромагнітне поле потенціальне: $E = -\nabla \varphi$, $B = -\nabla \varphi_m$, де φ та φ_m - електричний і магнітний потенціали, відповідно [35, 38, 39];
- різниця потенціалів у двох будь-яких точках такого електромагнітного поля визначається роботою, яка здійснюється силами поля по переміщенню заряду від однієї точки до іншої, і при цьому:
 - ця робота описується криволінійним інтегралом першого роду від компонента сил, які діють уздовж контуру інтегрування L , за контуром L , що з'єднує розглянуті точки [38, 40];
 - криволінійний інтеграл першого роду від потенційної функції не залежить від форми контуру інтегрування і останній завжди може бути обраний таким чином, щоб він цілком лежав на поверхні вимірювача, тобто там, де швидкість течії, внаслідок в'язкості рідини, дорівнює нулю $V(L) = 0$ [40, 41].

Із співвідношення (1.4) витікає, що сигнал МГД-вимірювачів не тільки не залежить від індукованих електричних струмів, як припускалось раніше [42], а навпаки - цілком визначається цими індукованими електричними струмами $j = \sigma(E + [U \cdot B])$ у вимірюваній рідині і залежить від фізико-хімічних властивостей останньої – її провідності σ .

Щоправда, залежність показників МГД-вимірювачів від фізико-хімічних властивостей вимірюваної рідини розробники ЗВТ звели до прийняттого мінімуму за допомогою застосування вимірювальної апаратури з високим входним опором [38, 42, 43]. Однак, особливість формування сигналу МГД-вимірювачів за рахунок розподілення в вимірювальному середовищі індукованих електричних струмів і на сьогодні залишається принциповим фактором, який обмежує реальні метрологічні можливості електромагнітного методу [44 - 47].

Крім того, до недоліків електромагнітних витратомірів слід віднести такі:

- витратоміри потребують індивідуальне градуювання
- вплив багатьох електричних завад, електрохімічних процесів в рідині, наявність металевих включень в потоці і т.п, що призводить до ускладнення вимірювальної схеми, утруднює виготовлення витратомірів класу вище 1,0 і ускладнює їх експлуатацію;
- і головне - такі ЕМВ здатні забезпечувати вимірювання витрати тільки електропроводящої рідини і тому цілком непридатні для вимірювання витрат газів і пари.

1.4 Турбінний метод

Витратоміри, принцип дії яких ґрунтується на перетворенні швидкості руху робочого тіла, що обертається під впливом потоку, в пропорційну об'ємну витрату вимірюваного середовища, називають тахометричними [8, 24]. В більшості випадків робоче тіло – перетворювач витрати – це турбіна, кулька й т. ін.

Якщо необхідно провести вимірювання витрати маси, то тахометричні витратоміри оснащуються густиномірами і обчислювальними пристроями.

В турбінному витратомірі (рис. 1.7) корпус перетворювача 1 є відрізком труби з двома фланцями, за допомогою яких він з'єднується з трубопроводом. Всередині корпусу встановлені струмовипрямлювачі 2 і 4, з'єднані нерухомою віссю, на якій розташована турбіна 3. Частота обертання турбіни, яка пропорційна об'ємній витраті, перетворюється перетворювачем 6 в електричний сигнал або в частоту вихідної напруги, вимірювання яких виконується ВБ5 одним із відомих методів [24].

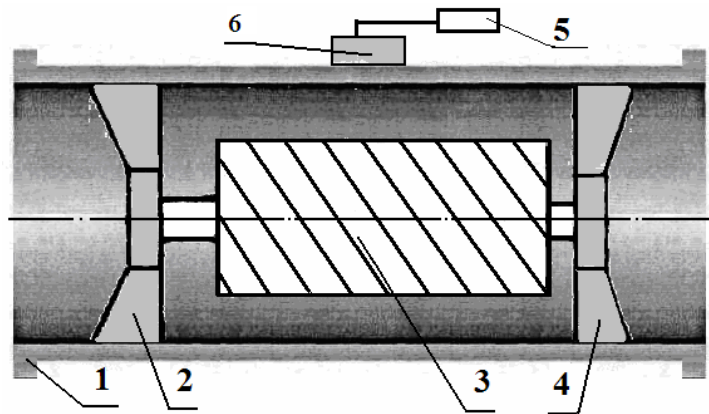


Рисунок 1.7 – Схема турбінного витратоміра

Для кутової швидкості обертання турбіни робоче рівняння витратоміра представлено у вигляді [8]:

$$\Omega = A \cdot (Q - Q_{\min}), \quad (1.5)$$

де A – коефіцієнт, який залежить від конструктивних параметрів турбінного датчика;

Q_{\min} — мінімальна об'ємна витрата (чутливість витратоміра), м³/год;

Q — витрата необхідна для зсуву турбінки з місця або зміни її усталеної швидкості обертання, м³/год.

Ці обидві параметра (A і Q_{\min}) залежать також від структури і гідродинамічних характеристик, в'язкості ТС, спрацювання опор тощо і визначаються в процесі безпосереднього градування ЗВТ. Це обумовлює основні недоліки турбінних витратомірів і обмежує галузі їх застосування.

Перевагами турбінних витратомірів є:

- можливість вимірювання витрат середовищ в широкому діапазоні від $5 \cdot 10^{-9}$ м³/с до 2 м³/с при тиску до 250 МПа і температурах від мінус 240°C до 700°C;
- широкий діапазон фізико-хімічних властивостей середовища;
- мала інерційність, що забезпечує вимірювання середніх і миттєвих витрат з мінімальними похибками;
- висока точність: границі відносної похибки турбінних витратомірів складають $\pm(0,10 - 1,0)\%$ [24].

Однак, цим ЗВТ притаманний і ряд принципових недоліків, які обумовлені в першу чергу наступним:

- наявністю механічного тертя деталей та складових частин витратоміра;
- чутливістю до механічних забруднень середовища, пневмоударів;
- наявністю опору у ВТ, в результаті чого виникають втрати тиску;
- більш вузьким діапазоном типорозмірів;
- шумністю.

Все це обмежує широке розповсюдження таких ЗВТ в реальних умовах експлуатації.

1.5 Термоанемометричний метод

Термоанемометричний метод вимірювання витрати використовує відому залежність між кількістю теплоти, що втрачає чутливий елемент (ЧЕ) перетворювача, і швидкістю руху текучого середовища [8, 48 - 50].

Існують два типи термоанемометрів, що принципово відрізняються: термокондуктивні та термоелектричні анемометри.

В термокондуктивних анемометрах опір ЧЕ грає основну роль при вимірюванні витрати. Чутливий елемент (тонкий металевий, платиновий або нікелевий дріт) включають у мостову схему, і вимірюють або його опір при постійній потужності, що підводиться, або потужність нагріву при постійній величині опору. Таким чином, реалізація цього типу витратомірів ґрунтується на використанні метода мостових схем.

Термоелектричні анемометри відрізняються від термокондуктивних наявністю додаткового напівпровідникового опору або терморезистора, що використовують для вимірювання температури біля поверхні чутливого елемента. В приладах цього типу вимірювальний ланцюг може бути фізично відділений від нагрівного і тоді вимірювання проводять за методом амперметра–вольтметра.

Перевагою термоанемометричних витратомірів є [49, 51]:

- широкий діапазон вимірюваних швидкостей витрати потоку. витрати, що забезпечується за рахунок алгоритмічного коригування процесу вимірювання: методами аналітичного розрахунку вихідного сигналу чутливого елемента будують сукупність розподілу швидкостей у перерізі потоку і проводять перерахунок інформативного сигналу до потрібного швидкісного діапазону;
- мала величина теплової інерції застосовуваних термоелементів, що забезпечує високу швидкодію при вимірюванні витрат пульсуючих потоків, сумішей речовин і дозволяє використовувати термоанемометричні витратоміри при високоточних вимірюваннях, гідродинамічних випробуваннях та градуванні витратомірів інших типів.
- можливість урахування теплофізичних параметрів вимірюваного середовища як функцій температури і тиску.

Основними недоліками термоанемометрів вважаються недостатня стабільність градування, обумовлена старінням чутливого елемента внаслідок перекристалізації матеріалу і крихкість чутливого елемента. В процесі експлуатації відбувається неминуче окислення термоелектродів, випарювання з

них, дифузія компонентів сплавів, а також інші фізико–хімічні процеси, що призводять до змінення коефіцієнту Зеебека, який визначає чутливість ЧЕ до температури і, як наслідок, змінюються МХ ЗВТ і з’являється додаткова похибка [52, 53]. Ці труднощі, частково, долають шляхом штучного “старіння” ЧЕ та його герметизації [54], що має виключати контакт чутливого елемента з вимірюваним середовищем.

Термоанемометричні методи вимірювання витрати ТС вважають потенціально найбільш точними [8], що можна вважати їх головним достоїнством і широким расповсюдженням при проведенні наукових досліджень у лабораторних умовах. Однак, в реальних умовах ці ЗВТ забезпечують заявлені похибки лише в чистих потоках з незмінними теплофізичними характеристиками та необхідністю очищення ЧЕ від забруднення, що в край обмежує їх використання при натурних вимірах.

1.6 Вихровий метод

Вихровий метод вимірювання витрати заснований на явищі вихроутворення за допомогою гвинтоподібних шнеків або за рахунок обтікання потоком текучого середовища тіл трикутної, циліндричної та інших форм.

Вихрові витратоміри розділяються на три, суттєво відмінні групи:

1. Витратоміри, що мають в первинному перетворювачі нерухоме тіло, при обтіканні якого з обох його сторін поперемінно виникають вихори, що зриваються і створюють пульсації тиску;
2. Витратоміри, в первинному перетворювачі котрих потік закручується та, попадаючи у розширену частину труби, прецесує, створюючи при цьому пульсації тиску;
3. Витратоміри, в первинному перетворювачі котрих, струя, що витікає з отвору, здійснює автоколивання, створюючи також пульсації тиску.

Для дослідження характеристик вихрових витратомірів, окрім числа Рейнольдса (Re), яке характеризує режим течії середовища, служить число або критерій Струхаля (Sh), який характеризує періодичні процеси, що пов'язані з рухом рідини або газу. Критерій Струхаля, який виникає при вивченні обтікання потоком середовища, зокрема, циліндра має вид [7]:

$$Sh = f \cdot d \cdot V^{-1}, \quad (1.6)$$

де f - частота пульсацій тиску газу або рідини в результаті періодичного зриву вихорів, Гц;

d - діаметр циліндра, м;

V - швидкість потоку, м/с.

Оскільки при сталості числа Sh частота f пропорційна V , то вимірюючи цю частоту можна зробити висновок о швидкості V , і, як наслідок, про об'ємну витрату середовища. Для отримання лінійної шкали вихрового витратоміра треба щоб число Sh залишалось постійним у якомога більшому діапазоні чисел Re . Окрім числа Sh використовується число Росбі Ro - відношення осьової та тангенціальної складової швидкості [7]:

$$Ro = V / (\omega \cdot d), \quad (1.7)$$

де ω - кутова швидкість, рад/с.

Числа Ro та Sh зв'язані співвідношенням $Sh = f / (\omega \cdot Ro)$, з якого витікає, що Sh залишається постійним, якщо постійні число Ro і співвідношення f / ω , що і обмежує динамічний діапазон вимірювання.

Перевагами вихрових витратомірів є відсутність рухомих частин, простота та надійність перетворювача расходу, незалежність показників від тиску та температури, лінійність шкали, стабільність показників.

Однак, цим ЗВТ притаманна і низка недоліків і, в першк чергу:

- значна втрата тиску (до 50 кПа);
- обмеження використання при малих швидкостях, по причині важкості вимірювання сигналу, який має малу частоту;
- можливість використання лише для труб з діаметром від 25 мм до 300 мм. Використовувати ці ЗВТ в трубопроводах з великих діаметрів складно, а при малих діаметрах нема стійкого вихроутворення. Оптимальний діапазон їх використання - при $Re < (10^3 - 10^4)$;
- чимало конструкцій цих витратомірів непридатні для вимірювання забруднених та агресивних речовин, яку порушують роботу перетворювачів вихідного сигналу, при цьому границі відносної похибки цих ЗВТ становлять $\pm (1,5 - 2,0) \%$ [7, 8].

1.7 Ультразвуковий метод

Ультразвуковий метод вимірювання витрат використовує [8, 24, 34]:

- залежність швидкості розповсюдження ультразвукової хвилі від швидкості та напрямку потоку вимірюваного середовища;
- зміни, які виникають при відбитті ультразвукової хвилі від неоднорідностей вимірюваного середовища, тобто ефект Доплера.

В основу ультразвукового методу вимірювання витрати ТС першої групи покладено фізичне явище геометричного (векторного) додавання середньої швидкості руху V вимірюваного середовища і швидкості c розповсюдження ультразвукової хвилі у цьому середовищі [24]:

$$V_{\Sigma} = V + c . \quad (1.8)$$

Принципова схема ультразвукового витратоміра (УЗВ) наведена на рис. 1.9.

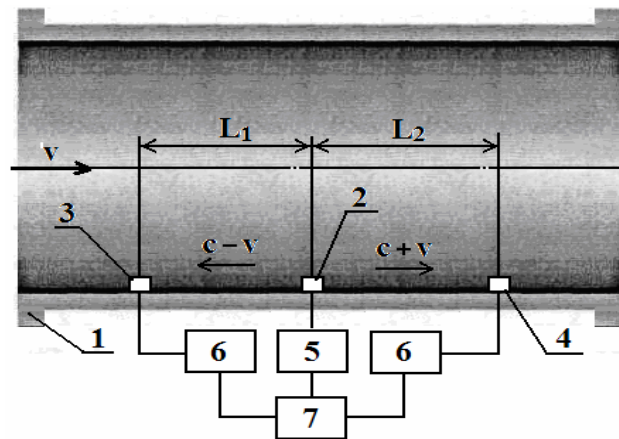


Рисунок 1.9 – Схема витратоміра з послідовним розташуванням п'єзоелементів

Конструктивно УЗВ являє собою відрізок трубопроводу 1, вздовж якого протікає вимірювана речовина, і в якому розташовані п'єзоелементи 2, 3, 4. Генератор ультразвукових коливань 5 збуджує п'єзоелемент 2. Прийняті п'єзоелементами 3 і 4 сигнали перетворюються та перераховуються пристроями 6 і 7 у різницю між часом розповсюдження ультразвукової хвилі проти t_{\downarrow} і вздовж t_{\uparrow} напрямку потоку вимірюваного середовища [34]:

$$\Delta t = t_{\downarrow} - t_{\uparrow} = \frac{L_1}{c - V} - \frac{L_2}{c + V}, \quad (1.9)$$

де L_1 та L_2 – відстані між передавальним та приймальними п'єзоелементами, м.

Оскільки симетричність вимірювальної схеми забезпечити складно, застосовують схему з двома п'єзоелементами і комутатором, який по черзі змінює функції п'єзоелементів (випромінювача та приймача).

У цьому випадку електронна схема витратоміра визначає різницю (1.9) наступним чином [24, 47]:

$$\Delta t = t_{\downarrow} - t_{\uparrow} = \frac{L}{c - V} - \frac{L}{c + V} = \frac{2 \cdot L \cdot V}{c^2} \cdot \frac{1}{1 - \frac{V^2}{c^2}}. \quad (1.10).$$

Якщо прийняти до уваги, що для текучих середовищ $c = (1000 - 1500)$ м/с (Додаток Д), а швидкість потоку $V \sim 10$ м/с, то $\frac{V^2}{c^2} \leq 10^{-4}$, і другим множником у виразі (1.10) завідомо можна знехтувати. Тоді, виразивши швидкість через об'ємну витрату Q (м³/год), отримаємо рівняння вимірювань ультразвукового витратоміра [47]:

$$\Delta t = 2\psi \cdot \frac{L}{S \cdot c^2} \cdot Q, \quad (1.11)$$

де S – площа перерізу потоку, м²;

ψ – коефіцієнт, що враховує розподіл швидкостей у перерізі потоку.

П'єзоелементи 2, 3 (рис. 1.9) у відрізку трубопроводу 1 можна розташувати під кутом θ до напрямку потоку (рис. 1.10) [47].

Тоді за аналогією з (1.10) і (1.11) можна записати

$$\Delta t = t_{\downarrow} - t_{\uparrow} = \frac{L}{c - V \cdot \cos \theta} - \frac{L}{c + V \cdot \cos \theta}. \quad (1.12)$$

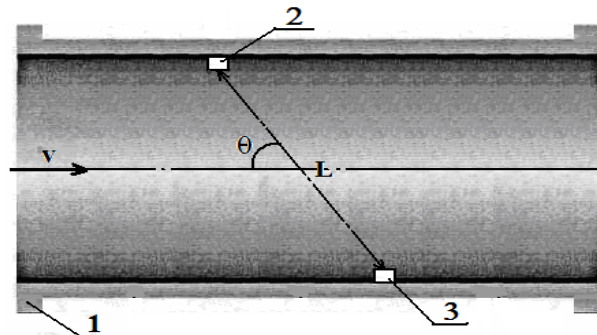


Рисунок 1.10 – Схема витратоміра з двома п'єзоелементами

Розглянуті вище приклади реалізують так званий часово-імпульсний ультразвуковий метод витратометрії [24].

Якщо у формулі (1.12) замість різниці часу Δt розповсюдження ультразвукової хвилі проти і вздовж напрямку потоку вимірюваного середовища ввести різницю фаз $\Delta \varphi$ прийнятих коливань, випромінених проти і вздовж напрямку потоку, то отримуємо так званий фазовий ультразвуковий метод вимірювання [47].

Якщо у формулі (1.12) замість різниці часу Δt ввести різницю частот Δf прийнятих коливань, одночасно випромінених двома генераторами проти і вздовж напрямку потоку, то отримуємо так званий частотний ультразвуковий метод вимірювання [47].

Сутність ультразвукового методу вимірювання витрати речовини, пов'язаного з ефектом Доплера [34, 47] – доплерівського методу, полягає в тому, що у відрізку трубопроводу 1 (рис. 1.11) неперервний сигнал частоти ω_0 з передавача 2, випромінюваний під деяким кутом, відбивається від неоднорідності текучого середовища (пульпа, стічні води тощо) і приймається приймачем 3 як сигнал з частотою ω_D .

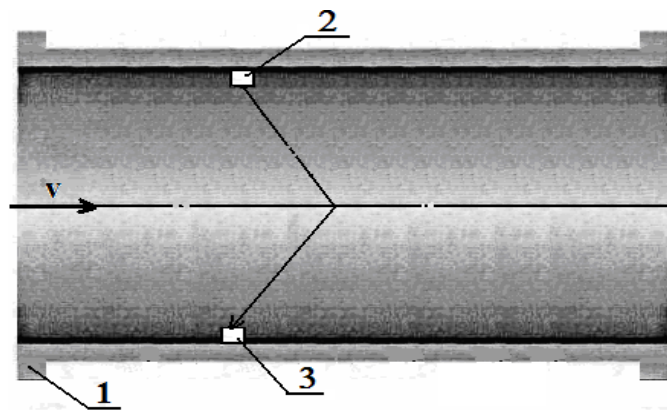


Рисунок 1.11 – Сутність побудови доплерівського витратоміра

В цьому вигляді можна записати вираз для швидкості розсіювача [47]:

$$V = K \cdot \Delta \omega, \quad (1.13)$$

де K – коефіцієнт пропорційності, що залежить від кута нахилу і частоти випромінюваного сигналу;

$$\Delta\omega = \omega_D - \omega_0 - \text{доплерівський зсув частоти сигналу.}$$

Оскільки текуче середовище налічує деяку випадково розташовану сукупність розсіювачів, мова може йти про сукупність прийнятих частот ω_{Di} тобто деякий «доплерівський спектр».

Існує також ультразвуковий метод визначення витрати ТС, заснований на вимірюванні зсуву ультразвукової хвилі, спрямованої перпендикулярно до напрямку потоку, вимірюваним потоком [8, 34]. Цей зсув залежить від швидкості вимірюваної речовини. Акустичні коливання випромінює один п'єзоелемент, а приймає одним або два п'єзоелементи. Такий метод забезпечує достатній рівень чутливості, але точність вимірювання безпосередньо пов'язана зі станом поверхонь труби, що відбиває випромінення.

Переваги ультразвукових витратомірів полягають у наступному [8]:

- теоретично необмежений діапазон вимірювань;
- невисока похибка ультразвукових витратомірів - $\pm (0,5 - 2,5)\%$.
- можливість застосування витратомірів для вимірювальних трубопроводів (ВТ) великих діаметрів;
- висока надійність первинного перетворювача, зумовлена відсутністю рухомих частин;
- висока надійність приймально–передавальних елементів;
- можливість безконтактного вимірювання будь–яких ТС;
- здатність відстежувати швидкі зміни швидкості потоку, що забезпечує можливість вимірювання витрат потоків з частотою пульсацій до 10 кГц;
- відсутність викривлень потоку вимірюваного середовища та втрати тиску, зумовлені відсутністю виступаючих елементів у вимірювальному каналі;
- стабільність метрологічних і експлуатаційних характеристик протягом тривалого часу;

- висока чутливість, яка може забезпечити основну приведену похибку, що не перевершує десятих часток проценту при умові індивідуального градування;
- можливість вимірювання реверсивних потоків;
- можливість визначення додаткових параметрів потоку (густини, швидкості звуку і т.д.).

Слід відмітити, що оскільки чутливість ультразвукових витратомірів залежить від відношення V/c , можна вважати, що ці ЗВТ більш придатні до вимірювання витрати газів, але акустичний опір газів невеликий, тому ультразвуковим коливанням важко передати енергію, необхідну для переносу хвилі від випромінювача до приймача.

До недоліків розглянутих ультразвукових витратомірів слід віднести [47]:

- залежність швидкості розповсюдження ультразвуку від фізико-хімічних характеристик вимірюваного середовища, зокрема від його густини, яка є мінливою зі зміною тиску, температури, складу, концентрації компонентів вимірюваних речовин, що треба компенсувати або враховувати при обробці результатів вимірювань;
- залежність показів від числа Рейнольдса, обумовлену тим, що вимірюється не дійсна середня швидкість потоку, а середня його швидкість вздовж лінії випромінювання ультразвуку;
- паразитні сигнали, які утворюються за рахунок появи ревербераційної хвилі внаслідок відбиттів ультразвуку від границь звукопроводів (п'єзоелементів) і вимірюваного середовища;
- похибки вимірювання, що виникають при обчисленні різниці часів переміщення сигналів вздовж і проти напрямку потоку, які обумовлені асиметрією акустичних каналів, зокрема, в двоканальних витратомірах;
- чутливість до спотворень структури потоку, викликані наявністю місцевих опорів (МО);
- невеликий досвід практичної експлуатації, відсутність статистики з довготривалої стабільності;
- недостатньо розвинута нормативна база;

– відсутність метрологічного забезпечення (калібрування, повірки) УЗВ природного газу великих калібрів ($DN > 300$ мм).

Таким чином, виконаний аналіз метрологічних та експлуатаційних характеристик найбільш перспективних методів, побудованих на їх основі засоби вимірювальної техніки, вимірювання витрати різних середовищ, дозволяє побудувати відповідну порівняльну таблицю 1.1, з їх основними характеристиками.

Представлені в таблиці 1.1 результати, а також, беручи до уваги суттєві вищезазнані переваги перед іншими ЗВТ, можна зробити висновок про перспективність цього методу в плані можливості створення на його основі сучасного національного витратоміру природного газу та витратоміру рідини з високими метрологічними характеристиками.

1.8 Алгоритмічні методи оброблення вимірювальної інформації ультразвукового методу вимірювання витрати

Аналіз розглянутих у п.п. 1.1 – 1.7 методів вимірювання витрати текучого середовища і загальних характеристик витратомірів, які реалізують ці методи і зведені у табл. 1.1, а також узагальнень та висновків, наведених в джерелах [9, 10, 55], дає змогу зробити проміжний висновок, що за сукупністю порівняльних характеристик, як відмічалось вище, найбільш перспективним для розроблення пристроїв вимірювання і обліку витрати текучого середовища будь-якого виду у широких діапазонах витрат, діаметрів трубопроводів, тисків, температур, а також зміни швидкостей потоку є ультразвуковий метод.

Але, при цьому слід мати на увазі, що даний метод вимірювання витрати текучого середовища, на відміну від багатьох інших, для отримання кінцевого результату вимірювання передбачає застосування алгоритмічних методів оброблення даних з виходу первинного перетворювача. Із виразу (1.8) результат вимірювання – об'ємна витрата – визначається як функція об'єкта

Таблиця 1.1 - Характеристики основних методів вимірювання витрат

Характеристика	Методи вимірювання витрат					
	Рідини, гази, пара	Рідини	Рідини, газ, пара	Рідини, газ	Рідини, газ	Рідини, газ
Вид вимірюваного середовища	Рідини, газ, пара	Рідини	Рідини, газ, пара	Рідини, газ	Рідини, газ	Рідини, газ
Діапазон витрат, м ³ /год	10 ⁻⁴ -2·10 ⁴ ; 3·10 ⁻¹ -8·10 ⁴	10 ⁻² -10 ⁵	3·10 ⁵	3·10 ⁻¹ -10 ⁴ ; 20-3·10 ⁴	50-250; 0,05-1200**	3·10 ⁻⁴ -7·10 ² ; 3-2·10 ⁴
Діапазон діаметрів трубопроводів, мм	10-4000	2-3000	10-4000 та більше	4-4000	0,5-100(300)	25-300
Діапазон тисків, МПа	до 100	до 2,5 (20)	до 4	до 70 (250)	до 2 (10)	до 4 (6,3)
Діапазон температур, °С	до 400	до 230	-40-200 (-250-250)	-240-550 (700)	до 250	-50-400 (-270-450)
Діапазон вимірювань	3:1	100:1	100:1	100:1	1500:1	12:1; 40:1
Досягнута відносна похибка, %	±(1,5-2,5) ±(0,5-1,0)*	±(0,5-1,0)	±(1,0-2,5) ±(0,5-1,0)*	±(0,5-1,0)	±(0,10-0,3)*	±(0,5-1,0)
Вплив ІПП на результати вимірювань	+	-	-	+	+	+

* при індивідуальній агестації або градуюванні

** масова витрата, перерахована до нормальних умов

вимірювання – різниці часу Δt розповсюдження ультразвукової хвилі проти t_{\downarrow} і вздовж t_{\uparrow} напрямку потоку вимірюваного середовища:

$$Q = \Delta t \cdot \left(\frac{S}{2} \cdot \psi \cdot L \right) \cdot c^2, \quad (1.14)$$

Оскільки об'єм речовин, а особливо газів, залежить від тиску і температури [10, 56], для одержання порівняльних значень результати вимірювань призводять до нормальних умов з використанням нормативних документів [27–31, 46] і нескладних відомих формул (Додаток В), які, до речі, не завжди забезпечують вирішення таких завдань у повному обсязі [9, 17].

Одиниці маси:

$$M = Q \cdot \gamma, \quad (1.15)$$

де γ – питома вага вимірюваної величини, $\text{кг}/\text{м}^3$, дають більш повні відомості про кількість або витрату речовини, ніж одиниці об'єму.

Для доплерівських витратомірів об'ємна витрата визначається як

$$Q_D = S \cdot V, \quad (1.16)$$

де V – середня швидкість потоку, що обчислюється за рівнянням, аналогічним (1.14), в якому замість доплерівського зсуву $\Delta\omega$ використано оцінку $\Delta^* \omega$ «центру тяжіння» «доплерівського спектру» (рис. 1.12) – сукупність частот ω_{Di} , отриманих приймачем від випадково розташованої в вимірюваній речовині сукупності розсіювачів.

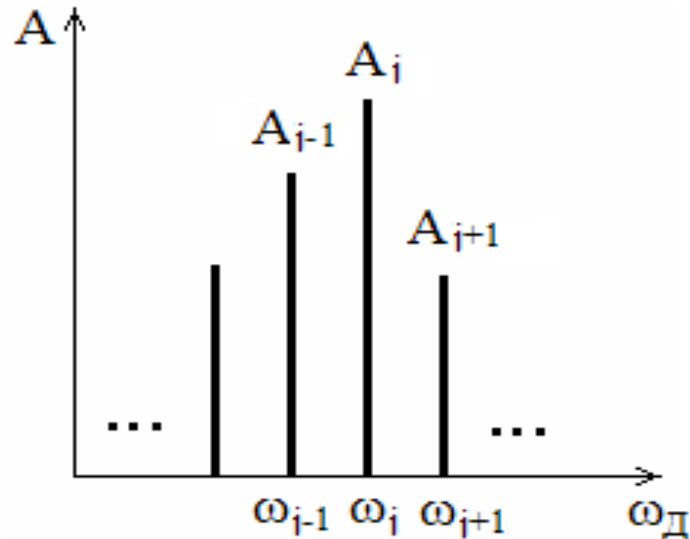


Рисунок 1.12 – «Доплерівський спектр»

Виникає завдання, аналогічне завданню визначення оцінки центру розподілу дискретної випадкової величини (математичного сподівання) за гістограмою, побудованою за результатами вимірювального експерименту [57].

Через невизначеність результатів вимірювання алгоритм такого оцінювання потребує дослідження. Масову витрату для доплерівських витратомірів розраховують за виразом (1.13).

Відмітимо, що особливістю ультразвукового методу як предметної галузі є достатньо глибоке опрацювання процедур оброблення даних первинних перетворювачів, що використовують залежність швидкості розповсюдження ультразвукової хвилі від швидкості та напрямку потоку вимірюваного середовища, і недостатньо повна відпрацьованість питань розроблення алгоритмів оброблення даних, отриманих від перетворювачів, заснованих на ефекті Доплера.

Автоматизований облік витрати текучого середовища передбачає використання даних, отриманих за виразами (1.11) - (1.13), та їх оброблення у відповідності зі спеціальними алгоритмами, не пов'язаними безпосередньо з розглянутими вище, і застосування для оброблення даних та подання результатів сучасних інформаційних технологій [12, 58, 59].

Таким чином, розробка нових або удосконалення існуючих спеціальних алгоритмів є також однією із задач досліджень роботи.

1.9 Висновки по розділу 1

Серед проаналізованих методів вимірювання витрати текучого середовища у закритих каналах, що використовують різноманітні фізичні явища та ефекти, реалізовані у великій кількості витратомірів, можна виділити, як найбільш перспективний ультразвуковий метод. Його основними перевагами є можливість вимірювання будь-яких ТС, теоретично необмежений діапазон вимірювань, висока надійність первинного перетворювача, стабільність метрологічних і експлуатаційних характеристик протягом тривалого часу. У той же час, існує перспектива покращання метрологічних, надійностних і технічних характеристик УЗВ. Це обумовлює наступні висновки і низку завдань наступних досліджень:

1. Особливості ультразвукового методу, який використовує залежність швидкості розповсюдження акустичної хвилі від швидкості та напрямку потоку вимірюваного середовища, пов'язані з можливістю подовження шляху розповсюдження, визначають доцільність його удосконалення з метою зменшення основної похибки вимірювання за рахунок підвищення точності вимірювання різниці часу проходження зондуючого сигналу проти і вздовж потоку.

2. Особливості ультразвукового методу, заснованого на ефекті Доплера, який використовує зміни, що виникають при відбитті ультразвукової хвилі від неоднорідностей вимірюваного середовища, визначають доцільність їх удосконалення з метою зменшення основної похибки вимірювання за рахунок визначення середньої швидкості розсіювачів (неоднорідностей).

3. Можливість реалізації витратомірів, побудованих на основі удосконаленого ультразвукового методу вимірювань, потребує розроблення

науково–технічної бази системи вимірювання та обліку витрати текучого середовища, зокрема, автоматизованої.

4. Автоматизований облік витрат рідин, газів, пари потребує використання таких ЗВТ, які могли б забезпечити адаптацію до конкретних умов застосування, що визначає ще одне із завдань дослідження – розробки нових або удосконалення існуючих спеціальних алгоритмів, інформаційних технологій: сукупності елементної бази, персональних комп'ютерів, відповідного програмного забезпечення, мережного обладнання, тощо, які реалізують ефективні методи обробки даних, для побудови сучасної системи автоматизованого обліку.

5. До основних характеристик, які треба враховувати при розробці або виборі витратоміра текучого середовища, відносять: галузь застосування, діапазони вимірювань витрат, діапазон діаметрів трубопроводів, в яких необхідно виконувати вимірювання; діапазони зміни швидкостей потоку, діапазон робочих температур, тисків; чутливість границі похибок вимірювання, що допускаються. Додатково можуть встановлюватися такі вимоги: витратомір, що вбудовується в канал транспортування ТС, не повинен впливати на характеристики потоку, результати вимірювань; можливість інтегруватися в систему управління і контролю, у тому числі автоматизовану; калібрування (півірка) витратоміра повинна забезпечуватися наявною в Україні метрологічною базою.

Все це обумовлює необхідність вирішення завдань метрологічного дослідження УЗВ, реалізуючих удосконалені методи вимірювання, і оцінювання їх метрологічних характеристик, що дасть змогу сформулювати рекомендації щодо доцільності та галузей їх застосування.

1.10 Постановка задачі для дисертаційного дослідження

На основі проведеного аналізу існуючих методів і засобів вимірювання витрати текучого середовища, враховуючи переваги та недоліки проаналізованих методів його вимірювання у закритих каналах, що використовують різноманітні фізичні явища та ефекти, реалізовані у великій кількості витратомірів, можна сформулювати наступні задачі для дослідження:

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

2. Удосконалити ультразвуковий метод, який використовує ефект Доплера та існуючі алгоритми оброблення даних з виходу первинного перетворювача УЗВ для вимірювання витрати текучого середовища, що забезпечить підвищення точності і надійності вимірювання витрати цими ЗВТ.

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

4. Розробити методику калібрування ультразвукових витратомірів в діапазоні витрат, що перевищує верхню гранцю існуючих витратовимірювальних установок та розробити методику дослідження похибки ультразвукових витратомірів в умовах спотвореної структури потоку. Провести порівняльний аналіз методик оцінювання метрологічних характеристик УЗВ.

РОЗДІЛ 2

УДОСКОНАЛЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОГО МЕТОДУ ТА ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ І ВИТРАТОМІРІВ ТЕКУЧИХ СЕРЕДОВИЩ

Практика розроблення, дослідження та застосування ультразвукових витратомірів [10, 60, 61], рівень розвитку елементної бази, зокрема інтегральної, а також обчислювальної техніки забезпечують можливість створення багатоцільових ЗВТ, які можуть працювати в автоматизованих вимірювальних системах [7, 12].

У розділі розглянуті вільні від недоліків, перелічених у п.п. 1.1.3, часово – імпульсні та доплерівський витратоміри, побудовані на базі ультразвукового методу, що можуть бути реалізованими у вигляді структури, поданої на рис. 1.1. При цьому вважається, що передавальні і приймальні або приймально–передавальні перетворювачі електроакустичні (ПЕА) розміщені під кутом до потоку вимірюваної речовини і утворюють один, два або декілька акустичних каналів.

Загальна похибка ультразвукового методу достатньо глибоко проаналізована при розгляді питань витратометрії [8, 61], а також при застосуванні в інших галузях, наприклад, при моделюванні процесів обробки сигналів у радіолокації та радіонавігації [62]. Це визначило підхід до розгляду цього питання в даному розділі: оскільки теплофізичні параметри ТС в реальних умовах експлуатації змінюються при змінненні температури і тиску і, як слідство, приводять до додаткових похибок при виконанні вимірювань, вважається, що витратоміри, які розглядаються, працюють в ідеальних умовах, що обумовлює можливість урахування при обговоренні конкретного технічного рішення тільки основної складової похибки вимірювання [63].

Основна складова похибки ультразвукового методу вимірювання витрат за формулою (1.14) у відсотках, визначається як сумарна похибка перетворення сигналу в вимірювальному каналі (тракті) [63 - 65], тобто сума похибок об'єкта

вимірювання (ОВ) – похибки різниці часу Δt розповсюдження ультразвукової хвилі проти t_{\downarrow} і вздовж t_{\uparrow} напрямку потоку вимірюваного середовища (середньої швидкості V потоку), похибки геометрії корпусу УЗВ (похибки визначення площини перетину вимірювальної ділянки УЗВ, кута нахилу акаустичного каналу, довжини акустичного каналу), поправочного коефіцієнту розподілу швидкості у перерізі потоку (коефіцієнту профілю потоку), а також, похибки визначення швидкості ультразвуку в середовищі:

$$\delta_Q = \sqrt{\delta_{\Delta t}^2 + \delta_S^2 + \delta_{\theta}^2 + \delta_L^2 + \delta_{\psi}^2 + 4 \cdot \delta_C^2}, \% \quad (2.1)$$

де δ_Q – основна відносна похибка вимірювання витрат, %;

$\delta_{\Delta t}$ – відносна похибка визначення різниці часу розповсюдження сигналу, %;

δ_S , – відносна похибка визначення площини перетину вимірювальної ділянки УЗВ, %;

δ_{θ} – відносна похибка визначення кута нахилу акаустичного каналу, %;

δ_L – відносна похибка визначення довжини акустичного каналу, %;

δ_{ψ} – відносна похибка визначення коефіцієнту профілю потоку, %;

δ_C – відносна похибка визначення швидкості ультразвуку, %.

Виконаний аналіз сучасної літератури, нормативних документів, європейських стандартів та рекомендацій [66, 67], а також, досвіду багатолітньої експлуатації УЗВ [68] показав, що внесок наведених похибок в основну відносну похибку вимірювання витрат (2.1) має розподіл, відображений на рисунку 2.1.

З гістограми видно, що:

- відносна похибка визначення внутрішнього діаметру D , а значить, площини перетину вимірювальної ділянки УЗВ, складає приблизно 0,075%;

- відносна похибка визначення кута нахилу акаустичного каналу θ складає приблизно 0,03%;
- сумарна частка відносної похибки визначення різниці часу розповсюдження сигналу та коефіцієнту профілю потоку досягає 0,25%;
- сумарна частка похибки визначення довжини акустичного каналу не перевищує 0,05%.

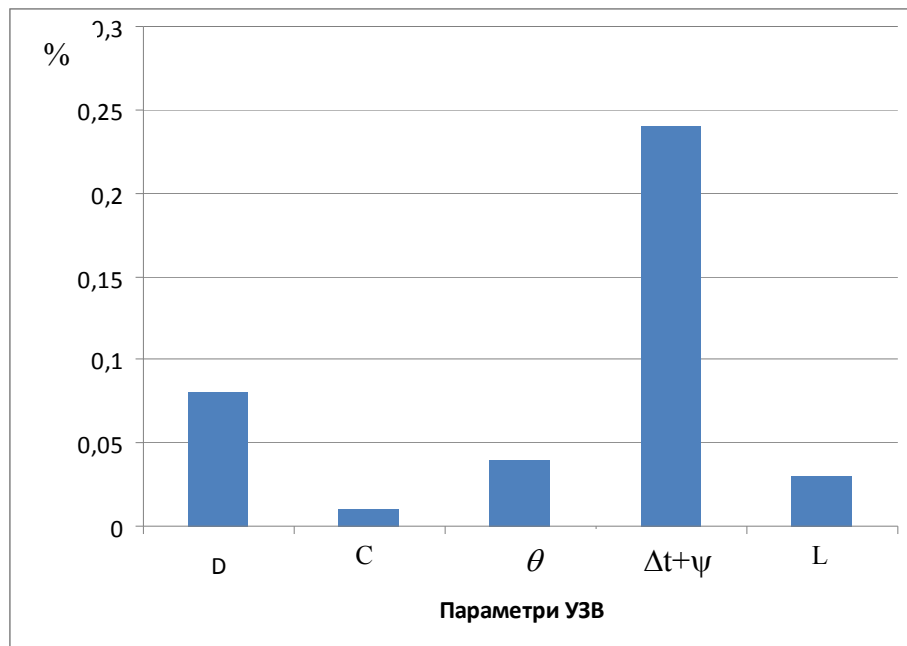


Рисунок 2.1 – Значення складових сумарної відносної похибки вимірювань УЗВ

Таким чином, на основі виконаного аналізу можна зробити висновок, що покращення метрологічних характеристик УЗВ можливе. в першу чергу, за рахунок зменшення складової в основну похибку вимірювання, яка обумовлена похибками вимірювання різниці часу Δt розповсюдження ультразвукової хвилі проти і вздовж напрямку потоку, а також, середньої швидкості V потоку вимірюваного середовища, точність визначення якої обумовлена поправочним коефіцієнтом розподілу швидкості у перерізі потоку (коефіцієнтом ψ профілю потоку).

Тому, подальші розділи роботи присвячені рішенням задачі покращення метрологічних характеристик УЗВ за рахунок зменшення цієї складової похибки вимірювання.

2.1 Удосконалення часово-імпульсного ультразвукового методу вимірювання витрати текучого середовища

Принцип роботи часово-імпульсного ультразвукового методу, як відмічалось ранише, базується на вимірюванні часу проходження ультразвукових імпульсів в прямому і зворотньому напрямках руху вимірюваного середовища у трубопроводі. При наявності витрати середовища в трубопроводі здійснюється складання векторів швидкості ультразвукових коливань і середньої швидкості потоку середовища, що призводить до зміни часу розповсюдження цих коливань між випромінювачами, встановленими в корпусі УЗВ. При цьому, за напрямком руху середовища цей час розповсюдження зменшується, а проти руху середовища – збільшується.

Витратоміри, що реалізують часово-імпульсний ультразвуковий метод, розрізняють:

- за кількістю акустичних каналів – на одноканальні, двоканальні та багатоканальні;
- на конфігурацією акустичних каналів:
 - на витратоміри з діаметральним або радіальним розташуванням каналів (при перетині потоку в одній площині);
 - на витратоміри з Z-, V-, W-, Δ -схемою акустичних каналів (по робочому розташуванню каналів відносно осі трубопроводу).

З метою удосконалення часово-імпульсного ультразвукового методу вимірювання текучого середовища виникає необхідність аналізу існуючих моделей витратомірів та розробки рішень і моделей з покращеними характеристиками.

2.1.1 Математична модель ультразвукового одноканального вимірювального перетворювача швидкості плинних середовищ

Одноканальний часово-імпульсний ультразвуковий метод вимірювання витрати текучого середовища передбачає декілька варіантів реалізації акустичного каналу [24, 34, 50].

На рис. 2.2 наведено первинний перетворювач (ПП) ультразвукового витратоміра [47], акустичний канал якого утворений накладними приймально-передавальними ПЕА, розміщеними у так званій Z-схемі під деяким кутом $\alpha_{ТС}$ до осі трубопроводу завдяки призмам.

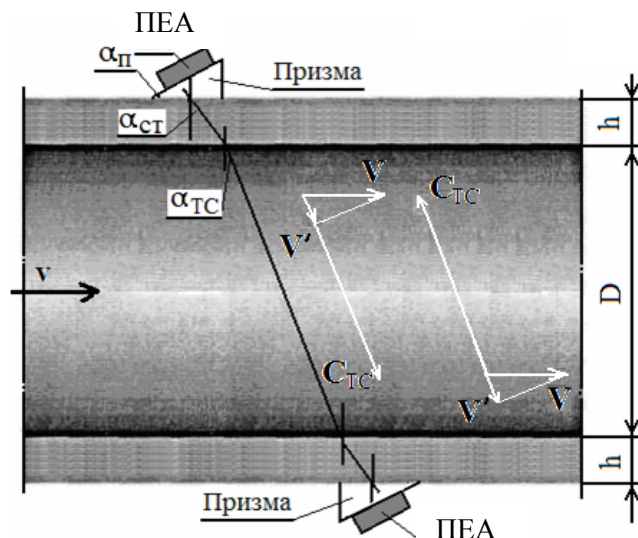


Рисунок 2.2 – Первинний перетворювач УЗВ із Z-схемою акустичного каналу

Безперечною перевагою накладних ПЕА є те, що, по-перше, вони не порушуються цілісність трубопроводу, а, по-друге - в потік вимірюваного середовища не вноситься ніяка перешкода.

ПЕА працюють по черзі в режимі передавання або приймання акустичного сигналу. Швидкість поширення сигналу $C_{ТС}$ геометрично складається зі швидкістю V потоку (рис. 2.2).

Сигнал перетинає трубопровід, проходячи відстань $L = D/\cos \alpha_{TC}$. Час поширення сигналу вздовж потоку в припущенні, що вимірюване середовище, наприклад, рідина тече зліва направо, можна записати у вигляді [69]:

$$t_{\uparrow} = 2 \cdot (t_{\Pi} + t_{CT}) + \frac{D}{\cos \alpha_{TC} \cdot (C_{TC} + V \cdot \sin \alpha_{TC})} \quad (2.2)$$

де t_{Π} – час поширення ультразвуку в призмі, с;

t_{CT} – час поширення ультразвуку в стінці трубопроводу с;

C_{TC} – швидкість розповсюдження ультразвуку в ТС (Додаток Д).

Аналогічно, час поширення сигналу проти потоку можна обчислити за формулою:

$$t_{\downarrow} = 2 \cdot (t_{\Pi} + t_{CT}) + \frac{D}{\cos \alpha_{TC} \cdot (C_{TC} - V \cdot \sin \alpha_{TC})}. \quad (2.3)$$

Взявши різницю $\Delta t = t_{\downarrow} - t_{\uparrow}$ і вирішивши рівняння відносно V , отримаємо:

$$V = \frac{\frac{C_{TC}}{\sin \alpha_{TC}} (t_{\downarrow} - t_{\uparrow})}{t_{\downarrow} + t_{\uparrow} - 4 \cdot (t_{\Pi} + t_{CT})}. \quad (2.4)$$

У відповідності до закону Снелліуса [70]:

$$\frac{C_{TC}}{\sin \alpha_{TC}} = \frac{C_{\Pi}}{\sin \alpha_{\Pi}} = f(\alpha_{\Pi}, C_{\Pi}) = const. \quad (2.5)$$

Тут C_{Π} – швидкість ультразвуку в матеріалі призми, м/с;

α_{Π} – кут між вертикаллю і напрямком вводу ультразвукових коливань в стінку трубопроводу, який дорівнює куту призми, град.

Відповідно до (2.3) та (2.5) остаточно математична модель (рівняння вимірювань) представимо у вигляді:

$$V = \frac{f(\alpha_{II}, C_{II}) \cdot (t_{\downarrow} - t_{\uparrow})}{t_{\downarrow} + t_{\uparrow} - 4 \cdot (t_{II} + t_{CT})}. \quad (2.6)$$

Із отриманої математичної моделі одно каналного УЗВ витікає, що результат вимірювання:

- по-перше, не залежить від швидкості розповсюдження ультразвуку C_{TC} в вимірюваному середовищі;

- по-друге, оскільки кут призми α_{II} при експлуатації не змінюється, то f , а значить і V , залежать тільки від швидкості ультразвуку C_{II} в матеріалі призми (в призмі, виготовленій з полістиролу, зміна C_{II} в робочому діапазоні температур від 0°C до 50°C не перевищує 0,25% [71]);

- і, в третє, величина V визначається тільки результатами вимірювання часових інтервалів.

Витрату рідини Q , м³/год, згідно (2.6) можна розрахувати за наступною формулою [34, 72]:

$$Q = 900 \cdot S_G \cdot D^2 \cdot V, \quad (2.7)$$

де S_G – величина, зворотно пропорційна гідродинамічному коефіцієнту, який залежить від профілю швидкостей.

Таким чином, основна похибка вимірювання витрати Q середовища визначається відносною похибкою вимірювання швидкості рідини δ_V , яка, в свою чергу згідно з (2.6), обумовлена кінцевою роздільною здатністю θ вимірювача часових інтервалів:

$$\delta_v = \theta / \Delta t . \quad (2.8)$$

Різниця Δt часів розповсюдження сигналів вздовж і проти потоку прямо пропорційна довжині шляху поширення сигналів. Тому при малих діаметрах трубопроводу необхідно довжину шляху поширення сигналу збільшувати. На рис. 2.3 наведено приклади розміщення ЕП у V-спосіб (рис. 2.3, а) та у W-спосіб (рис. 2.3, б), які дозволяють збільшити довжину акустичного каналу.

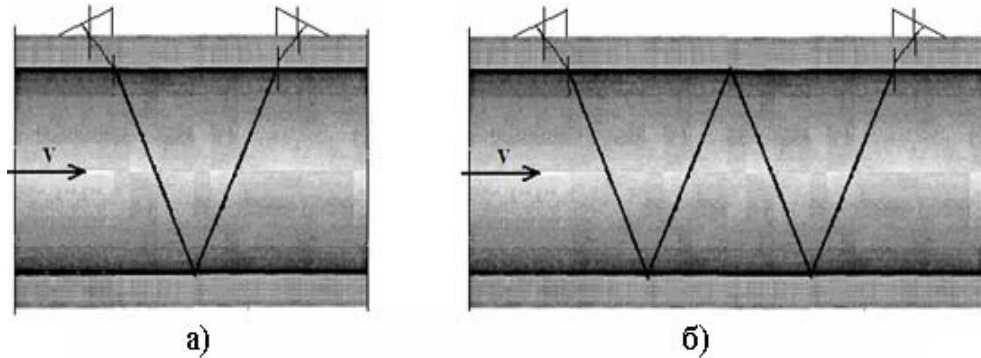


Рисунок 2.3 –Варіанти збільшення довжини акустичного каналу

Розглянуті приклади побудови одноканальних первинних перетворювачів передбачають діаметральне розташування п'єзоелементів акустичного каналу по різні боки труби (рис. 2.2) або з одного боку труби (рис. 2.3); рівняння вимірювань (2.6) залишається незмінним.

Для оцінювання залежності точності визначення швидкості потоку середовища від довжини акустичного каналу розглянуто базисну конструкцію витратоміру, в якій ПЕА (А і В) врізані в стінки вимірювальної ділянки трубопроводу (рис. 2.4)

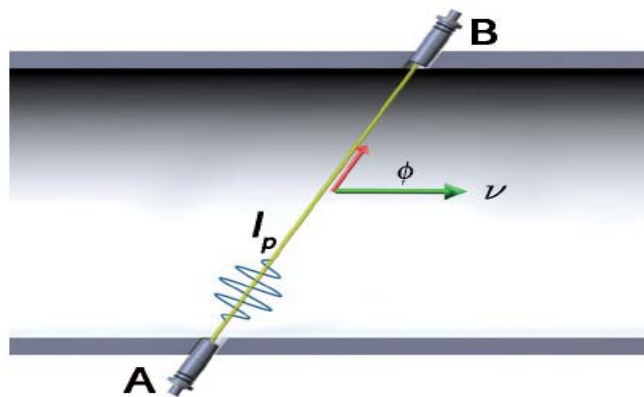


Рисунок 2.4 – Базисна конструкція витратоміру

В умовах нульової витрати час проходження ультразвукового імпульсу від ПЕА А до ПЕА В (t_{\uparrow}) дорівнює часу проходження від ПЕА В до ПЕА А (t_{\downarrow}). Але в умовах присутності потоку час проходження ультразвукового імпульсу у напрямку від А до Б скорочується, а у зворотньому напрямку – збільшується. Тоді різниця між часом розповсюдження сигналів проти і вздовж напрямку потоку вимірюваного середовища описується виразом [69, 70]:

$$\Delta t = t_{\downarrow} - t_{\uparrow} = \frac{L}{c - V \cos \varphi} - \frac{L}{c + V \cos \varphi} \quad (2.9)$$

Даний вираз підтверджує висновок про те, що різниця Δt часів розповсюдження сигналів вздовж і проти потоку прямо пропорційна довжині шляху поширення сигналів. Тому для витратомірів з багаторазовим відбиттям ультразвукового випромінювання (для Z-, V-, W- схем розташування акустичних каналів) вираз (2.9) приймає вигляд:

$$\Delta t_n = t_{\downarrow} - t_{\uparrow} = \frac{n \cdot L}{c - V \cdot \cos \varphi} - \frac{n \cdot L}{c + V \cdot \cos \varphi} = n \cdot \left(\frac{L}{c - V \cdot \cos \varphi} - \frac{L}{c + V \cdot \cos \varphi} \right) \quad (2.10)$$

де n – кількість відбиттів ультразвукового випромінювання.

З урахуванням (2.8) та (2.10):

$$\delta_{Vn} = \theta / \Delta t_n = \theta / n \Delta t \quad (2.11)$$

Таким чином, можна зробити висновок про зворотно-пропорційну залежність відносної похибки вимірювання швидкості середовища δ_V (а значить, і витрати δQ) від кількості відбиттів ультразвукового

випромінювання, тобто, із збільшенням кількості відбиттів похибка вимірювання швидкості середовища зменшується на їх кількість.

На рисунку 2.5, 2.6 наведені графіки залежності похибки вимірювання швидкості руху середовища δ_{v_n} від n (рис. 2.5) та від θ для різної кількості відбиттів n (рис. 2.6):

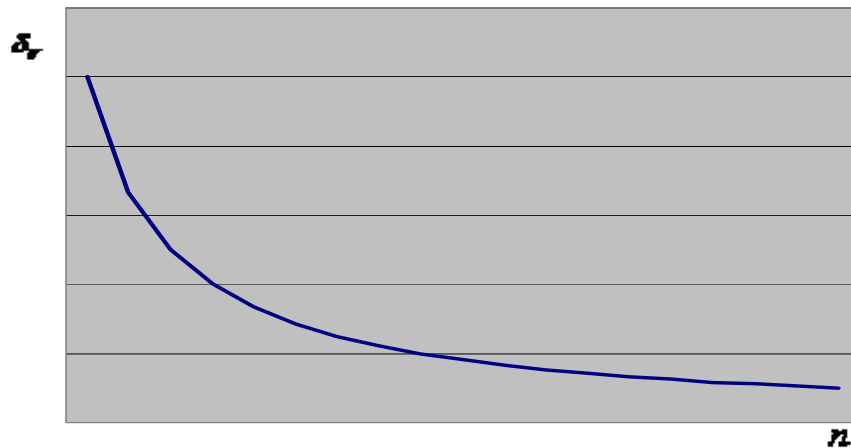


Рисунок 2.5 – Графік залежності похибки вимірювання швидкості руху середовища від кількості відбиттів

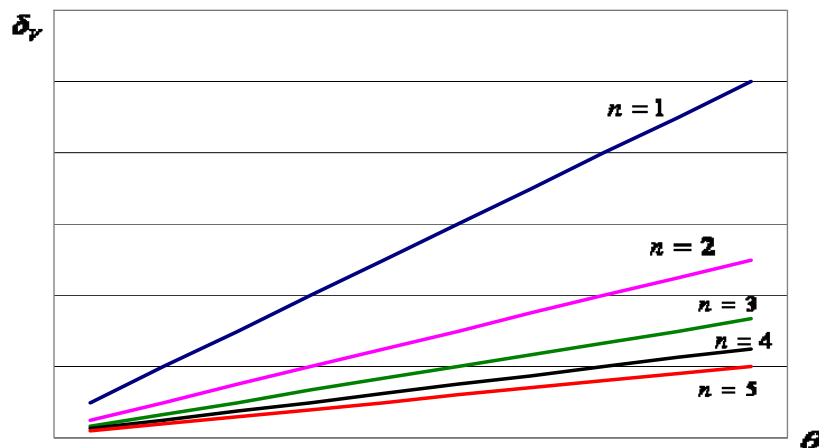


Рисунок 2.6 – Графіки залежності похибки вимірювання швидкості руху середовища для різної кількості відбиттів

Наведений вище висновок підтверджується виведенням залежності відносної похибки вимірювання витрати середовища δQ_n від часу

розповсюдження сигналу Δt .

Із (2.9) неважко отримати рівняння для вимірювання витрати середовища в залежності від часових інтервалів у вигляді:

$$Q = \frac{L \cdot S}{2 \cos \varphi} \cdot \left(\frac{1}{t_{\uparrow}} - \frac{1}{t_{\downarrow}} \right) = \frac{L \cdot S}{2 \cos \varphi} \cdot \left(\frac{\Delta t}{t_{\uparrow} \cdot t_{\downarrow}} \right) \quad (2.12)$$

Слід звернути увагу, що в рівнянні (2.12) відсутній вираз для швидкості ультразвуку. Це означає, що вимірювання швидкості руху та витрати середовища УЗВ не залежить від його властивостей - тиску, температури, складу.

Залежність відносної похибки вимірювання витрати середовища δQ_n від часу розповсюдження сигналу Δt згідно (2.12) має вигляд:

$$\delta Q_n = \frac{\partial Q_n}{\partial \Delta t} = \frac{L \cdot S}{2 \cos \varphi} \cdot \frac{1}{t_{\uparrow} \cdot t_{\downarrow}} \quad (2.13)$$

Для витратоміру з багаторазовим відбиттям ультразвукового випромінювання дана залежність приймає вигляд:

$$\delta Q_n = \frac{\partial Q_n}{\partial \Delta t} = \frac{n \cdot L \cdot S}{2 \cos \varphi} \cdot \frac{1}{n^2 \cdot t_{\uparrow} \cdot t_{\downarrow}} = \frac{\delta Q}{n}, \quad (2.14)$$

що підтверджує раніше зроблений висновок (2.11) про те, що відносна похибка вимірювання швидкості потоку та витрати середовища УЗВ обумовлена похибкою вимірювання часу розповсюдження ультразвукового сигналу і може бути зменшена у кількість разів, яка дорівнює кількості відбиттів цього сигналу у трубопроводі.

2.1.2 Математична модель одноканального ультразвукового вимірювального перетворювача з хордовим розташуванням акустичного каналу

У первинних перетворювачах ультразвукових витратомірів застосовують також хордове розташування акустичного каналу, що дає змогу підвищити відношення сигнал/шум і покращити чутливість первинного перетворювача [73].

Для симетричних відносно осі труби потоків рідини зондування, виконане по хорді, яка віддалена від осі труби на половину радіуса, практично повністю усуває гідродинамічну похибку; якщо немає впевненості у симетричності потоку, то аналогічний ефект дає зондування по декільком хордам, що не лежать в одній площині [14]. За рахунок спеціальної орієнтації ПЕА у просторі можна забезпечити багаторазове відбиття сигналу від стінок труби, тобто подовжити шлях поширення акустичного сигналу.

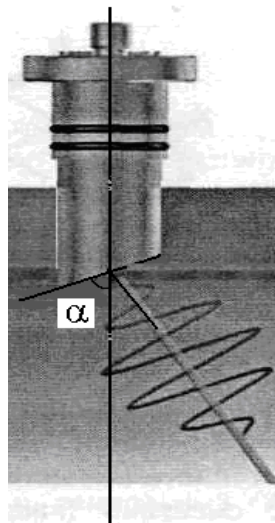


Рисунок 2.7 – Схема розташування ПЕА

Приймально–передавальні електроакустичні перетворювачі встановлюють так (рис. 2.7), щоб центри їхніх випромінюючих поверхонь знаходилися на одному рівні з внутрішньою поверхнею труби; випромінююча поверхня ПЕА орієнтована під кутом $\alpha = (30 - 60)^\circ$ до його повздовжньої осі [73].

Проекція нормалі до випромінюючої поверхні кожного з ПЕА на горизонтальну поверхню, яка проходить через вісь трубопровода (рис. 2.8), утворює з його віссю кут

$$\beta = \arccos \sqrt{1 - \frac{1}{3 \cdot \operatorname{ctg}^2 \alpha}}, \quad (2.15)$$

а шлях, що проходить акустичний сигнал між центрами встановлення ПЕА, становить

$$R = 3 \cdot L = 3 \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{D}{4} \cdot \sqrt{3 \cdot \operatorname{ctg}^2 \alpha - 1}, \quad (2.16)$$

де L – відстань вздовж осьової лінії труби між центрами двох відбиваючих областей на внутрішній поверхні трубопровода або між центром області відбиття і віссю ПЕА, м;

D – внутрішній діаметр трубопровода, м.

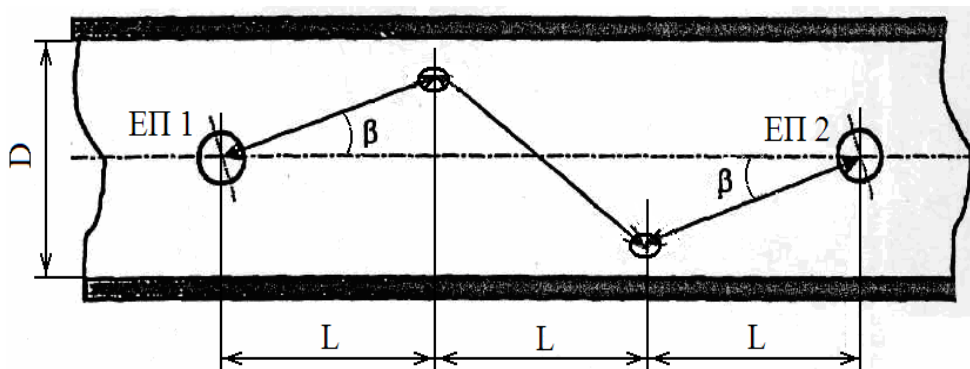


Рисунок 2.8 – Шлях акустичного сигналу вздовж внутрішньої поверхні труби

Таке розташування ПЕА (його називають також дельта-схемою) забезпечує акустичний зв'язок між електроакустичними перетворювачами по трьом хордам і, як результат, покращання чутливості УЗВ [14, 73]. Електроакустичні перетворювачі працюють по черзі в режими передавання або приймання акустичного сигналу. Сигнал перетинає трубопровід, проходячи відстань R , м.

На рис. 2.9 наведено приклад акустичного каналу, зонduючий сигнал якого спрямований вздовж напрямку потоку ТС. Швидкість поширення сигналу $C_{ТС}$ геометрично складається зі швидкістю V потоку.

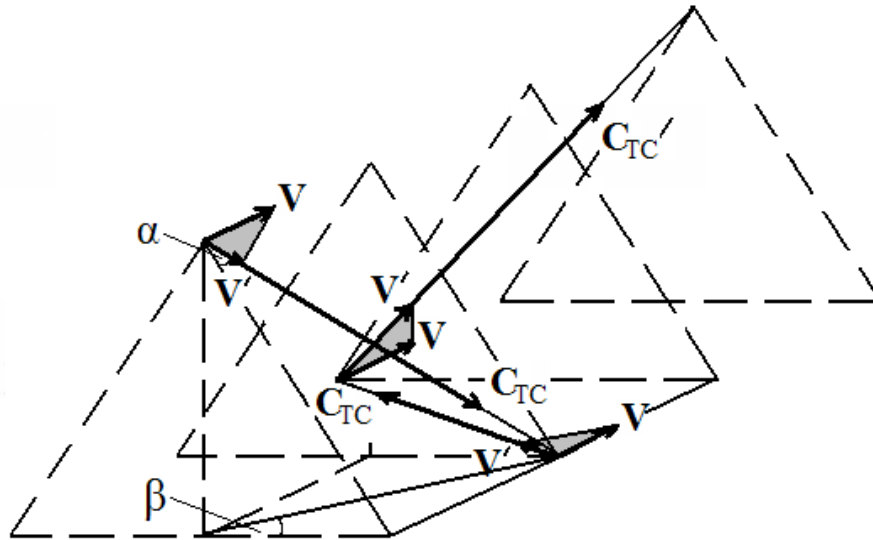


Рисунок 2.9 – Акустичний канал первинного перетворювача, побудованого за дельта-схемою

Час поширення сигналу вздовж і проти потоку визначається наступним чином [73]:

$$t_{\uparrow} = \frac{R}{C_{ТС} + V \cdot \sin \alpha}, \quad (2.17)$$

$$t_{\downarrow} = \frac{R}{C_{ТС} - V \cdot \sin \alpha} \quad (2.18)$$

Вирішивши сумісно (2.17) і (2.18) відносно V , отримаємо рівняння вимірювання в цьому випадку

$$V = \frac{C_{TC}}{\sin \alpha} \cdot \frac{(t_{\downarrow} - t_{\uparrow})}{(t_{\downarrow} + t_{\uparrow})}. \quad (2.19)$$

При відомій площі S поперечного перерізу каналу об'ємна та масова витрати визначаються за формулами:

$$Q = S \cdot V, \quad (2.20)$$

$$M = S \cdot V \cdot \gamma = Q \cdot \gamma, \quad (2.21)$$

де γ – питома вага вимірюваного середовища, кг/м^3 .

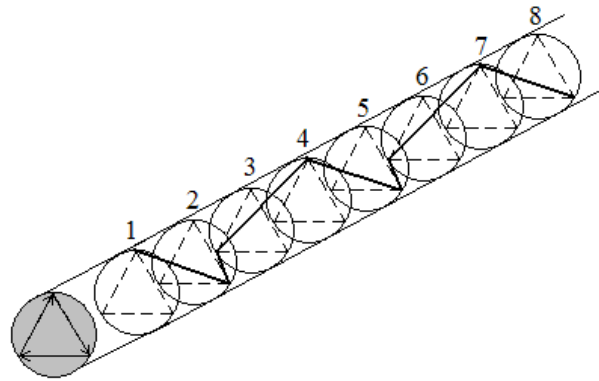


Рисунок 2.10 – Акустичний канал з багаторазовим відбиттям сигналу

Основна похибка вимірювання витрати ТС визначається за (2.11), тобто кінцевою роздільною здатністю θ вимірювача часових інтервалів.

Шлях розповсюдження акустичного сигналу можна подовжити за рахунок багаторазового відбиття сигналу від стінок трубопроводу (рис. 2.8, 2.10), забезпечивши акустичний зв'язок по $n > 3$ хордах. Тоді відстань між осями ПЕА шляхом нескладних, але громіздких обчислювань [73, 14] визначиться як:

$$R = n \cdot L = n \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{D}{4} \cdot \sqrt{3 \cdot \text{ctg}^2 \alpha - 1}. \quad (2.22)$$

Таким чином, отримані результати (2.17, 2.18, 2.22) дозволяють зробити висновок про те, що запропонована методологія забезпечує збільшення Δt , отже, зменшення основної похибки вимірювання витрати текучого середовища. Однак, слід звернути увагу на те, що таке технічне рішення потребує старанного юстирування приймально–передавальних ПЕА акустичного каналу.

Кількість n відбиттів обмежена потужністю випроміненого сигналу та чутливістю ПЕА і може бути розрахована або визначена експериментально.

Первинні перетворювачі розглянутого вище одноканального часово–імпульсного ультразвукового методу вимірювання витрати текучого середовища з хордовим розташуванням акустичного каналу забезпечують отримання інформації, яка повинна підлягати високоточній обробці з метою прецизійного визначення величин t_{\uparrow} і t_{\downarrow} , оцінювання значення V і розрахунку об’ємної Q та масової M витрати. Ці операції можуть бути виконані тільки з використанням сучасних інформаційних технологій які будуть розроблені в подальших розділах роботи.

2.1.3 Математичні моделі двоканального та багатоканального ультразвукового вимірювального перетворювача швидкості текучих середовищ

Для побудови первинного перетворювача двоканального часово–імпульсного ультразвукового вимірювального перетворювача швидкості (а значить, і витрати) текучих середовищ достатньо забезпечити взаємоперпендикулярне діаметральне розташування акустичних каналів, де приймально–передавальні ПЕА розміщені з одного боку або по різні боки труби [50].

Час поширення сигналу вздовж і проти потоку обчислюють, як відмічалось раніше за формулами:

$$t_{\uparrow} = (t_{\uparrow 1} + t_{\uparrow 2})/2 \quad (2.23)$$

$$t_{\downarrow} = (t_{\downarrow 1} + t_{\downarrow 2})/2, \quad (2.24)$$

де $t_{\uparrow 1}$, $t_{\uparrow 2}$, $t_{\downarrow 1}$, $t_{\downarrow 2}$ – результати спостереження часу поширення сигналу вздовж і проти потоку, виміряні відповідно у першому і другому каналах.

Розраховані за (2.23) і (2.24) значення відповідних часів поширення ультразвукових сигналів підставим у (2.19) і отримаємо рівняння у випадку, що розглядається. Обчислення у такий спосіб дозволяє зменшити основну абсолютну похибку вимірювання витрати, отриману з одноканальним первинним перетворювачем, приблизно, в $\sqrt{2}$ разів.

Взагалі, для визначення об'ємної витрати витратомір має здійснювати операцію усереднення швидкості руху вимірюваного середовища по площі поперечного перерізу каналу [34, 50, 73]:

$$\bar{V} = \frac{1}{S} \cdot \iint_P V(x, y) dx dy, \quad (2.25)$$

де S – площа поперечного перерізу каналу перетворювача витрати, м²;

P – область поперечного перерізу каналу перетворювача витрати;

$V(x, y)$ – розподіл швидкості потоку по перерізу трубопроводу, м/с.

Запишемо вираз (2.25) у вигляді:

$$\bar{V} = \frac{2}{S} \int_{-0,5D}^{0,5D} \sqrt{0,25 \cdot D^2 - x^2} \cdot \left\{ \frac{1}{2 \cdot \sqrt{0,25 \cdot D^2 - x^2}} \cdot \int_{-\sqrt{0,25 \cdot D^2 - x^2}}^{\sqrt{0,25 \cdot D^2 - x^2}} V(x, y) dy \right\} dx, \quad (2.26)$$

де D – внутрішній діаметр трубопроводу, м.

Вираз у фігурних дужках – це є усереднена по хорді, розташованій на відстані абсолютної абсциси x_i від центру трубопроводу, швидкість руху середовища:

$$V_h(x) = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{0,25 \cdot D^2 - x^2}} \cdot \int_{-\sqrt{0,25 \cdot D^2 - x^2}}^{\sqrt{0,25 \cdot D^2 - x^2}} V(x, y) dy. \quad (2.27)$$

Подібну операцію виконує акустичний канал ультразвукового витратоміра, орієнтований в просторі таким чином, що його проекція на площину, перпендикулярну до поздовжньої осі трубопроводу, розташована на відстані x від центру трубопроводу [74].

З урахуванням (2.27) вираз (2.26) прийме вигляд

$$\bar{V} = \frac{2}{S} \int_{-0,5D}^{0,5D} \sqrt{0,25 \cdot D^2 - x^2} \cdot V_h(x) dx \quad (2.28)$$

Необхідність розрахунку об'ємної витрати (2.20, 2.28) за допомогою засобів обчислювальної техніки потребують застосування методу чисельного інтегрування з використанням квадратурних формул [57, 75] типу

$$\bar{V}^* \approx \sum_{i=1}^n \xi_i \cdot V_h(x_i) \quad (2.29)$$

де ξ_i – відповідний ваговий коефіцієнт;

Природно, що при цьому переході буде мати місце похибка у визначенні \bar{V} , розмір якої обумовлений двома факторами:

- порядком квадратури n , що визначає кількість акустичних каналів;
- типом квадратури, від якого залежить вибір місць розташування каналів, тобто абсциси x_i , а також величини ξ_i .

Таким чином, виникає завдання визначення оптимального типу квадратурної формули, при використанні якої досягається найменше значення

похибки δ_V у визначенні усередненої швидкості \bar{V} в широкому діапазоні змін її епюри, тобто, змін чисел Рейнольдса.

Для цього опишемо епюру розподілення швидкостей по перерізу трубопроводу при розвиненому турбулентному потоці ($Re > 10^4$), який, як правило, реалізується в реальних трубопроводах, двома широко використовуваними в гідромеханіці формулами:

– степеневою [69, 74]:

$$\frac{V(x, y)}{V_{\max}} = \left[1 - \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{0,25 \cdot D^2} \right]^{\sqrt{\lambda}}, \quad (2.30)$$

де λ – коефіцієнт, що розраховується за формулою Никурадзе [32]:

$$\lambda = 0,0032 + \frac{0,221}{Re^{0,237}}; \quad ;$$

– та уточненою [69, 74]:

$$\hat{V}(x, y) = \frac{\lambda}{16} \cdot \frac{Re}{c} \cdot \left\{ \arctg [c \cdot (1 - r)] - \frac{\ln [1 + c^2 \cdot (1 - r^2)]}{2 \cdot c} \right\}, \quad (2.31)$$

де $\hat{V}(x, y) = \frac{V(x, y)}{\bar{V}}$ – розподіл відносних швидкостей по перерізу трубопроводу;

$$Re = \frac{\bar{V} \cdot D}{\nu} \text{ – число Рейнольдса;}$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \text{ – радіус-вектор точки з координатами } \{x, y\},$$

$$\bar{V} \text{ – середня по перетину каналу перетворювача витрати швидкість потоку, м/с;}$$

$$\nu \text{ – коефіцієнт кінематичної в'язкості вимірюваного середовища, м}^2/\text{с;}$$

c – параметр потоку, який визначається із трансцендентного рівняння:

$$\frac{5}{2 \cdot c^2} + \frac{c^2 - 3}{c^3} \operatorname{arctg}(c) - \frac{3 \cdot c^2 - 1}{2 \cdot c^4} \ln(c^2 + 1) = \frac{16}{\lambda \cdot \operatorname{Re}}, \quad (2.32)$$

З усього різноманіття квадратурних формул (2.29) [66, 74, 75] розглянемо тільки три.

Проаналізуємо квадратурну формулу Гауса [57]:

$$\bar{V}^* \approx \sum_{i=1}^n a_i \eta(\xi_i), \quad (2.33)$$

де a_i – вагові коефіцієнти квадратурної формули Гауса;

$$\eta(\xi_i) = 2 \cdot \frac{\sqrt{1 - \xi_i^2}}{\pi} \cdot V_h(\xi_i), \quad (2.34)$$

$\xi_i = \frac{x_i}{0,5 \cdot D}$ – відносна абсциса (характеризує геометричне положення хорди відносно осі трубопроводу).

Вираз (2.29) зводиться до формули (2.33), вагові коефіцієнти якої обчислюються за формулою:

$$\zeta_i^{\Gamma} = 2 \cdot a_i \cdot \frac{\sqrt{1 - \xi_i^2}}{\pi}. \quad (2.35)$$

Значення відносних абсцис ξ_i^{Γ} , коефіцієнтів a_i і $\zeta_i^{\tilde{A}}$ для квадратурної формули п'ятого порядку Гауса [57] наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 Значення відносних абсцис ξ_i^G , коефіцієнтів a_i і ζ_i^G для квадратурної формули п'ятого порядку Гауса

i	ξ_i^G	a_i	ζ_i^G
1	-0,906180	0,236927	0,063786
2	-0,538469	0,478629	0,256758
3	0	0,568889	0,362166
4	0,538469	0,478629	0,256758
5	0,906180	0,236927	0,063786

Проаналізуємо квадратурну формулу Чебишева [57], що записується у вигляді

$$\bar{V}^* = \frac{2}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \eta(\xi_i) \quad (2.36)$$

Аналогічно попередньому, з урахуванням (2.31), вираз (2.32) приводиться до формули (2.35), вагові коефіцієнти якої обчислюються за формулою

$$\zeta_i^G = 4 \cdot \frac{\sqrt{1 - \xi_i^2}}{\pi \cdot n} \quad (2.37)$$

Значення відносних абсцис ξ_i^G і вагових коефіцієнтів ζ_i^G для квадратурної формули п'ятого порядку Чебишева [57] наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 Значення відносних абсцис ξ_i^Q і вагових коефіцієнтів ζ_i^Q для квадратурної формули п'ятого порядку Чебишева

i	ξ_i^Q	ζ_i^Q
1	-0,832497	0,141082
2	-0,374541	0,236112
3	0	0,254648
4	0,374541	0,236112
5	0,832497	0,141082

Проаналізуємо квадратурну формулу Джона С. Вайлера, наведену в [74].

Аналогічним розглянутому вище чином ця формула приводиться до квадратурної формули п'ятого порядку виду (2.29) значення відносних абсцис ξ_i^M і вагових коефіцієнтів ζ_i^M якої наведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 Значення відносних абсцис ξ_i^M і вагових коефіцієнтів ζ_i^M

i	ξ_i^M	ζ_i^M
1	-0,866025	0,083333
2	-0,5	0,25
3	0	0,333333
4	0,5	0,25
5	0,866025	0,083333

Наведені в табл. 2.1 – 2.3 результати розрахунків [75] дозволяють запропонувати взаємне розташування акустичних каналів відносно осі вздовж перерізу трубопроводу (рис. 2.11) в умовних одиницях довжини для розглянутих квадратурних формул і порядку квадратури $n = 5$.

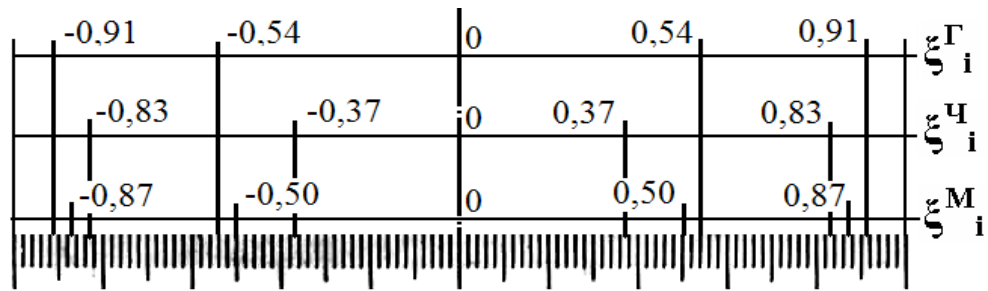


Рисунок 2.11 – Розташування акустичних каналів багатоканального ультразвукового методу

На рис. 2.12 наведені приклади взаємного розташування акустичних каналів, що реалізують багатоканальний ультразвуковий метод вимірювання витрати текучого середовища: а – триканальний хордовий дельта-спосіб; б – п'яти-канальний спосіб (ПЕА розташовані по різні боки труби).

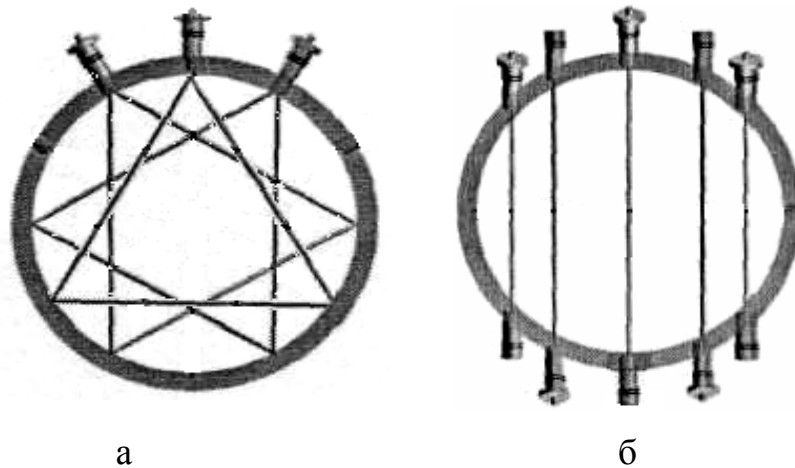


Рисунок 2.12 – Розташування акустичних каналів відносно осі вздовж перерізу трубопроводу

Проведений аналіз дозволив отримати залежності значень відносної похибки δ_V від величини числа Рейнольдса (Re), який описується при апроксимації розподілу усередненої швидкості \bar{V} по зрізу розвинутого турбулентного потоку, який описується ступеневою формулою (3.30) та уточненою формулою (3.31) квадратурними формулами Гауса (2.33, 2.34), Чебишева (2.36, 2.37) і Дж. Вайлера (2.29, таб. 2.3):

$$\delta_V = \frac{V - \bar{V}}{V} \cdot 100\% . \quad (2.38)$$

Дані залежності наведені на графіках рисунків 2.13 та 2.14

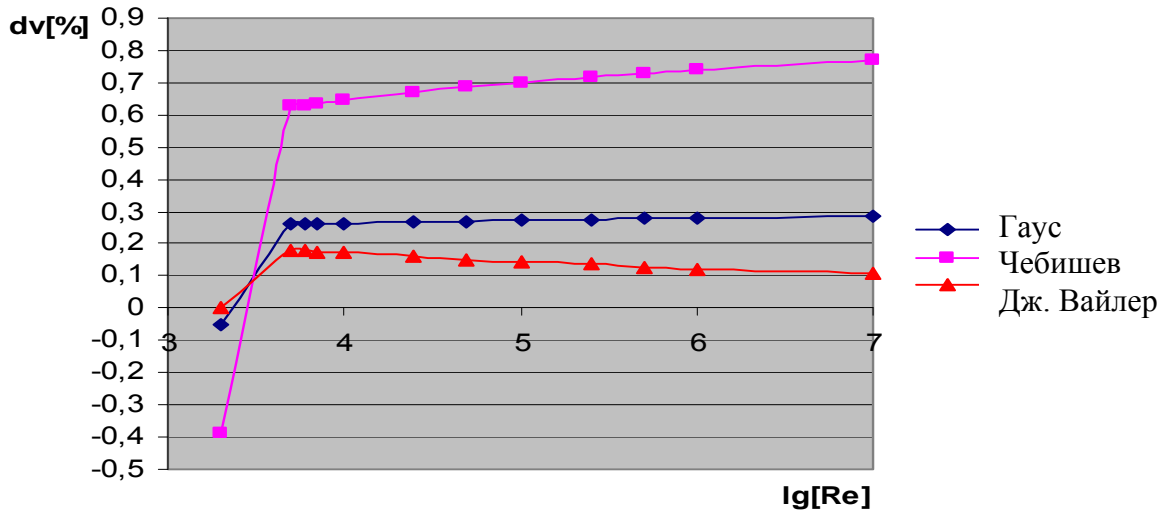


Рисунок 2.13 – Графіки залежності відносної похибки δ_V від числа Рейнольдса при апроксимації розподілу усередненої швидкості \bar{V} , який задан ступеневою формулою.

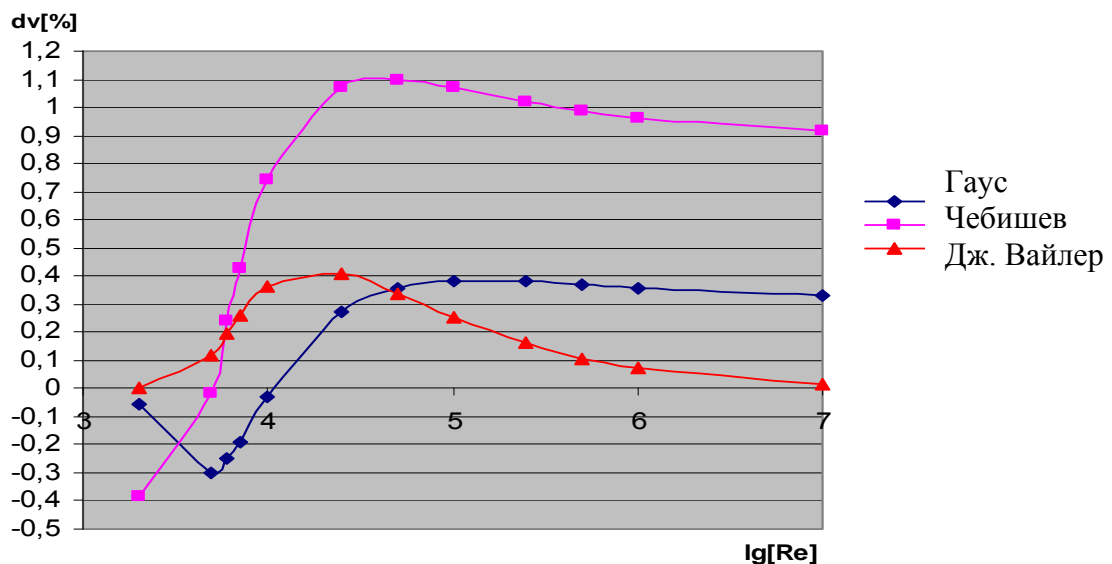


Рисунок 2.14 – Графіки залежності значень відносної похибки δ_V від числа Рейнольдса Re при апроксимації розподілу усередненої швидкості \bar{V} , який описується уточненою формулою.

На підставі отриманих результатів виконаних досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Відносна похибка δ_V досягає найменших значень при описуванні ступеневої та уточненої формул квадратурною формулою Дж. С. Вайлера. Таким чином, зміна структури потоку ТС найменшим чином впливає на покази УЗВ з акустичним зондуванням по п'ятьох паралельних просторових хордах у випадку, коли параметри врізаної секції обираються на підставі квадратурної формули Джона С. Вайлера.

2. Побудова врізаної секції на підставі квадратурної формули Джона С. Вайлера є більш пререважливою і з точки зору зручності та технологічності виготовлення, так як у порівнянні з квадратурою Гауса периферійні канали розташовані ближче до центру вимірювального трубопроводу.

3. Багатоканальний ультразвуковий метод вимірювання витрат може забезпечити зменшення абсолютної похибки обчислень часу поширення сигналу вздовж і проти потоку, як і за умови виконання багатократних вимірювань, у $\sqrt{2}$ разів [76].

2.2 Розробка методу визначення «центру тяжіння» доплерівського спектра ультразвукового вимірювання витрати

Точковий розсіювач (т. А, рис. 2.15), що рухається вздовж осі трубопровода зі швидкістю V , опромінюється ультразвуковим сигналом з частотою ω_0 під кутом α_P до вертикалі. Частота прийнятого відбитого ультразвукового сигналу, визначається співвідношенням [47]:

$$\omega_D = \omega_0 \cdot \frac{\frac{1 - V \cdot \sin \alpha_P}{C}}{\frac{1 + V \cdot \sin \alpha_P}{C}}, \quad (2.39)$$

де C – швидкість поширення ультразвукових хвиль у середовищі, м/с.

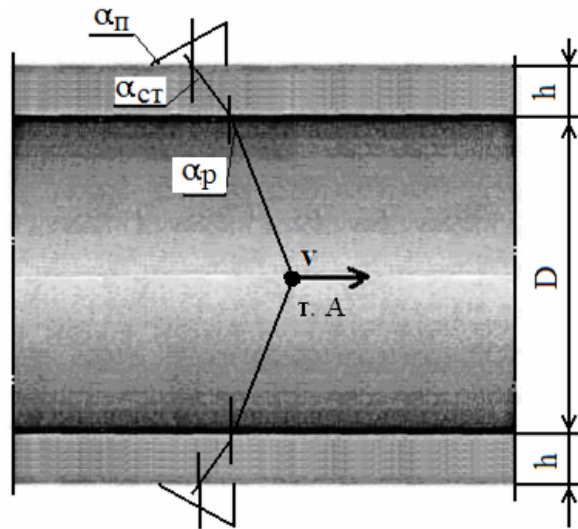


Рисунок 2.15 – Схема первинного перетворювача доплерівського ультразвукового витратоміру ($\alpha_{п}$ - кут призми; $\alpha_{ст}$ - кут променя в стінках трубопроводу; $\alpha_{р}$ - кут променя в робочому середовищі)

Якщо другий співмножник в (2.39) розкласти в степеневий ряд і взяти різницю $\Delta\omega = \omega_0 - \omega_D$, отримаємо так званий локаційний варіант формули ефекту Доплера [47]:

$$\Delta\omega = 2 \cdot \omega_0 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{V \cdot \sin \alpha_P}{C} \right)^n \quad (2.40)$$

Як правило, $V \ll C$, і в цьому випадку можна обмежитися лінійним наближенням:

$$\Delta\omega = 2 \cdot \omega_0 \frac{V \cdot \sin \alpha_P}{C} \quad (2.41)$$

З якого із урахуванням (2.5) слідує модель вимірювання:

$$V = \frac{\Delta\omega \cdot f(\alpha_{II}, C_{II})}{2 \cdot \omega_0}, \quad (2.42)$$

де $f(\alpha_{II}, C_{II})$ – константа, яка, як показано раніше в (2.6), залежить в основному від швидкості C_{II} поширення ультразвуку в матеріалі призми ПЕА.

З (2.42) витікає, що величина доплерівського зсуву $\Delta\omega$ прямо пропорційна швидкості розсіювача V і не залежить від швидкості ультразвуку в рідині.

Основна похибка ультразвукового методу вимірювання витрат, що використовує ефект Доплера, представляє собою невиключену систематичну похибку (НСП) і визначається згідно з [76, 77] наступним шляхом:

$$\delta_V = |\delta_{\Delta\omega}| + |\delta_{\omega_0}| + |\delta_k|, \quad (2.43)$$

де $|\delta_{\Delta\omega}|$ – модуль похибки об'єкта вимірювання $\Delta\omega$, що визначається стабільністю δ_{ω_0} генератора акустичного сигналу;

$|\delta_k|$ – модуль похибки завдання константи, якою, як показано раніше [47] можна нехтувати.

Таким чином,

$$\delta_V = \delta_{\omega_0} + \delta_{\Delta\omega} \approx 2\delta_{\omega_0} \quad (2.44)$$

У реальних умовах у формуванні сигналів об'ємного розсіювання бере участь сукупність розсіювачів різної природи, випадково розташованих в просторі. Тому можна розглядати деякий «доплерівський спектр» (рис. 1.12), що відображає розподіл прийнятої енергії як функції радіальних швидкостей розсіювачів. Якщо у будь-який спосіб оцінити «центр тяжіння» спектра відбитого сигналу ω^* як

характеристику положення «розподілу» цього спектра, то для реальних розрахунків можна застосовувати вираз (2.42), де замість величини доплерівського зсуву $\Delta\omega$ використовується значення $\Delta\omega^* = \omega_0 - \omega_D^*$.

Розглянемо методи визначення «центру тяжіння» доплерівського спектру [19].

1. Вирішення завдання визначення ω_D^* методами нечіткої математики передбачає виконання процедури, аналогічній дефаззифікації, тобто визначення точного числового значення нечіткої змінної в загальній процедурі нечіткого виводу [77, 78].

Досягається це наступним чином.

На першому етапі на основі заданих чітких значень $x_{зад}$ із їх універсумів за допомогою функцій належності $\mu(x)$ формується єдина нечітка множина як результат композиції декількох нечітких множин композиції декількох нечітких множин, отриманих за правилами, які представлені на рис. 2.16.

На другому етапі відшукується точне значення описаної єдиною нечіткою множиною змінної, що аналізується. Пошук рішення аналогічний визначенню характеристик положення (математичного сподівання, моди, медіани) випадкових величин в теорії ймовірностей. Приклад для простішого випадку – вибору чіткого значення $x_{шук}$, відповідного максимуму результуючої функції належності (ФН) - наведений на рис. 2.17.

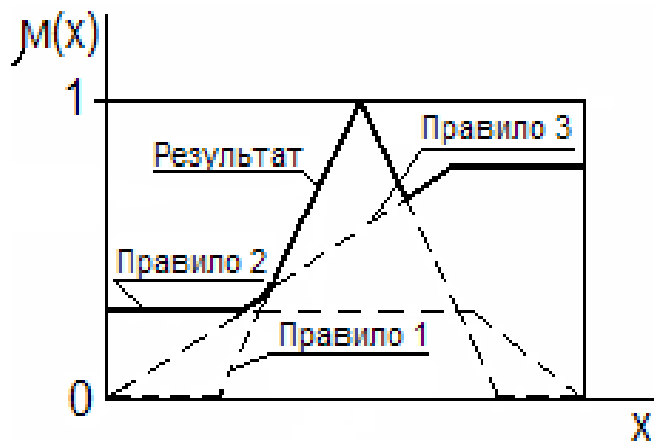


Рисунок 2.16 – Композиція нечітких множин

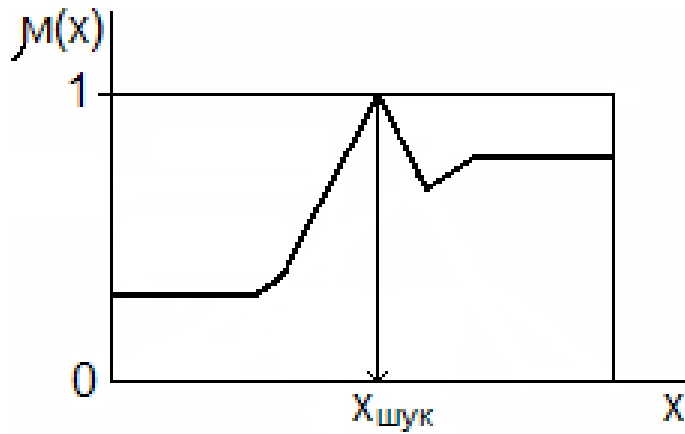


Рисунок 2.17 – Приклад вибору чіткого значення результуючої ФН

Дефазифікація результуючої ФН у цьому випадку утруднень не викликає.

Більш складний випадок – відсутність явного максимуму результуючої ФН. Тоді рішення знаходять одним із таких методів [78]:

- середнього максимуму;
- першого максимуму;
- останнього максимуму;
- центра тяжіння;
- центра сум;
- висот.

З означених вище методів для прямокутних функцій належності (результатів вимірювань деякої фізичної величини неатестованим або вперше розробленим приладом, що містять невизначеність) в області визначення результуючої ФН раціональним є використання методу «центра тяжіння» [19]. У цьому випадку згідно з рис. 2.18:

$$x_{шук} = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_i \cdot L_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^m \mu_i \cdot L_i} \quad (2.45)$$

де μ_i – i -та складова ФН;

L_i – ширина i -тої складової ФН;

x_i – модальне значення i -тої складової ФН.

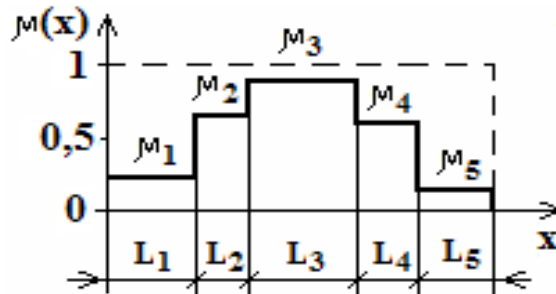


Рисунок 2.18 – Приклад результуючої ФН

При однаковій ширині складових ФН вираз (2.45) буде мати вигляд:

$$x_{\text{мод}} = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^m \mu_i} \quad (2.46)$$

Однакової ширини інтервалів неважко домогтися шляхом розбиття кожного із них на менші відрізки приблизно однакової ширини ΔL , для яких в границях L_i значення μ_i теж буде однакове.

Замість модального значення можна взяти середину i -го інтервалу

$$x_i = \frac{(x_{iП} + x_{iК})}{2}, \quad (2.47)$$

де $x_{iП}$, $x_{iК}$ – відповідно початок і кінець i -тої складової ФН.

Розглянемо приклад.

Вимірюється у деякий спосіб сукупність однорідних фізичних величин. Множину усереднених оцінок результатів вимірювання подамо об'єднанням множин оцінок A , B і C відповідно в інтервалах $[2,00-3,00]$, $(3,00-4,00)$, $[4,00-5,00]$:

$$Q = A \cup B \cup C. \quad (2.48)$$

Цій множині відповідає записана в термінах теорії нечітких множин функція належності [78]:

$$\mu_Q(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x), \mu_C(x)). \quad (2.49)$$

Тут числові значення функцій належності $\mu_A(x)$, $\mu_B(x)$, $\mu_C(x)$, отримані як результати n_A , n_B , n_C підрахунку результатів вимірювання, що потрапили у відповідні інтервали, нормовані до максимальної кількості оцінок в інтервалі $[2 \dots 5]$:

$$\mu_A(x) = n_A / n_{\max};$$

$$\mu_B(x) = n_B / n_{\max};$$

$$\mu_C(x) = n_C / n_{\max};$$

$$n_{\max} = \max(n_A, n_B, n_C).$$

Припустимо, що результуюча функція належності цих оцінок має вигляд, представлений на рис. 2.19, тоді:

$$\mu(Q_{2-5}) = 1, \text{ якщо } 2 \leq x \leq 5. \quad (2.50)$$

Тоді, відповідно до (2.45), маємо

$$x_{шук1} = (2,5 \cdot 1 + 3,5 \cdot 1 + 4,5 \cdot 1) / (1 + 1 + 1) = 10,5 / 3 = 3,5.$$

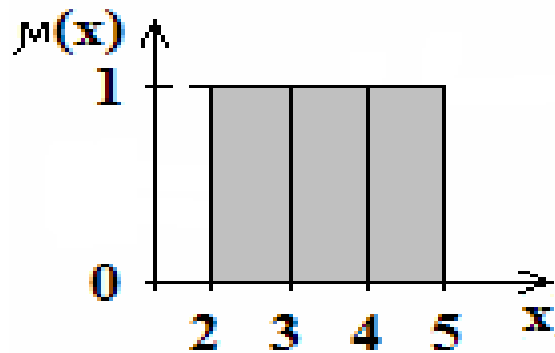


Рисунок 2.19 – Результуюча ФН

Для результуючої ФН (рис. 2.20, а):

$$\mu(Q_{2-5}) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } 2 \leq x \leq 3; \\ 0,6, & \text{якщо } 3 < x < 4; \\ 0,4, & \text{якщо } 4 \leq x \leq 5; \end{cases} \quad (2.51)$$

$$x_{шук2} = (2,5 \cdot 1 + 3,5 \cdot 0,6 + 4,5 \cdot 0,4) / (1 + 0,6 + 0,4) = 6,4 / 2 = 3,2.$$

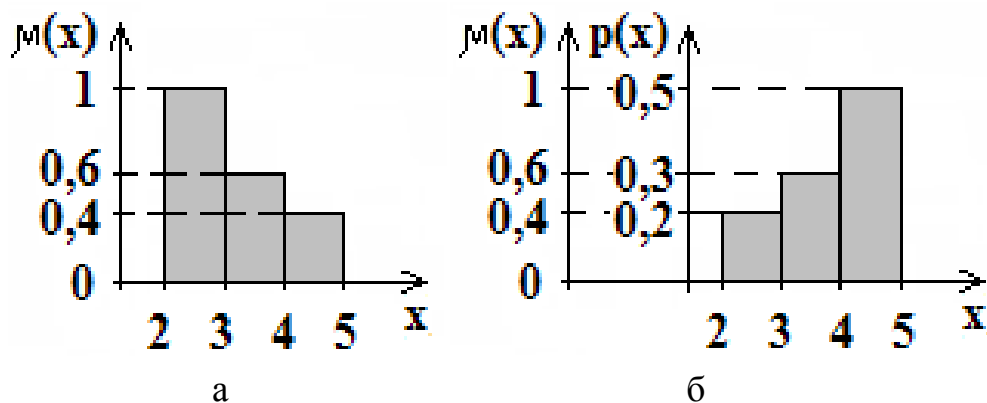


Рисунок 2.20 – Результуючі ФН

Для результуючої ФН (рис. 2.20, б):

$$\mu(Q_{2-5}) = \begin{cases} 0,4, & \text{якщо } 2 \leq x \leq 3; \\ 0,6, & \text{якщо } 3 < x < 4; \\ 1, & \text{якщо } 4 \leq x \leq 5; \end{cases} \quad (2.52)$$

$$x_{шук3} = (2,5 \cdot 0,4 + 3,5 \cdot 0,6 + 4,5 \cdot 1) / (0,4 + 0,6 + 1) = 7,6 / 2 = 3,8.$$

При стохастичній невизначеності математичне сподівання випадкових величин, що характеризують розподіли, аналогічні вище розглянутим результуючим ФН (рис. 2.19, 2.20), можна розрахувати за відомою формулою:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^m x_i p(x_i) \quad (2.53)$$

При цьому отримуємо аналогічні результати:

$$\begin{aligned} \bar{x}_1 &= (2,5 + 3,5 + 4,5) \cdot \frac{1}{3} = 3,5 = x_{шук1} \\ \bar{x}_2 &= 2,5 \cdot 0,5 + 3,5 \cdot 0,3 + 4,5 \cdot 0,2 = 3,2 = x_{шук2} \\ \bar{x}_3 &= 2,5 \cdot 0,2 + 3,5 \cdot 0,3 + 4,5 \cdot 0,5 = 3,8 = x_{шук3} \end{aligned}$$

Таким чином, для визначення точного чисельного значення нечіткої змінної, визначеної результуючою функцією належності, в якості характеристики положення можна використовувати середнє арифметичне, як і передбачено для невизначеностей з невеликим розкидом значень [79].

Отриманий висновок, застосований для вирішення завдання визначення «центру тяжіння» доплерівського спектру, означає, що розрахунки можна виконувати за формулою:

$$\Delta \omega^* = \omega_0 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \omega_{Di} \quad (2.54)$$

де ω_{Di} – сукупність прийнятих доплерівських частот.

Основна похибка для цього випадку обумовлюється похибкою визначення об'єкта вимірювання ω_D^* , а використовувана модель вимірювання (2.42) дозволяє записати:

$$V^* = \frac{\Delta \omega^* \cdot f(\alpha_{II}, C_{II})}{2 \cdot \omega_0} = \frac{\omega_0 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \omega_{Di}}{2 \cdot \omega_0} f(\alpha_{II}, C_{II}), \quad (2.55)$$

В даній моделі застосовується уточнене значення доплерівського зсуву, що відрізняється від $\Delta \omega$ на величину.

$$\Delta \omega^* - \Delta \omega = \omega_D - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \omega_{Di} \quad (2.56)$$

2. Крім описаного, «Центр тяжіння» доплерівського спектру можна оцінити також у такий спосіб.

У сукупності прийнятих доплерівських частот ω_{Di} відшукується максимальне за амплітудою A_j , попереднє A_{j-1} і наступне A_{j+1} значення (рис. 1.12).

Положення максимуму, як оцінка «центру тяжіння», уточнюється за формулами параболічної трьохточкової інтерполяції [75]:

$$\omega_D^* = \omega_j + \Delta \omega_j, \quad (2.56)$$

$$\Delta\omega_j = \frac{A_{j-1} - A_{j+1}}{2 \cdot (A_{j+1} - 2 \cdot A_j + A_{j-1})} \quad (2.57)$$

Логічно припустити, що при уточненні абсолютна похибка визначення положення максимуму зменшиться приблизно вдвічі, отже можна записати:

$$\delta_V \approx \delta_{\omega 0}. \quad (2.58)$$

Розглянуті методи визначення «центру тяжіння» доплерівського спектру забезпечують реалізацію декількох варіантів обробки вихідного сигналу ПЕА УЗВ вимірювальним блоком витратоміра, що дозволяє підвищити точність вимірювання витрати (2.58) до двох разів.

2.3 Висновки по розділу 2

Виконані в розділі дослідження дозволяють зробити наступні висновки:

1. Розглянуто та удосконалено математичні моделі часово-імпульсного одноканального та багатоканального ультразвукового методу вимірювання витрати текучого середовища, що визначають методи розрахунків об'ємної та масової витрати текучого середовища, придатні для втілення у вимірювальному блоці витратоміра.

Запропоновано до реалізації:

- одноканальний ультразвуковий метод вимірювання витрати текучого середовища із діаметральним розміщенням акустичних каналів, який, на відміну від відомих, дозволяє за рахунок багаторазового відбиття сигналу зменшити відносну похибку вимірювання швидкості потоку вимірюваного середовища у кількість разів, пропорційну кількості перетинань сигналом перерізу трубопроводу;

- одноканальний ультразвуковий метод вимірювання витрати текучого середовища, який, на відміну від відомих, передбачає хордове розміщення акустичних каналів за дельта–схемою, що дозволяє підвищити чутливість первинного перетворювача за рахунок покращення відношення сигнал/шум і зменшити відносну похибку вимірювання швидкості потоку вимірюваного середовища пропорційно кількості перетинань сигналом перерізу трубопроводу, як мінімум у два рази;
- 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 приблизно у 1,4 рази;
- 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 квадратурних формул, що дозволяє враховувати профіль швидкостей, а також забезпечує додаткове зменшення абсолютної похибки визначення часу поширення сигналу вздовж і проти потоку.

2. Розглянуто математичні моделі ультразвукового доплерівського методу вимірювання витрати текучого середовища, що, на відміну від відомих, передбачають декілька варіантів визначення «центру тяжіння» доплерівського спектру прийнятого сигналу і дозволяють підвищити точність вимірювання витрати УЗВ до двох разів.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ
ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ВИТРАТИ ТЕКУЧИХ СЕРЕДОВИЩ

Розроблення, виготовлення та практичне застосування будь-яких ЗВТ вимірювальної техніки потребують метрологічних досліджень, призначених для відпрацювання їх конструкцій та атестації в державних центрах стандартизації, метрології та сертифікації і уповноважених на ці роботи установах, в тому числі закордонних.

В теоретичному плані питання аналізу похибок удосконаленого ультразвукового методу та джерела їх виникнення досконально викладені в [8, 10, 64, 80, 81] і експериментально досліджені, зокрема, для газу в [9, 82, 83]. Для запропонованих у розділі 2 моделей удосконаленого ультразвукового методу були розглянуті тільки специфічні систематичні похибки об'єкта вимірювання: різниці часу Δt розповсюдження ультразвукової хвилі проти t_{\downarrow} і вздовж t_{\uparrow} напрямку потоку вимірюваного середовища, а також, середньої швидкості V потоку вимірюваного середовища - для часово-імпульсних витратомірів, і середньої швидкості V розсіювачів, що містяться у вимірюваному середовищі, – для доплерівських витратомірів. Вважається, що границі сумарної похибки розроблених витратомірів і можливості їх застосування для вимірювання та обліку витрат на практиці будуть встановлені шляхом експериментальних досліджень.

В розділі розглянуті структури повірочних установок, розроблених в результаті виконання даної роботи для випробувань витратомірів у виробничих умовах, а також, результати метрологічних досліджень розроблених витратомірів з урахуванням того, що границі досяжних похибок сучасних УЗВ, як зазначалося раніше, дорівнюють $\pm (0,5 - 1,0) \%$ для часово-імпульсних різновидів $\pm (2 - 3) \%$ – для доплерівських [8].

3.1 Розробка повірочних установок дослідження основних характеристик ультразвукових витратомірів

3.1.1 Автоматизована повірочна установка АПУ–011/40

Автоматизована повірочна установка АПУ–011/40 (надалі – АПУ) розроблена в процесі і по результатам даної роботи з метою дослідження технічних та метрологічних характеристики витратомірів рідини в режимах вимірювання об'ємної витрати до $40 \text{ м}^3/\text{год}$ і відповідних об'єму та маси [84]. При розробці АПУ була використана низка технічних рішень [85–89], удосконалених при втіленні. На рис. 3.1 наведена гідравлічна схема АПУ, на рис. 3.2 – зовнішній вигляд, а в Додатку Е.1 – основні технічні характеристики.

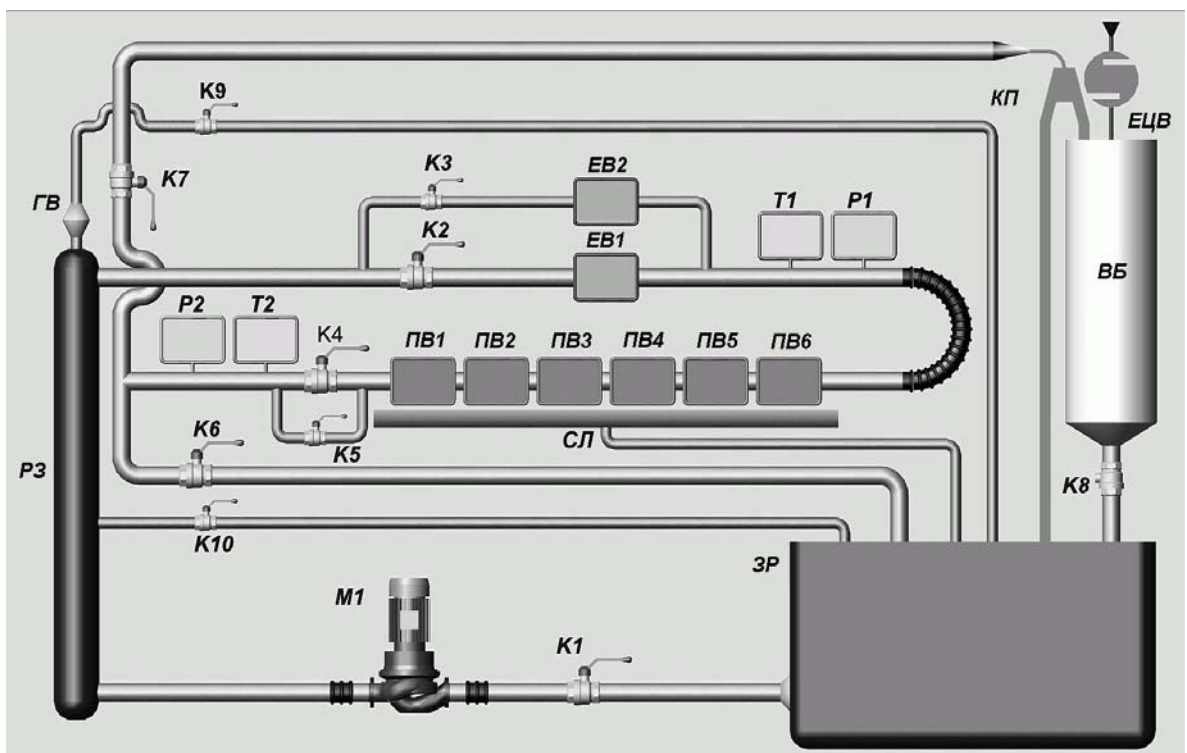


Рисунок 3.1 Схема гідравлічна АПУ-011/40

На рис.3.1 введені наступні позначення:

ЗР – збірний резервуар (забезпечує накопичення оборотної води в об'ємі, необхідному для роботи АПУ);

М1 – насосний агрегат з частотним регулюванням (забезпечує плавне регулювання,

вибір і автоматичну підтримку об'ємної витрати води у вимірювальній ділянці);

РЗ – резервуар-заспокоювач (служує для демпфірування (фільтрації) високочастотних пульсацій витрати води, що виникають при роботі насосного агрегату);

ГВ – газовідділювач (забезпечує видалення пухирців газів з води, що подається у вимірювальну ділянку);

ЕВ1, ЕВ2 – еталонні витратоміри (виконують вимірювання об'ємної витрати й об'єму води, яка проходить через досліджуваний ЗВТ при великих (ЕВ1) і малих (ЕВ2) значеннях витрати);

ПВ1... ПВ6 – досліджувані прилади (кількість приладів на вимірювальній ділянці залежить від їх номінального діаметра і габаритних розмірів);

ЗЛ – збірний лоток для води, яка втрачається з вимірювальної ділянки при монтажі досліджуваних приладів;

Р1, Р2 – перетворювачі тиску (служують для вимірювання тиску води на вході і виході досліджуваних ЗВТ);

Т1, Т2 – електронні термометри (призначені для вимірювання температури води на вході і виході досліджуваних ЗВТ);

ЕЦВ – електронні цифрові ваги (призначені для статичного зважування маси води);

ВБ – ваговий бак (забезпечує накопичення об'єму води для статичного зважування);

ПП – перекидний пристрій – дівектор (комутатор потоку) (забезпечує миттєве переключення потоку води, що створюється насосним агрегатом, або в ВБ, або в ЗР);

К8 – зливальний кран – вентиль (служує для спустошення вагового баку перед початком чергового циклу зважування);

К1 – технологічний вентиль (використовується для запобігання витікання води зі збірного резервуару при технічному обслуговуванні насосного агрегату);

К2, К3 – вентиля, що забезпечують вибір одного з еталонних витратомірів;

К4, К5 – вентиля, що забезпечують плавне регулювання тиску води у вимірювальній ділянці при великих (К4) і малих (К5) значеннях об'ємної витрати;

К6 – зливальний вентиль для режиму роботи 1 (спрямовує потік води з вимірювальної ділянки в ЗР);

К7 – вентиль подачі води з вимірювальної ділянки на перекидний пристрій в

режимах 2 і 3;

К9 – вентиль для виводу повітря з газовідділювача у збірний резервуар;

К10 – вентиль для зливання води з резервуару–заспокоювача до збірного резервуару.

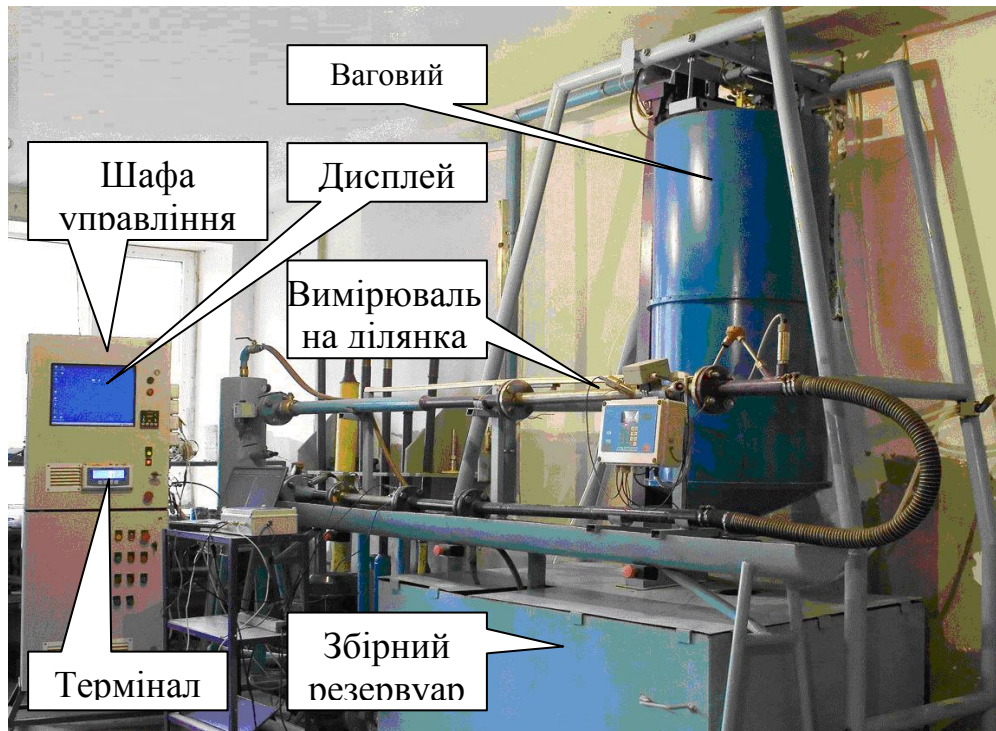


Рисунок 3.2 Зовнішній вигляд АПУ–011/40

Умови експлуатації АПУ:

- температура повітря – від 15 °С до 25 °С;
- відносна вологість – до 80 % при температурі 25 °С;
- робоча рідина – вода питна для дослідження лічильників води.

Особливістю установки (рис. 3.2) є те, що використовуються кранові ваги на одному прецизійному силувимірювальному тензодатчику розтягування фірми Sortorius AG, а не стандартні платформні ваги з 4-5 датчиками і відповідно більшої похибкой.

В результаті атестації ваг, виконаних ННЦ “Інститут метрології” (м. Харків), встановлено, що дискретність 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,

тобто границі приведеної похибки ваг дорівнюють $5 \cdot 10^{-3} \%$ та $8 \cdot 10^{-3} \%$ в першому і другому діапазонах зважування, відповідно.

Шафа управління, до складу якої входять ЕОМ і мікроконтролер, забезпечує видавання сигналів управління для функціональних вузлів АПУ, а також прийом і обробку цифрових сигналів, що формуються еталонними витратомірами і досліджуваними ЗВТ. ЕОМ забезпечує збирання інформації про умови проведення досліджень, формує протокол.

Для управління АПУ використовується сенсорний дисплей: оператор подає команди ЕОМ дотиком пальця до потрібного елементу зображення на дисплеї.

При визначенні об'єму води шляхом зважування похибка визначення густини води є суттєвим фактором, який обмежує точність АПУ. На відміну від більшості установок аналогічного призначення, де густину води задають константою, що відповідає дистильованій воді при температурі $20 \text{ }^\circ\text{C}$, в ЕОМ АПУ оператор періодично заносить дані про температуру води, яка безперервно вимірюється електронним термометром. Густина води ЕОМ розраховує, використовуючи відому функціональну її залежність від температури для дистильованої води (Додаток В).

Установка АПУ–011/40 в лютому 2008 року атестована ДП «Харківстандартметрологія». Нормовані такі метрологічні характеристики установки:

- границі відносної похибки визначення маси води шляхом зважування не перевищують $\pm 0,06 \%$;
- границі відносної похибки визначення об'єму води шляхом зважування не перевищують $\pm 0,08 \%$;
- границі відносної похибки визначення об'єму води за показами еталонних витратомірів не перевищують $\pm 0,25 \%$.

3.1.2 Автоматизована повірочна установка АПУ–Г–011/2500

На основі результатів, отриманих в дисертаційній роботі, розроблена ще одна автоматизована повірочна установка - АПУ-Г-011/2500 (надалі АПУ-Г), яка призначена для метрологічного дослідження витратомірів повітря, природного газу та інших газів, їх сумішей [90, 91]. На рис. 3.3 наведена її структурна схема АПУ-Г, а на рис. 3.4 – зовнішній вигляд, в Додатку Е. 2 – основні технічні дані.

Склад установки (рис.3.3):

1 – вентилятор радіальний HRD 65, виробництва Німеччина, максимальна витрата до 3600 м³/год, перепад тиску 8,2 кПа, потужність 7,5 кВт;

2 – вентилятор радіальний HRD 2Т, виробництва Німеччина, максимальна витрата до 1200 м³/год, перепад тиску 9,6 кПа, потужність 1,5 кВт;

3 – ресивер (1–а – демпфіруюча ємність);

4 – діафрагменний затвор з механічним приводом;

5.1...5.9 – засувки;

6 – досліджуваний ЗВТ;

7 – еталонний турбінний витратомір ЛГЕ–2500 (DN200), виробництва ВАТ «Івано-Франківський завод «Промприлад», Україна, діапазон вимірювання об'ємної витрати від 250 м³/год до 2500 м³/год, границі допустимої відносної похибки в діапазоні атестованих об'ємних витрат $\pm 0,25$ %;

8 – еталонний турбінний витратомір ЛГЕ–250 (DN80), виробництва ВАТ «Івано-Франківський завод «Промприлад», Україна, діапазон вимірювання об'ємної витрати від 25 м³/год до 2500 м³/год, границі допустимої відносної похибки в діапазоні атестованих об'ємних витрат $\pm 0,25$ %;

9 – еталонний роторний лічильник типорозміру G16, виробництва Advancer product engineering, Україна, діапазон вимірювання об'ємної витрати від 3,0 м³/год до 25,0 м³/год, границі допустимої відносної похибки в діапазоні атестованих об'ємних витрат $\pm 0,25$ %;

10 – еталонний роторний лічильник типорозміру G2,5;

11 – ресивер 2 (2–а – демпфіруюча ємність);

12 – повітряний фільтр.

Вузли 1, 2 і 3 розміщені в окремому приміщенні.

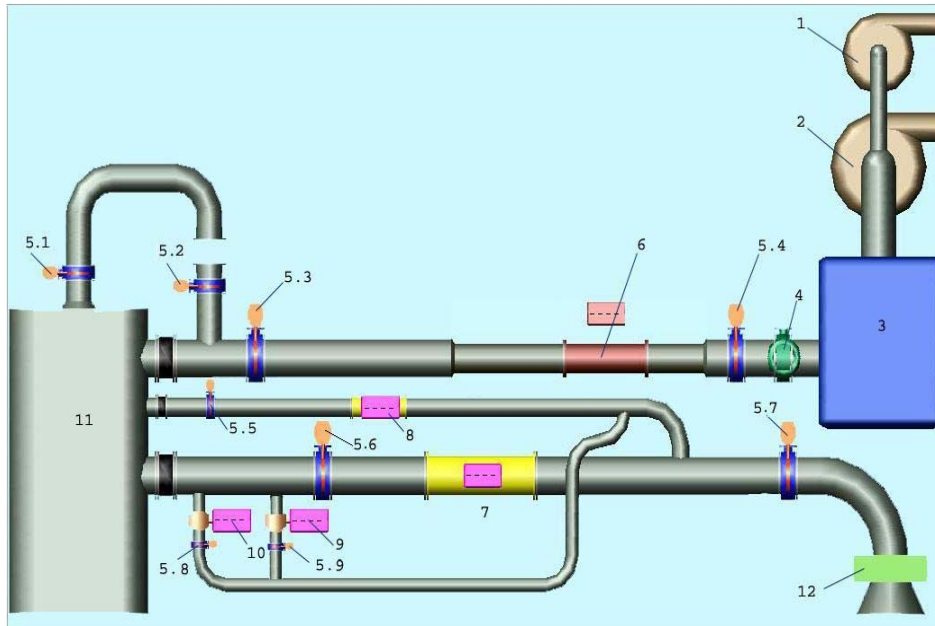


Рисунок 3.3 Схема структурна АПУ-Г-011/2500



Рисунок 3.4 Зовнішній вигляд АПУ-Г-011/2500

До складу установки входять також вузли і прилади, не показані на рис. 3.3:

- шафа силова з пультом управління та частотно-імпульсним перетворювачем, що забезпечує регулювання режимів роботи вентиляторів;

- ПК із сенсорним дисплеєм, програмне забезпечення якого слугує для дистанційного управління АПУ, проведення дослідження, формування і друкування протоколів;

- сім електронних перетворювачі температури ППІ-011RS для вимірювання температури повітря в трубопроводному тракті установки та в приміщенні, де змонтована установка, виробництва ПрАТ «Тахіон», діапазон вимірювання від мінус 20 °С до 60 °С, границі допустимої абсолютної похибки $\pm 0,03$ °С;

- електронний вимірювач температури і вологості ДВ2ТС-А, виробництва НВК «Мікрофор», Росія, діапазон вимірювання відносної вологості від нуля до 98 %, діапазон вимірювання температури від нуля до 60 °С, границі допустимої основної абсолютної похибки вимірювання відносної вологості при зміні температури на 10 °С дорівнює $\pm 1\%$, границі допустимої основної абсолютної похибки вимірювання температури в діапазоні від нуля до 60 °С - $\pm 0,5$ %;

- первинний вимірювальний перетворювач абсолютного тиску APC 2000 ALW, виробництва APLISENS, Польща, з діапазоном вимірювань від мінус 10 кПа до 100 кПа, границі допустимої наведеної похибки в діапазоні атестованих об'ємних витрат $\pm 0,075$ %, додаткова похибка, викликана зміною температури навколишнього середовища на кожні 10 °С складає $-0,8$ %;

- первинний вимірювальний перетворювач абсолютного тиску APC 2000 ALE, виробництва APLISENS, Польща, з діапазоном вимірювань від мінус 10 кПа до 100 кПа, границі допустимої наведеної похибки в діапазоні атестованих об'ємних витрат $\pm 0,075$ %, додаткова похибка, викликана зміною температури навколишнього середовища на кожні 10 °С складає $-0,1$ %;

- три напірметри ДН 05 з границями вимірювань від нуля до 25 кПа, класу точності 1,5;

- п'ять контролерів лічильників КС-011 з виходом RS-485, виробництва ПрАТ «Тахіон», діапазон вимірювань від 0,01 Гц до 16000 Гц, границі абсолютної похибки вимірювання ± 1 імп. Призначені для рахунку кількості імпульсів з виходу лічильників, перерахунку їх в об'ємну витрату і видачі результатів розрахунків об'ємної витрати в систему збору інформації;

- комплекти направляючих, конусних переходів і трубопровідних вставок для монтажу досліджуваних ЗВТ з різними номінальними діаметрами на вимірювальній ділянці;

- механічний гвинтовий затискач для фіксації досліджуваних ЗВТ.

Робоче середовище установки – повітря. Джерелом 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.

Конструктивні особливості установки:

- дозволяють монтувати прямі ділянки великої довжини (до 50 DN), що забезпечує можливість моделювання різних місцевих опорів і виконувати порівняння характеристик різних типів ЗВТ;
- забезпечують відсікання вимірювальної ділянки на час встановлення досліджуваних витратомірів і тим самим запобігають попаданню сторонніх тіл, сміття і бруду в трубопроводи установки;
- першим по потоку розташовується еталонний витратомір, що дозволяє підвищити експлуатаційну надійність установки за рахунок запобігання попаданню бруду в еталонний витратомір, розташований до вимірювальної ділянки, а також досліджувати ЗВТ на якому не проводилися регламентні роботи;
- забезпечують стабільність параметрів потоку і, як наслідок, відтворення заданих витрат;
- забезпечують соосність елементів вимірювальної ділянки за рахунок використання спеціальних технологічних підставок, які вільно переміщуються вздовж каркаса по горизонтальним направляючим;
- забезпечують відсутність шумів в робочому приміщенні і вібрацій вимірювальної ділянки установки від вентиляторного блоку за рахунок його розміщення в окремому приміщенні;

- забезпечують високоточне вимірювання температури робочого середовища в трубопроводному тракті установки, а також оточуючого повітря завдяки використанню електронних термометрів з границями абсолютної похибки не більше $\pm 0,03$ °C;
- споживання електроенергії у 2 рази менш, ніж у відомих повірочних установок;
- використання п'яти взаємозамінних контролерів забезпечує високу надійність отримання даних і передавання їх для обробки на ПК установки в реальному часі;
- програмне забезпечення установки дозволяє реєструвати тренди миттєвих витрат і оцінювати їх коливання.

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

Нормовані такі метрологічні характеристики:

- границі основної відносної похибки вимірювання об'єму газу за показами еталонних лічильників в робочих діапазонах не перевищують $\pm 0,25$ %;
- діапазон витрати повітря, відтворюваний установкою – від 0,5 до 2500 м³/Г;
- кількість еталонних лічильників – 4;
- діаметр умовного проходу лічильників, що калібруються (повіряються) від DN 40 до DN 200.

3.2 Метрологічне дослідження часово–імпульсних витратомірів

У підрозділі використані результати метрологічних досліджень розроблених витратомірів, що реалізують удосконалений часово–імпульсний ультразвуковий метод вимірювання витрати текучого середовища, отримані за період з 1996 року по теперішній час [90–92].

Метрологічне дослідження розроблених витратомірів проводилися відповідно до існуючих Програм і Методик на еталонних витратомірних

установках РОУ–180 (ННЦ «Інститут метрології»); 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 $\pm 0,2 \%$) фірми «Дивайс», м. Харків; на автоматизованих повірочних установках АПУ–011/40 і АПУ–Г–011/2500 (ПрАТ «Енергооблік», м. Харків).

3.2.1 Метрологічне дослідження одноканальних витратомірів

Досліджувалася врізана секція розробленого (п.п. 2.1.1) витратоміра УВР–011, який реалізує одноканальний ультразвуковий метод вимірювання з діаметральним розміщенням ПЕА у V–спосіб.

Дослідження здійснювалися на АПУ за методикою, розробленою і затвердженою ДП «Харківстандартметрологія», шляхом звірення інтегральної витрати, виміряної штатним витратоміром «Кор–Мас», атестованого по класу 0,15, з результатами вимірювання витратоміром. Вимірювання проводилися тільки при значеннях витрати $900 \text{ м}^3/\text{год}$ і $1800 \text{ м}^3/\text{год}$. При кожному значенні витрати було виконано по 11 спостережень.

Результати виконаних досліджень витратоміра УВР-011 наведено на рис. 3.5.

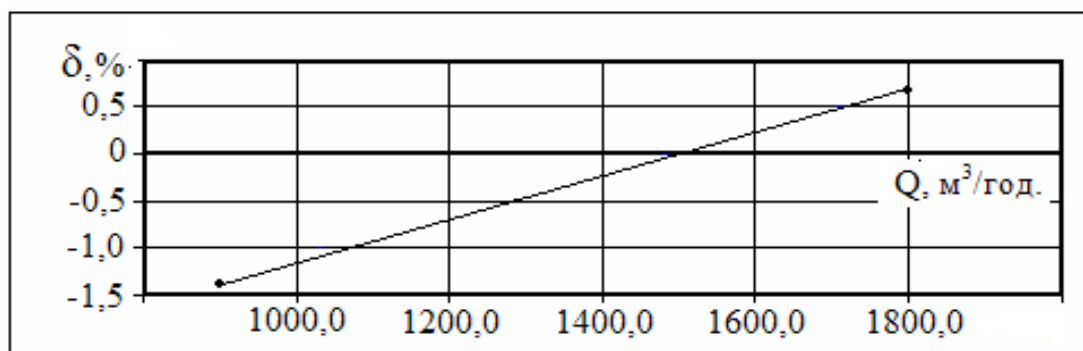


Рисунок 3.5 – Результати метрологічного дослідження витратоміру УВР–011 (ПЕА розміщені у V–спосіб)

Результати виконаних досліджень витратоміра УВЗ-011 показують, що значення його сумарної відносної похибки вимірювання витрати не виходять за границі $\pm 1,5\%$.

На рис. 3.6 наведені результати дослідження витратоміра УВР-011 DN50 із врізаною секцією, який реалізує одноканальний ультразвуковий метод вимірювання з розміщенням ПЕА за дельта-схемою (п. 2.1.2). Дослідження виконувалися на витратовимірних установках Danfoss Carlig фірми «Дивайс», м. Харків, і на трубопоршневій установці (границі похибки завдання об'єму $\pm 0,06\%$) нафтопроводу Лисичанськ–Кременчук, м. Кременчук в умовах експлуатації. При кожному значенні витрати було виконано по 11 спостережень. Похибки вимірювання витрати середовища отримані при збільшенні витрати та її наступному зменшенні (дві криві на рис. 3.6) практично співпадають.

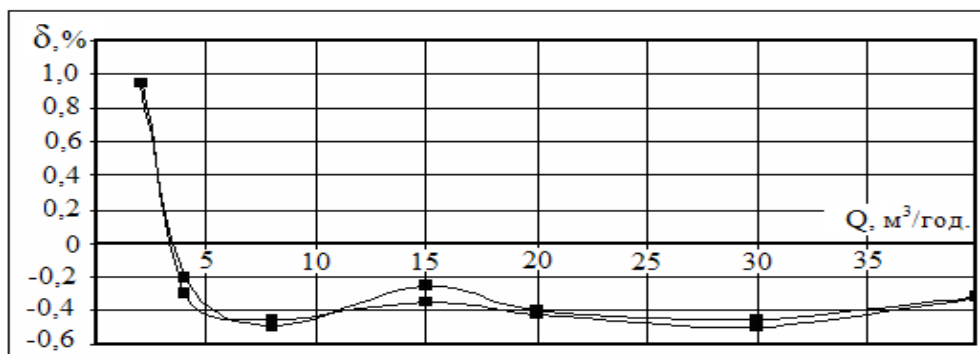


Рисунок 3.6 – Результати метрологічного дослідження витратоміру УВР-011 (ПЕА розміщені за дельта-схемою)

Отримані результати показують, що значення відносної похибки вимірювання витрати середовища розробленим за результатами виконаних досліджень витратоміром УВР-011 не перевищує $\pm 1,0\%$.

3.2.2 Метрологічне дослідження двоканальних витратомірів

Досліджувалася врізана секція витратоміра УВР–011, який реалізує двоканальний ультразвуковий метод вимірювання з діагональним взаємоперпендикулярним розміщенням ПЕА у V–спосіб (п. 2.1.1).

Дослідження здійснювалося на АПУ-Г за умов, викладених у попередньому підпункті. Вимірювання проводилися в діапазоні витрати 950 м³/год і 1850 м³/год. При кожному значенні витрати було виконано по 11 спостережень.

Результати дослідження наведено на рис. 3.7.

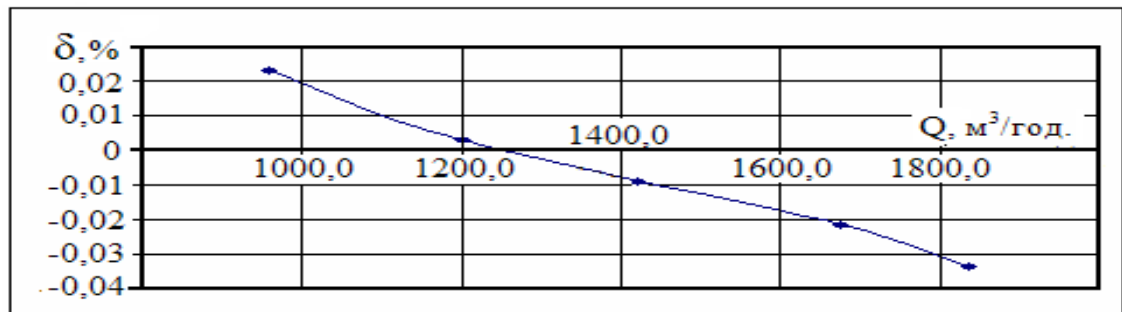


Рисунок 3.7 – Результати метрологічного дослідження двоканального витратоміру УВР–011 (ПЕА розміщені у V–спосіб)

Встановлено, що значення відносної похибки вимірювання витрати двоканальним витратоміром УВР-011 не перевищує $\pm 0,5$ %. У порівнянні з результатами, описаними в п. 3.2.1, де похибка знаходилася в границях $\pm 1,5$ %, досягнуто майже трикратне зменшення похибки. Це пояснюється зменшенням впливу гідродинамічної складової похибки, зумовленої асиметрією потоку за рахунок запропонованих та розроблених в п. 2.1.1 рішень.

На рис. 3.8 наведені результати порівняльних вимірювань на НПС «Мозир» нафтопроводу «Дружба» (DN 514) витрати розробленим витратоміром УВР–011 і витратоміром фірми Controlotron (Німеччина).

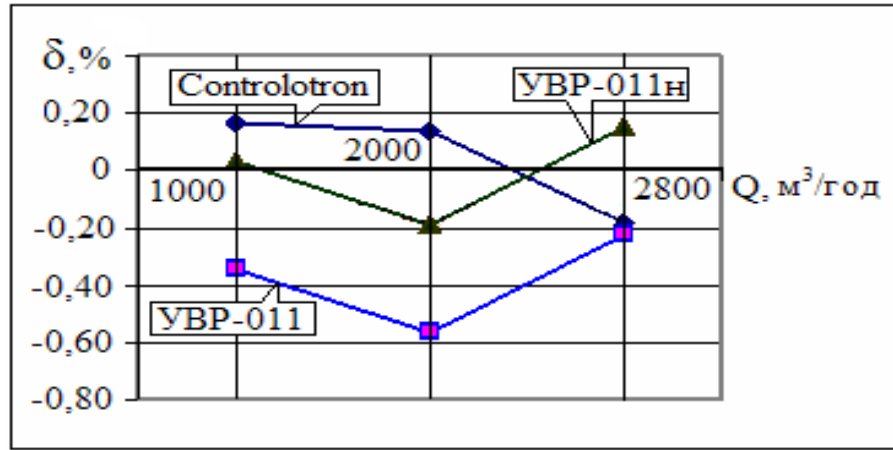


Рисунок 3.8 – Результати порівняльних вимірювань

На рис 3.9 наведено гістограми розподілу похибок цих вимірювань витрати в окремі моменти часу для величин еталонної витрати $Q = 1000 \text{ м}^3/\text{год}$, $2000 \text{ м}^3/\text{год}$ і $2800 \text{ м}^3/\text{год}$, відповідно.

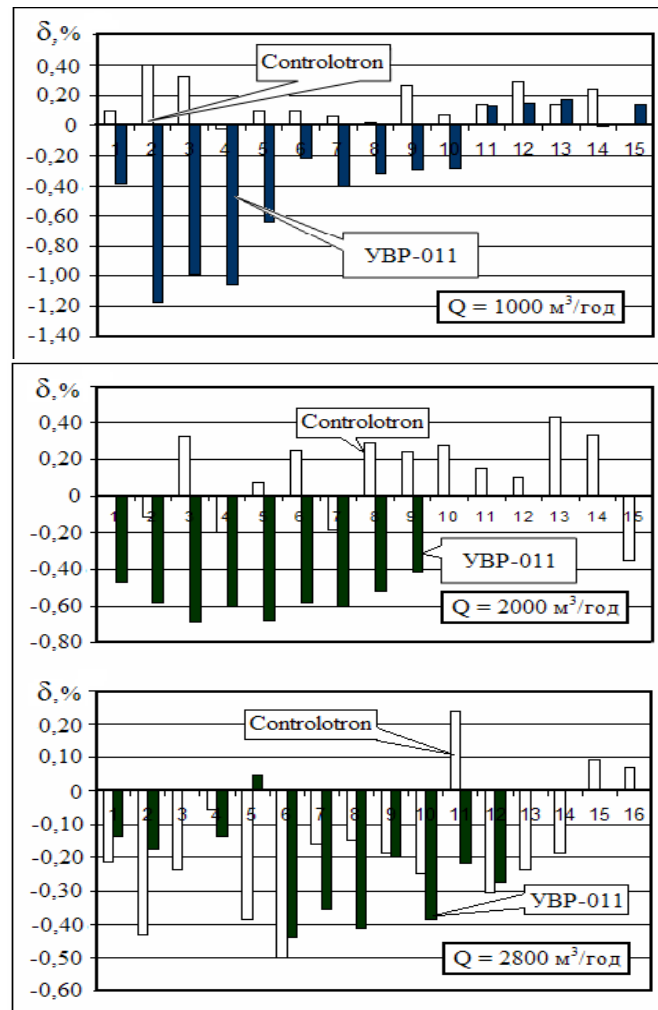


Рисунок 3.9 – Гістограми розподілу похибок вимірювання витрати

Аналіз отриманих результатів показує, що похибка вимірювання витрати витратоміром УВР–011 стабільно зміщена в негативну область і може бути усунена при налаштуванні, що і підтверджують результати дослідження (крива УВР–011 на рис. 3.8).

Таким чином, результати спільних експериментальних метрологічних досліджень характеристик витратоміра УВР–011 і витратоміра фірми Controlotron показує, що значення їх похибок укладаються в границі $\pm 0,2\%$, і вони можуть бути віднесені до одного класу.

На рис. 3.10 наведені результати дослідження двоканального витратоміра УВР-011 з діагональним взаємо–перпендикулярним розміщенням врізаних п'єзоелементів у V–спосіб (п. 2.1.2, рис. 2.8–а). Дослідження проводилися на атестованому збірному вузлі НПС «Кременчуг» (границі похибки вимірювання $\pm 0,15\%$) з попереднім настроюванням витратоміра при максимальному значенні витрати у двох режимах: з фіксованим значенням гідродинамічного коефіцієнта S_G та з його коригуванням в залежності від числа Рейнольдса.

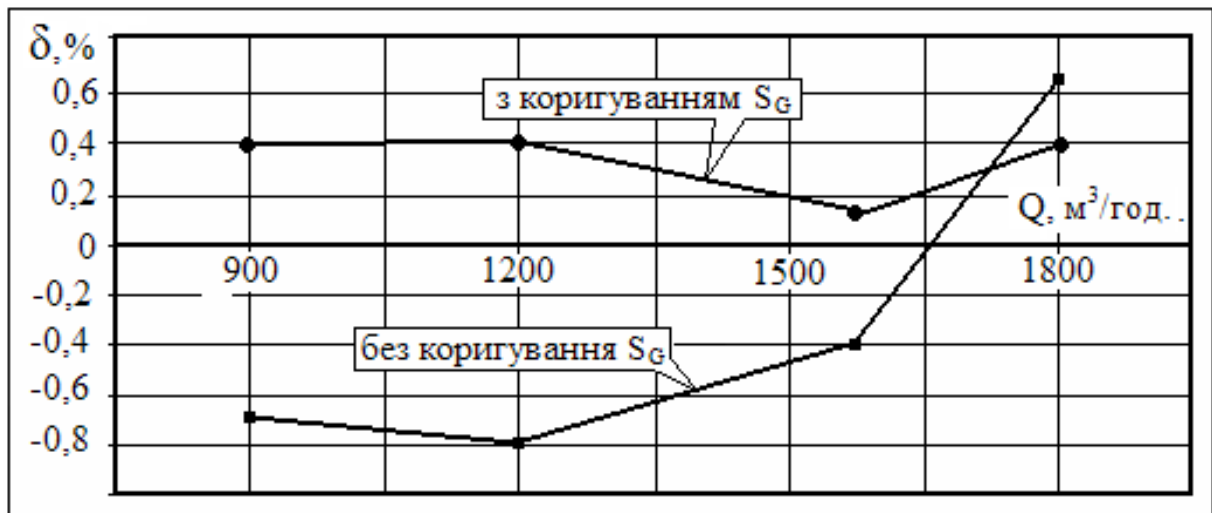


Рисунок 3.10 – Результати дослідження впливу гідродинамічного коефіцієнта

Отримані результати виконаних досліджень впливу гідродинамічного коефіцієнта (рис.3.10) дозволяють зробити висновок, що відносна похибка

вимірювання у режимі з коригуванням S_G майже вдвічі менша за отриману з фіксованим значенням S_G і не виходить за границі $\pm 0,4\%$ проти $\pm 0,8\%$.

3.2.3 Результати метрологічних досліджень і експлуатації часово-імпульсних витратомірів

Багаторічний досвід експлуатації на вузлах обліку рідин ультразвукових часово-імпульсних витратомірів УВР-011 різних варіантів побудови (Додаток Ж) дозволив ініціювати збільшення міжповірчого інтервалу відповідно до регламентованих вимог [90, 94, 96]. Для обґрунтування цієї ініціативи було виконано розрахунки [90, 95] за даними протоколів повірок (калібрувань), наведеними у Додатку К відповідно до раніш розробленої методики [97].

Розраховані середні значення та СКВ результатів вимірювань при первинній і періодичних повірках $m(0)$, $\sigma(0)$, $m(2)$, $\sigma(2)$, $m(4)$, $\sigma(4)$ мають наступні значення:

$$\begin{aligned} m(0) &= 0,074; & \sigma(0) &= 0,371; \\ m(2) &= 0,036; & \sigma(2) &= 0,358; \\ m(4) &= 0,031; & \sigma(4) &= 0,358. \end{aligned}$$

Границі допустимої відносної похибки вимірювання витрати $\delta = \pm 1,0\%$ при довірчій імовірності $P = 0,95$.

Імовірність роботи витратоміра без метрологічних відмов протягом міжповірчого інтервалу ($T = 2$ роки) розрахуємо за формулою [95, 97]:

$$P(2) = \frac{\Phi[D(2)] - \Phi[C(2)]}{\Phi[G(0, \Delta)] - \Phi[G(0, -\Delta)]}, \quad (3.1)$$

$$\text{де } D(2) = \min_{t \in [0, 2]} [G(t, \Delta)],$$

$$G(0, \Delta) = \frac{\Delta^P - m(0)}{\sigma(0)} = \frac{1 - 0,074}{0,371} = 2,498 ;$$

$$G(2, \Delta) = \frac{\Delta^P - m(2)}{\sigma(2)} = \frac{1 - 0,036}{0,358} = 2,69 ;$$

$$D(2) = \min_{t \in [0,2]} [G(t, \Delta)] = 2,498 .$$

$$C(2) = \min_{t \in [0,2]} [G(t, \Delta)] ;$$

$$G(0, -\Delta) = \frac{-\Delta^P - m(0)}{\sigma(0)} = \frac{-1 - 0,074}{0,371} = -2,899 ;$$

$$G(2, -\Delta) = \frac{-\Delta^P - m(2)}{\sigma(2)} = \frac{-1 - 0,036}{0,358} = -2,892 ;$$

$$C(2) = \max_{t \in [0,2]} [G(t, -\Delta)] = -2,892 .$$

Підставимо знайдені значення в (3.1) і отримаємо:

$$\begin{aligned} P(2) &= \frac{\Phi[D(2)] - \Phi[C(2)]}{\Phi[G(0, \Delta)] - \Phi[G(0, -\Delta)]} = \frac{\Phi[2,498] - \Phi[-2,892]}{\Phi[2,498] - \Phi[-2,899]} = \\ &= \frac{0,9938 - 1,912 \cdot 10^{-3}}{0,9938 - 1,873 \cdot 10^{-3}} = 0,999961 \end{aligned}$$

Виконаємо аналогічні розрахунки для міжповірчого інтервалу $T = 4$ роки.

$$P(4) = \frac{\Phi[D(4)] - \Phi[C(4)]}{\Phi[G(0, \Delta)] - \Phi[G(0, -\Delta)]} . \quad (3.2)$$

$$\text{де } D(4) = \min_{t \in [0,4]} [G(t, \Delta)] ,$$

$$G(0, \Delta) = \frac{\Delta^P - m(0)}{\sigma(0)} = \frac{1 - 0,074}{0,371} = 2,498 ;$$

$$G(4, \Delta) = \frac{\Delta^P - m(4)}{\sigma(4)} = \frac{1 - 0,031}{0,358} = 2,705 ;$$

$$D(4) = \min_{t \in [0,4]} [G(t, \Delta)] = 2,498 ;$$

$$C(4) = \min_{t \in [0,4]} [G(t, \Delta)];$$

$$G(0, -\Delta) = \frac{-\Delta^P - m(0)}{\sigma(0)} = \frac{-1 - 0,074}{0,371} = -2,899 ;$$

$$G(4, -\Delta) = \frac{-\Delta^P - m(4)}{\sigma(4)} = \frac{-1 - 0,031}{0,358} = -2,877 ;$$

$$C(4) = \max_{t \in [0,4]} [G(t, -\Delta)] = -2,877 .$$

Також, підставимо знайдені значення в (4.2) і отримаємо:

$$\begin{aligned} P(4) &= \frac{\Phi[D(4)] - \Phi[C(4)]}{\Phi[G(0, \Delta 0)] - \Phi[G(0, -\Delta)]} = \frac{\Phi[2,498] - \Phi[-2,877]}{\Phi[2,498] - \Phi[-2,899]} = \\ &= \frac{0,9938 - 2,009 \cdot 10^{-3}}{0,9938 - 1,873 \cdot 10^{-3}} = 0,999862 \end{aligned}$$

Таким чином, розрахована за даними первинної та періодичних повірок (калібрувань) імовірність роботи витратомірів УВР-011 без метрологічних відмов, складає:

- $P = 0,999961$ для міжповірчого інтервалу $T = 2$ роки;
- $P = 0,999862$ для міжповірчого інтервалу $T = 4$ роки.

Обидва розраховані значення перевищують нормативне значення імовірності роботи ЗВТ без метрологічних відмов $P = 0,95$, яке регламентується [96], що гарантує роботу витратомірів без метрологічних відмов протягом міжповірчого інтервалу $T = 4$ роки. Це дає змогу вдвічі збільшити міжповірчний інтервал витратоміра УВР-011 і, як слід, зменшити його експлуатаційні витрати.

3.3 Метрологічне дослідження доплерівських витратомірів

Досліджувалася одна з розроблених модифікацій доплерівських ультразвукових витратомірів УДР-011 (DN 100), накладні ПЕА якого

встановлені на відрізку трубопровода, який реалізує доплерівський ультразвуковий метод вимірювання (рис. 3.13).

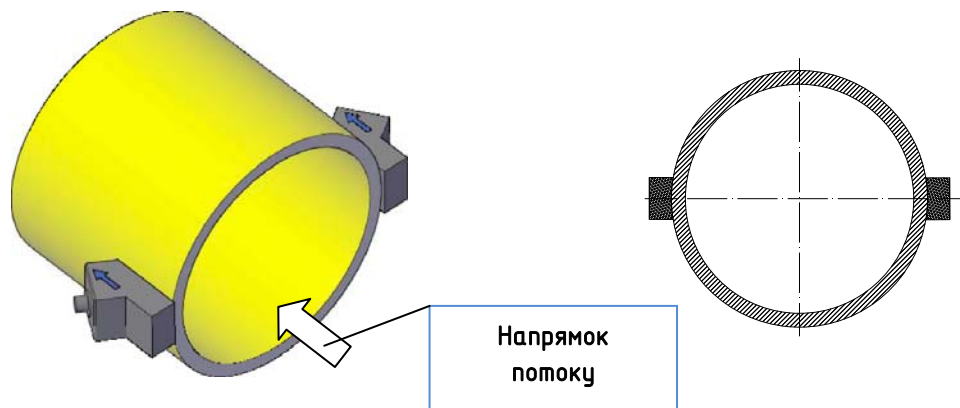


Рисунок 3.13 – Схема витратоміра УДР-011

Дослідження здійснювалося на АПУ-011/40 за методикою, розробленою і затвердженою ДП «Харківстандартметрологія» [96], шляхом звірення витрати, вимірної еталонним витратоміром установки, границі відносної похибки вимірювання якого $\pm 0,25\%$, з результатами вимірювання досліджуваним витратоміром УДР-011 з накладним ПЕА (рис. 3.13).

В табл. 3.1 наведені нормовані [96, 97] вимоги до точнісних характеристик доплерівських витратомірів в заданих діапазонах витрати.

Таблиця 3.1 Вимоги до точнісних характеристик доплерівських витратомірів

Витрата, м ³ /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

Вимірювання проводилися тільки при відтворюваних для даного типорозміру витратоміра значеннях витрати: 2,0 м³/год, 10,59 м³/год, 20,0 м³/год, 29,0 м³/год і 38,0 м³/год. Робоча рідина – вода. Похибка завдання витрат – не гірше $\pm 5\%$. Для кожного значення заданої витрати виконано не менше, ніж 3 спостереження.

За результатами експериментальних вимірювань для кожного заданого значення витрати було визначено:

- середнє арифметичне значення вимірюваної витрати для кожного заданого

$$\text{значення витрати } Q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i ;$$

- абсолютну похибку вимірювання витрати між показами еталонного витратоміру та досліджуваного для кожної витрати $\Delta Q = Q - Q_0$,

де Q_0 – відповідні покази еталонного витратоміру, м³/год;

- відносну похибку вимірювання витрати $\delta Q = \frac{\Delta Q}{Q_0} \cdot 100 \%$.

На рис. 3.14 наведено отримані результати виконаних досліджень, усереднені за чотирма серіями.

Результати виконаних експериментальних досліджень показують, що значення відносної похибки вимірювання витрати розробленим витратоміром УДР-011 з накладними ПЕА не перевищують нормовані для таких ЗВТ значень.

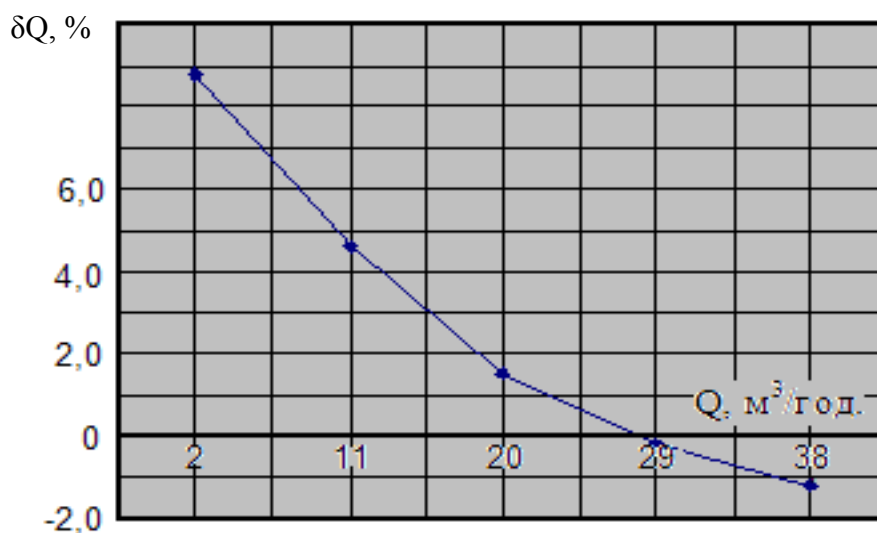


Рисунок 3.14 – Результати метрологічного дослідження доплерівського витратоміра УДР-011

3.4 Метрологічне дослідження витратомірів газу

У підрозділі наведені результати метрологічних досліджень двоканалного ультразвукового витратоміра газу ГУВР–011 різних варіантів побудови [97], що використовують діаметральне взаємоперпендикулярне розташування акустичних каналів.

Дослідження метрологічних характеристик розроблених витратомірів проводилися відповідно до розробленої ННЦ «Інститут метрології» (м. Харків) методики [94, 97, 98] на атестованих стендах і повірочних установках уповноважених організацій України та закордонних фірм, а також на автоматизованій повірочній установці АПУ–011/2500 (повітря, атмосферний тиск) ПРАТ «Енергооблік», м. Харків.

3.4.1 Експериментальні дослідження ультразвукових витратомірів газу на різних робочих середовищах

Як правило, метрологічне дослідження витратоміри проходять на повірочних стендах з використанням в якості вимірюваного середовища повітря при тиску, близькому до атмосферного [8]. Це зумовлено декількома причинами:

- гарантується повна безпека дослідження;
- не потрібно визначати щільність робочого середовища;
- забезпечується висока повторюваність результатів дослідження.

В умовах же експлуатації витратоміри використовуються для обліку природного газу і під більш високим тиском, через що виникає питання про коректність таких метрологічних процедур (калібровки ЗВТ на повітрі) з точки зору реальної похибки витратоміра в робочих умовах (на природному газі).

Закордонні виробники проводять калібрування витратомірів як на повітрі при атмосферному тиску, так і на природному газі при різних тисках. 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) [93, 94] показує, що метрологічні характеристики витратомірів відрізняються в залежності від значень тисків вимірюваного середовища і його виду приблизно на $\pm 1,0\%$.

На рис. 3.15 наведені результати метрологічних досліджень витратоміра газу ГУВР-011 (DN150), попередньо відкаліброваного на установці АПУ-Г-011/2500, м. Харків (п 4.1.2), на стенді лабораторії філії «Газтехніка» ВАТ «Київоблгаз», м. Київ (повітря, атмосферний тиск), на стенді вимірювальної лабораторії ВАТ «Івано-Франківськгаз», м. Івано-Франківськ (природний газ, тиск 0,4 МПа) і на установці «Force Technology», Данія (природний газ, тиск 0,4 МПа).

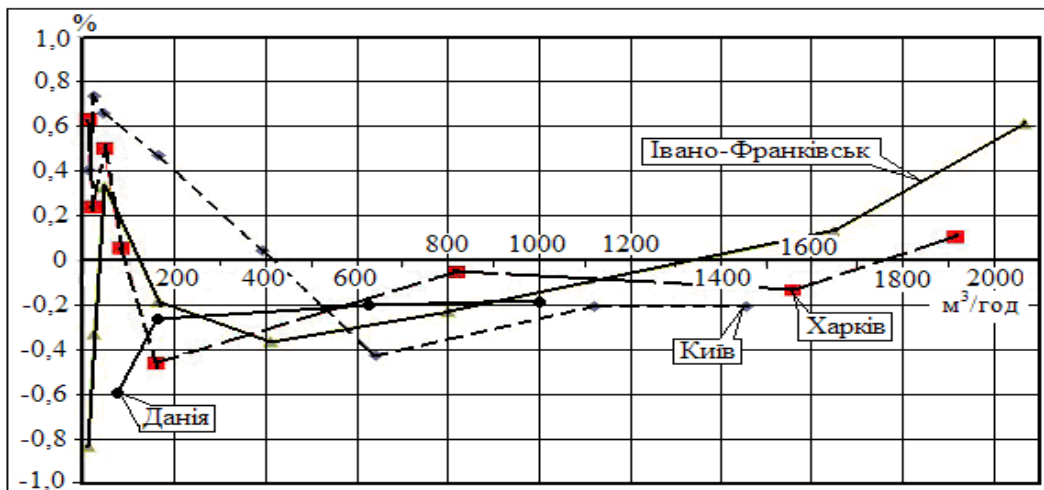


Рисунок 3.15 – Порівняльні результати метрологічного дослідження витратоміру ГУВР-011

В результаті проведених досліджень та порівняння отриманих результатів встановлено, що розбіжності кривих калібрування 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 та дозволяє зробити висновок про можливість здійснювати

калібровку (повірку) витратомірів газу ГУВР-011, працюючих на природному газі, на повітрі.

Оскільки зроблений висновок є вельми принциповим для метрологічного забезпечення витратометрії природного газу і потребує більш ґрунтовного підтвердження, в наступному розділі наведені результати його обґрунтування.

3.4.2 Метрологічне дослідження двоканального витратоміра газу ГУВР-011

З метою проведення більш глибоких досліджень впливу вида вимірювального середовища на метрологічні характеристики розробленого УЗВ ГУВР-011, було виконано відповідні порівняльні вимірювання витрати природного газу і повітря.

Метрологічні характеристики двоканального газового ультразвукового витратоміра ГУВР-011 із врізаною секцією DN100 (рис. 3.16) досліджувалися 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 (неперервна лінія) і на «Установці для повірки лічильників на природному газі» на середовищі «природний газ» в діапазоні витрат 1:100.

В першому випадку вимірювання виконувалися в діапазоні витрат від 25 м³/год до 500 м³/год. При кожному значенні витрати було виконано по 3 усереднених вимірювання. Похибки отриманих результатів спостережень не виходили за границі допустимих похибок витратоміра.

В другому випадку вимірювання виконувалися в діапазоні витрат від 6 до 600 м³/год. При кожному значенні витрати було виконано по 3 усереднених вимірювання. Похибки отриманих результатів спостережень також не виходили за границі допустимих похибок витратоміра.

Результати виконаних вимірювань представлені на рис. 3.16, де цільна лінія відповідає першому випадку, пунктирна – другому.

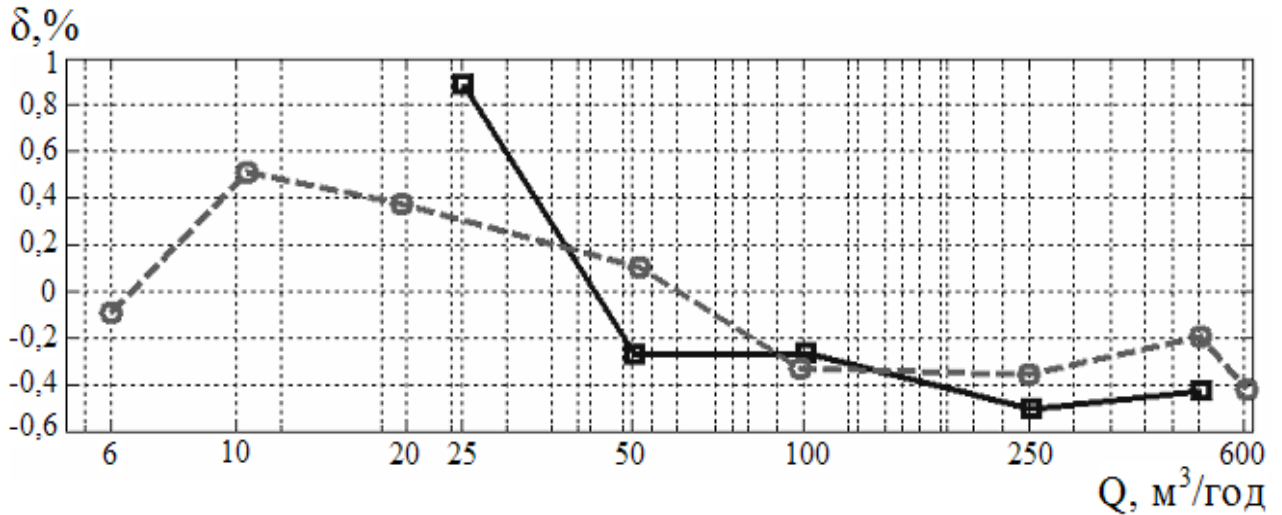


Рисунок 3.16 – Результати метрологічного дослідження витратоміра ГУВР-011 на різних середовищах

Таким чином, виконані дослідження метрологічних характеристик витратоміра газу ГУВР-011 на двох робочих середовищах – «повітря» та «природний газ» – показали, що його показники не залежать від типу вимірюваного газу. Тому для визначення метрологічних характеристик розробленого витратоміра природного газу ГУВР-011 достатньо і безпечніше проводити його калібрування (повірку) на повітряному середовищі.

Динамічні дослідження того ж самого витратоміра проводилися у вересні 2007 р. на установці ТЕМП-1 (м. Чугуїв) для витрати близько 100 м³/год в діапазоні витрат 1:100 (рис 3.17): верхня крива – в першому каналі, нижня крива – в другому каналі, середня крива – в комбінаційному каналі витратоміра (усереднені значення першого та другого каналів).

Показано, що розбіжності близько 10 % між першим і другим каналами зумовлені асиметрією і викривленнями потоку, які вносить еталонний ротаційний лічильник, завдяки запропонованим рішенням розділу 2.1 в комбінаційному каналі компенсуються.

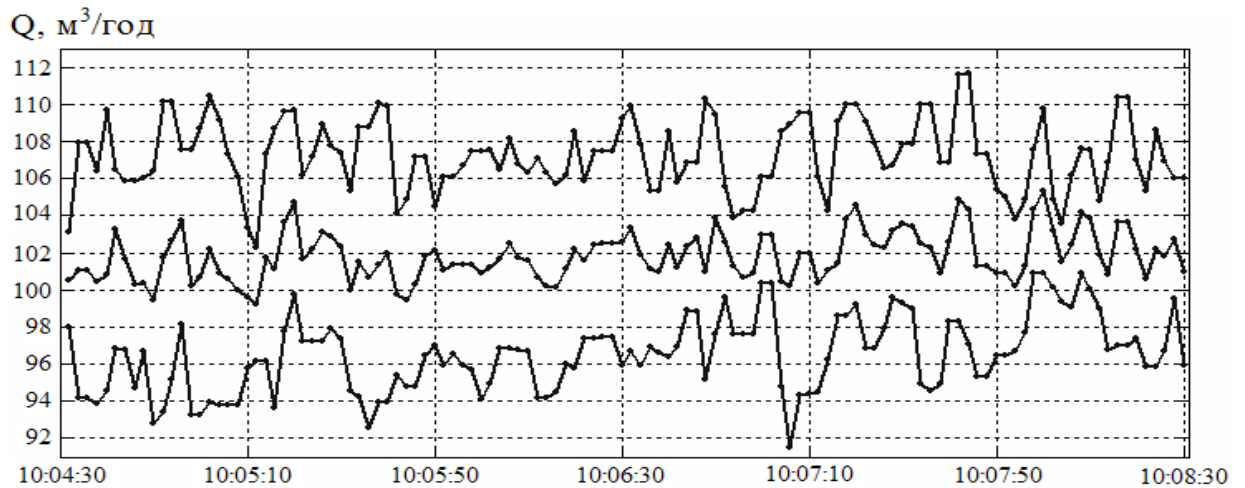


Рисунок 3.17 – Результати динамічного дослідження витратоміра ГУВР-011

Таким, чином, на підставі результатів виконаних репрезентативних експериментальних досліджень можна зробити наступні висновки:

- при вимірюваннях в комбінаційному каналі похибки, зумовлені асиметрією потоку, компенсуються, що забезпечує основну відносну похибку визначення витрати та об'єму газу в діапазоні витрат 1:100, яка не виходить за границі $\pm 1,0\%$;
- метрологічні характеристики ультразвукового витратоміра ГУВР-011, який розроблено в результаті виконаних теоретичних досліджень, не залежать від типу газу;
- калібрування (повірка) УЗВ ГУВР-011, призначеного для вимірювання витрати природного газу, може здійснюватися на повітряному середовищі.

3.4.3 Порівняння методів розрахунку метрологічних характеристик газового витратоміра ГУВР-011

З метою підтвердження метрологічних характеристик розробленого двоканального лічильника газу ГУВР-011 було проведено його метрологічне дослідження на повірочній установці АПУ-Г-011/2500 [122] згідно до атестованої відповідним чином методики [125], в якій враховані основні

положення рекомендацій [126].

Дослідження здійснювалося за [125] методом калібрування, а потім, повірки лічильника шляхом безпосереднього звірення контрольного об'єму повітря, що пройшов через повірочну установку, з об'ємом повітря, вимірним досліджуваним лічильником. Вимірювання виконувалися для семи значень витрати Q : Q_{min} ; $(Q_t - Q_{min})/2 + Q_{min}$; Q_t ; $(Q_{max} - Q_t)/8 + Q_t$; $(Q_{max} - Q_t)/4 + Q_t$; $(Q_{max} - Q_t)/2 + Q_t$; Q_{max} .

Для кожного значення витрати проводилося по три вимірювання, після чого обчислювався усереднений результат i , з урахуванням тиску та температури вимірюваного середовища, обчислювалася відносна похибка вимірювання:

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{\left(\sigma^2 + \frac{1}{3} \Theta_{\Sigma}^2 \right)}, \% \quad (3.3)$$

де σ і Θ_{Σ} - СКВ та НСП виконаних вимірювань, %.

НСП вимірювань, в основному, визначається похибкою установки і не перевищує 0,3 %.

Максимальне значення з отриманих результатів обчислень приймалося за відносну похибку вимірювання. За критерій позитивного результату повірки було прийняте правило: якщо це значення не перевищує границь допустимих значень (для комерційного обліку газу $\pm 1,0$ %), результат повірки вважають позитивним.

Результати дослідження наведені на рис. 3.18. Там же наведені значення СКВ результатів вимірювань.

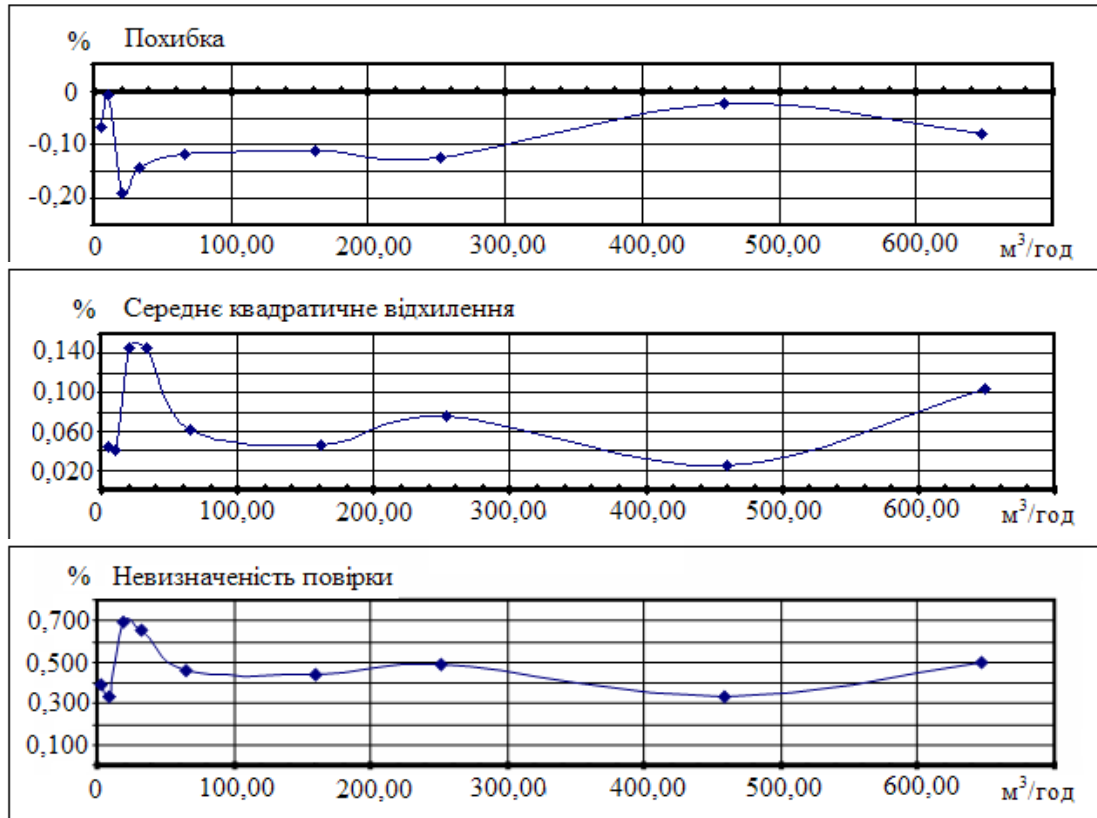


Рисунок 3.18 – Результати досліджень метрологічних характеристик витратоміра ГУВР-011

Результати виконаних експериментальних досліджень підтвердили заявлені метрологічні характеристики розробленого УЗВ ГУВР-011:

- його максимальна похибка вимірювання витрати середовища в основному діапазоні витрат не виходить за межі $\pm 0,2$ %, що повністю відповідає вимогам максимально допустимої похибки для лічильників комерційного обліку газу - ± 1 %;
- СКВ вимірювань витрати газу не перевищує $\pm 0,15$ %, що також задовольняє вимогам, які висуваються для УЗВ комерційного обліку.

3.5 Рекомендації щодо використання розроблених витратомірів

Із гамми розроблених УЗВ, 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 УЗВ УДР-011 – для рідин з домішками, а також газові витратоміри ГУВР-011. Їх виробництво сертифіковане міжнародним органом з сертифікації «Bureau Veritas» на відповідність вимогам стандарту ISO 9001-2000 [91].

Широкий діапазон вимірювання, чутливість, висока надійність елементної бази, здатність до удосконалення дозволяють використовувати ультразвукові витратоміри:

- в галузях газо- та нафтовидобування, транспортування газу, нафти, нафтопродуктів та інших рідин для комерційного та технологічного обліку, а також для виявлення несанкціонованих витоків;
- в житлово-комунальному господарстві для обліку витрат енергоресурсів (води, теплоносіїв, пари тощо), обліку балансу водопостачання та водовідведення, виявлення втрат енергоресурсів тощо [99-101].

Потенційні можливості розроблених витратомірів не обмежують перелічені галузі застосування.

3.6 Висновки по розділу 3

На основі виконаних досліджень:

1. Розроблена, виготовлена і атестована відповідним чином автоматизована повірочна установка АПУ-011/40, призначена для метрологічного дослідження УЗВ рідин в процесі їх виробництва та відпрацьовування конструкцій нових розробок, а також, метрологічного забезпечення калібрувальних (повірочних) робіт в процесі їх експлуатації. Встановлені метрологічні характеристики установки: границі відносних похибок вимірювання маси води шляхом зважування – не більше $\pm 0,06$ %, об'єму води шляхом зважування – не більше $\pm 0,08$ %, об'єму води за показами еталонних витратомірів – не більше $\pm 0,25$ %.

2. Розроблена, виготовлена і атестована повірочна установка АПУ-Г-011/2500, яка призначена для метрологічного дослідження витратомірів газу в процесі їх виробництва, відпрацьовування нових конструкцій, а також, метрологічного забезпечення калібрувальних (повірочних) робіт в процесі їх експлуатації. Установка здатна відтворювати потік вимірюваного середовища (повітря) у діапазоні витрат від $0,5 \text{ м}^3/\text{год}$ до $2500 \text{ м}^3/\text{год}$ при абсолютному тиску від нуля до 110 кПа з границями основної відносної похибки вимірювання об'єму газу за показами еталонних лічильників в робочих діапазонах не більше $\pm 0,25 \%$.

3. Виконано метрологічне дослідження розроблених часо-імпульсних одно-, двох- та багатоканальних витратомірів. Показано, що їх динамічний діапазон складає 1/160, границі похибки вимірювання в основному діапазоні не перевищують $\pm 1,0 \%$, а самі витратоміри, таким чином, відповідають сучасним вимогам і здатні до використання для обліку витрати рідин і газів.

4. Проведено статистичний аналіз експериментальних результатів метрологічних досліджень і експлуатації часо-імпульсних витратомірів, що дозволило вдвічі збільшити їх міжповірчий інтервал.

5. Проведено метрологічне дослідження розробленого доплерівського витратоміра, які підтверджують правильність теоретичних підходів і свідчать про його відповідність сучасним вимогам.

6. Наведені результати метрологічних досліджень розробленого газового витратоміра ГУВР-011 на різних робочих середовищах та діапазонах витрати, що дозволило зробити такі висновки:

- результати вимірювання витрати повітря і газу цими УЗВ практично збіжні, що дозволяє здійснювати калібровку (повірку) витратомірів, що працюють на природному газі, на повітрі;
- запропонована і розроблена методологія компенсації асиметрії потоку забезпечує основну відносну похибку вимірювання витрати та об'єму газу в діапазоні витрат 1:100, яка не виходить за границі $\pm 1,0 \%$;
- метрологічні характеристики витратоміра не залежать від типу газу.

7. Сформульовані рекомендації щодо застосування розроблених ультразвукових витратомірів для комерційного та технологічного обліку в галузях газо– та нафтовидобування, транспортування газу, нафти, нафтопродуктів та інших рідин, в житлово–комунальному господарстві та інших галузях.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА МЕТОДУ ОЦІНЮВАННЯ ТОЧНОСТІ УЗВ
ТА МЕТОДУ ЇХ КАЛІБРУВАННЯ

Результати досліджень, наведені в розділах 1 – 3 данної роботи, а саме – розробка удосконалених одно-, двох- та багатоканальних часо-імпульсних витратомірів, доплерівських витратомірів, повірочних установок та стендів для їх калібрування (повірки), забезпечують можливість суттєво покращити технічні та метрологічні характеристики УЗВ, значно підвищити їх точність, розширити робочий діапазон вимірюваних витрат [97, 98].

Разом з тим, аналіз сучасного метрологічного забезпечення витратомірів та лічильників рідини і газів показав серйозну обмеженість існуючих повірочних установок та калібрувальних стендів як з точки зору забезпечення метрологічних характеристик, так і з забезпечення необхідних діапазонів витрат та умов проведення досліджень [90, 98].

У зв'язку з цим, виникає необхідність вирішення ряду задач щодо вдосконалення метрологічного забезпечення вказаних витратомірів і лічильників і, першу чергу, забезпечення калібрування (повірки) ЗВТ витрати газу великих калібрів з витратами від 10000 м³/год до 16000 м³/год. Це обумовлено підвищенням попиту на лічильники газу великих діаметрів (300 мм та вище).

В розділі наведені результати розробки та досліджень методик калібрування УЗВ в діапазоні витрат, що перевищують верхні границі існуючих витратомірних установок та повірочних стендів, а також, визначення похибок УЗВ на основі CFD-моделювання для різних умов їх експлуатації.

4.1 Розробка методології калібрування ультразвукових витратомірів в діапазоні витрат, що перевищує верхню границю існуючих витратовимірювальних установок

При випуску з виробництва єдиним прямим способом встановити метрологічні характеристики ультразвукових витратомірів газу є процедура їх калібрування (первинної повірки), виконувана методом звірення показань цих ЗВТ з високоточним еталоном об'єму газу (тобто виконується «проливка» витратоміра на еталонній установці) [90, 91].

Незважаючи на переконливі переваги, даний спосіб має й недоліки.

По–перше, в даний час провідні виробники УЗВ 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. В табл. 4.1 наведені характеристики основних відомих стендів Європи, України, Росії, що застосовуються для калібрування та повірки лічильників газу.

По–третє, проведення періодичних калібрувань УЗВ великих діаметрів (300 мм і більше) ускладнюється у зв'язку з обмеженістю технічних можливостей, а саме, обмеженістю верхнього діапазону відтворюваних витрат, багатьох повірочних стендів та установок.

Разом з тим, в даний час має місце збільшення попиту на ЗВТ витрати газу великих діаметрів ($DN > 300$ мм).

Однак, 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 м³/год включно, в той час як виробниками розробляються і впроваджуються у виробництво лічильники великих калібрів (DN > 300 мм) з максимальними витратами до 16000 м³/год.

Таблиця 4.1 – Технічні характеристики випробувальних стендів Європи, України, Росії

	Випробувальний стенд	Розширена невизначеність установки, %	Невизначеність витратомірів, що повіряються %	Максимальна відтворювана витрата, м ³ /год
1	PIGSAR	0,2 – 0,25	0,6 – 0,7	6500
2	Elster Instromet	0,15	0,5	30000
3	«Piscine»	0,15	0,5	10000
4	FORCE TECHNOLOGY	0,2	0,6 – 0,7	10000
5	GL Noble Denton	0,21 – 0,33	0,6 – 1,0	DN ≤ 900
6	СПУ–ПГ–2М	0,3	1,0	16000
7	Уральський метрологічний центр	0,3	1,0	10000
8	Установка Боярського метрологічного центру	0,1 – 0,2	0,3 – 0,5	10000 (не введена в експлуатацію)
9	РПДУ–41ПГ	0,1 – 0,2	0,3 – 0,5	8000 (не введена в експлуатацію)
10	ПАТ Івано–Франківськгаз	0,33	1,0	2500

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

У цьому зв'язку, імітаційні способи і методи калібрування (повірки), зокрема, УЗВ 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 зрозумілого мінімуму, саме запропоновано комбінований метод калібрування (повірки), розробці якого присвячено даний розділ роботи.

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

Для репрезентативності цих результатів були проведені експериментальні дослідження метрологічних характеристик 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.

В якості критерія визначення поведінки калібрувальних коефіцієнтів цих лічильників в проведених експериментах було обрано відносне відхилення

коригуючого коефіцієнта при поточній витраті газу до коефіцієнта корекції при витраті, що дорівнює половині максимальної:

$$\delta_Q = \frac{k_{50\%} - k_Q}{k_Q} \cdot 100\% \quad , \quad (4.1)$$

де $k_{50\%}$, k_Q – значення калібрувальних коефіцієнтів лічильників при витраті, рівній половині максимальної, і при поточній, відповідно.

Результати виконаних досліджень лічильників ГУВР–011 наведено на графіку рис. 4.1.

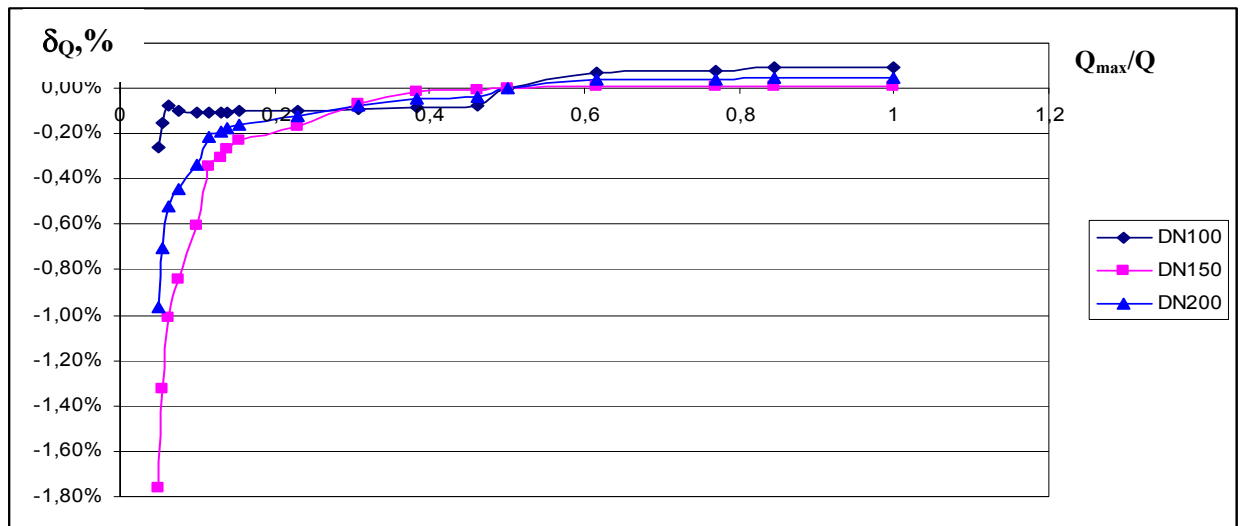


Рисунок 4.1 – Графіки похибок лічильників ГУВР–011 DN 100, 150, 200 мм

Типові результати калібрування чотирьох лічильників ГУВР–011 DN 150 (як приклад) наведені в таблиці Л.1 Додатка Л.

Отримані експериментальні результати, показують, що:

– калібрувальні коефіцієнти, відповідні інтервалу витрат у верхній половині діапазону лічильника ($Q \geq 0,5Q_{\max}$), залишаються практично постійними і рівними аналогічним коефіцієнтам, справедливим для його середини (максимальне відхилення не перевищує $\pm 0,3\%$);

– характер поведінки кривих похибок, а отже, і калібрувальних коефіцієнтів, практично однаковий для діаметрів 100 мм, 150 мм і 200 мм лічильників. Іншими словами, характер і величина відхилення коефіцієнтів калібрування практично лежить в границях похибки експерименту і не залежить від діаметра лічильника.

Отримані результати дозволили зробити висновок про те, що, провівши калібрування витратомірів на існуючих витратовимірювальних установках в першій половині діапазону витрат ($Q \leq Q_{\max}$), можна екстраполювати калібрувальні коефіцієнти на їх верхню половину діапазону. Тим самим досягається, принаймі, подвоєння верхньої границі можливої повірки (калібрування) УЗВ при обмежених можливостях існуючих витратовимірювальних установок.

На основі отриманих результатів і висновків була розроблена методика калібрування (повірки) УЗВ комбінованим методом, суть якої полягає в наступному.

На першому етапі проводиться калібрування (повірка) ЗВТ витрати класичним методом – визначення границь 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), вимірним УЗВ, який калібрується (повіряється). Визначення похибки лічильника і його каліброчного 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} .

Порядок проведення калібрування (повірки) імітаційним методом наступний:

– шляхом перекриття засувки (заслінок, кранів) забезпечується повна нерухомість потоку всередині вимірювального трубопроводу (у разі неможливості забезпечення нерухомості потоку лічильник підключається до імітатора трубопроводу);

– за допомогою програмного забезпечення верхнього рівня ЕОМ, підключеної до лічильника, задається необхідне значення витрати (забезпечується імітація швидкості потоку шляхом введення відповідної затримки в час поширення зондуєчого імпульсу);

– обчислюється відносна похибка лічильника між заданим і вимірним значеннями витрат та його калібрувальний коефіцієнт k_Q (4.1);

– результат вважають позитивним, якщо відносна похибка вимірювання витрати за показаннями ЕОМ не перевищує 0,8 від значень, зазначених у паспортних даних на лічильник та k_Q не виходитиме за границі $\pm 1,0 \%$.

Методика була апробована при повірці лічильників ГУВР–011 різними методами. Апробація була виконана на 25 лічильниках від DN100 до DN200 . Виконувалися наступні операції:

1. Калібрування комбінованим методом лічильника на повірочній 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 повірочній 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 «проливним» методом у всьому діапазоні витрат (звичайне калібрування традиційним методом).

4. Повірка імітаційним методом у всьому діапазоні.

5. Порівняння калібрувальних кривих.

Результати реалізації перерахованих вище методів калібрування приведені на рис. 4.2.

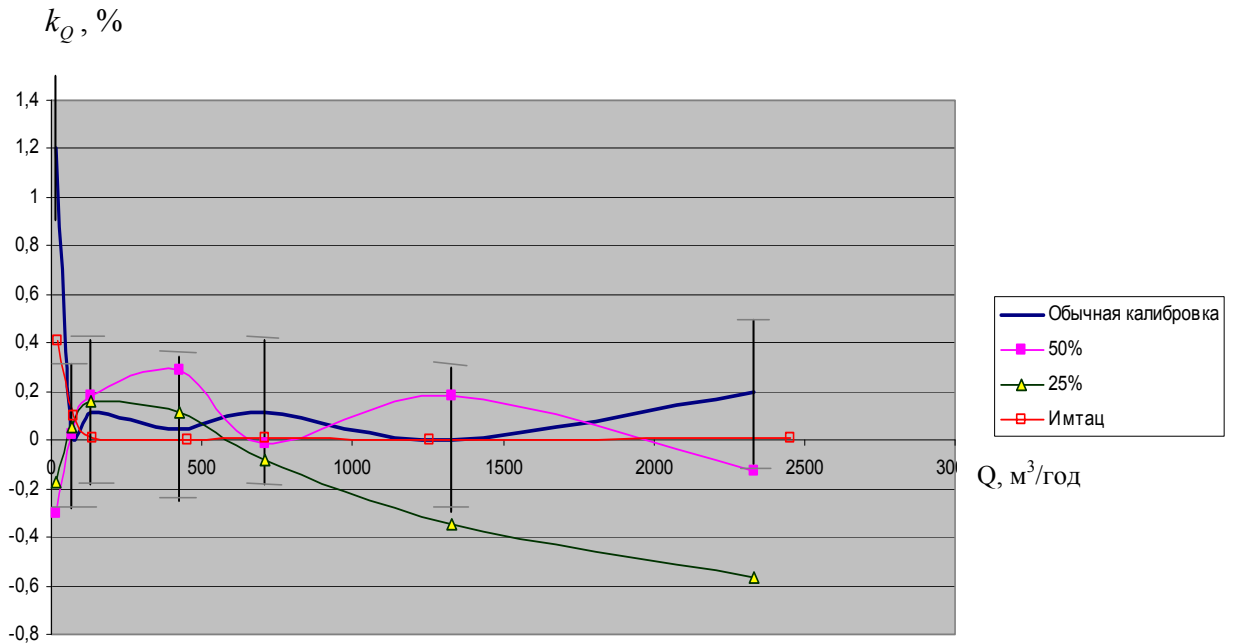


Рисунок 4.2 – Графіки похибок лічильників ГУВР-011 при різних методах калібрування

Отримані результати виконаних експериментальних досліджень дозволили зробити наступні висновки:

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

2. Відхилення результатів калібрування при розробленом методі, тобто отриманих при підстановці коефіцієнтів в діапазоні витрат від $0,5 \cdot Q_{\max}$ до Q_{\max} , від результатів, отриманих традиційним методом, не виходять за межі $\pm 0,3 \%$.

3. Відхилення результатів калібрування 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 $\pm 0,3 \%$, але знаходиться в границях допуску максимальної допустимої похибки лічильника.

4. Перевага розробленого комбінованого методу полягає в наступному: з огляду на те, що імітаційне калібрування (повірка) не враховує всі збурючі фактори, що виникають у вимірювальному трубопроводі при протіканні середовища, він не може бути повноцінною заміною методу прямого звірення. Але, 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 її легітимності у верхньому діапазоні витрат.

Таким чином, зважаючи на повноцінну повірку лічильника в половині діапазону витрат, даний метод, очевидно, є більш достовірним, ніж існуючі імітаційні методи, засновані на вимірюваннях швидкості ультразвуку в лічильнику. Виходячи з цього, даний комбінований метод калібровки (повірки) УЗВ реалізовано в нормативному документі «Метрологія. Лічильники газу ультразвукові ГУВР-011. Методика повірки» МПУ 24487975.01:2011, затвердженому ННЦ «Інститут метрології» (м. Харків) та впровадженому в метрологічну практику України.

4.2 Удосконалення методу оцінювання точності ультразвукових витратомірів в умовах спотвореної структури потоку на основі CFD-моделювання та експериментальних даних

Точність вимірювання витрати та об'єму природного газу, як вже відмічалось, має величезне значення для всіх галузей промисловості в умовах сучасних цін на цей газ. Це зумовило швидкий розвиток засобів вимірювання витрати газових потоків, зокрема, й на базі ультразвукових методів. В Україні протягом останніх років широко впроваджуються УЗВ. На цей час УЗВ на базі часоімпульсного методу, які застосовуються для комерційного обліку, в своєму розвитку досягли стадії, коли вони розглядаються як конкурентна альтернатива більш традиційним засобам (методу змінного перепаду тисків, турбінним та роторним лічильникам) [102, 103].

Широке застосування УЗВ викликане рядом раніше доведених (п.1.7) переваг, проте, як традиційні засоби вимірювання об'ємної витрати, так і УЗВ в тій чи іншій мірі чутливі до спотворень структури потоку, викликані наявністю місцевих опорів (МО), що є їх суттєвим недоліком.

Усунення спотворень структури потоку здійснюють двома шляхами: встановленням прямолінійних ділянок достатньої довжини, або застосуванням спеціальних пристроїв для підготовки потоку (ППП) перед УЗВ. Обидва названі заходи мають недоліки: встановлення прямолінійних ділянок достатньої довжини не завжди можливе, а також має високу вартість реалізації; застосування ППП призводить до збільшення втрат тиску.

Слід відмітити, що встановлення ППП не знімає повністю питання вибору довжини прямолінійних ділянок, оскільки для УЗВ із встановленим ППП також необхідно витримати певну мінімальну їх довжину [102].

Отже актуальними є дослідження, спрямовані на визначення мінімальних довжин прямолінійних ділянок після МО, за умови встановлення яких похибка вимірювання об'ємної витрати за допомогою УЗВ не перевищуватиме нормованих границь.

В Україні до сьогодні не розроблено нормативних документів, які унормовують застосування УЗВ [102]. Для формування якісних нормативних документів також необхідно розробити вимоги до конфігурації та довжин ділянок ВТ. Розробляючи такі вимоги, необхідно провести багато репрезентативних експериментальних досліджень, які мають високу вартість. Так як конфігурації ВТ, а також конструкції УЗВ можуть бути різноманітні, це ще більше ускладнює роботу.

Разом з тим, потужним інструментом для дослідження газодинамічних явищ у трубопроводах є методи обчислювальної гідродинаміки (Computational Fluid Dynamics Methods – CFD–методи). Ці методи у поєднанні із результатами експериментальних досліджень дозволяють будувати досконалі моделі газодинамічних процесів у ділянках трубопроводів складних конфігурацій. На основі таких моделей є можливість досліджувати конфігурації ВТ та

конструкції УЗВ, не охоплені у повній мірі експериментальними дослідженнями.

Дослідженню структури потоку, які виникають після його проходження через різні МО, а також, методи підготовки потоку, яким присвячено значна кількість робіт. Зокрема, можна виділити, безпосередньо пов'язані із застосуванням CFD–методів для задач вимірювання витрати, наступні роботи: експериментальні дослідження та CFD–моделювання принципів формування спотвореної структури потоку після типових МО [104, 105]; одні з перших порівнянь результатів експериментальних досліджень впливу спотворень структури потоку на похибку УЗВ із результатами CFD – моделювання [106]; сучасні дослідження із поєднанням числових методів інтегрування, засобів CFD та нейронних мереж, для підвищення точності відтворення профілю швидкості потоку [107].

CFD–моделювання також широко використовують для досліджень конкретних задач ультразвукової витратометрії: вплив потоку із спотвореною структурою після МО, утворених 90° колінами, на визначення калібрувального коефіцієнта УЗВ [105, 108–111]; вплив спотворень потоку від МО «одиничне 90° коліно» та «два 90° коліна в різних площинах» на процес оптимізації конструкцій УЗВ із застосуванням числових методів інтегрування [112–115]; дослідження похибки вимірювання швидкості потоку УЗВ із відбиванням акустичних променів в програмному пакеті САПР SolidWorks [10]; вплив різного роду МО на похибку вимірювання витрати з допомогою УЗВ [104, 105, 114–117].

4.2.1 Обґрунтування методу CFD–моделювання ультразвукового витратоміра газу

Можливість застосування CFD–моделювання для вирішення задач ультразвукової витратометрії та отримання ними адекватних результатів обґрунтована в роботах [106, 117], в яких сформовані основні засади

застосування CFD–моделювання для вирішення задач ультразвукової витратометрії. Серед них можна виділити такі найважливіші:

1. CFD–моделювання має ряд переваг над експериментальним дослідженням: на відміну від експериментів, воно утворює модель спотвореного потоку в трубопроводі та гідродинамічні ефекти у тривимірному вигляді, дозволяє прослідкувати процес утворення, зміну та затухання спотворень структури потоку в йоголюбій точці.

2. Точність CFD–моделювання при використанні передових моделей турбулентності дає числові дані, які дуже добре узгоджуються з експериментальними. В результаті – для промислового застосування точність CFD–моделювання та їх результати знаходяться в тому ж порядку, що і при реальних експериментах.

3. У найближчому майбутньому CFD–моделювання, зрозуміло, повністю не замінить експерименти, але важливо відзначити, що воно вже не може існувати без доповнення один одного.

З проведеного аналізу можна зробити висновок про те, що CFD–моделювання досить часто і широко застосовується для моделювання структури потоку та впливу її на роботу УЗВ, і в зв'язку з цим, метою даного підрозділу є створення методики дослідження похибки УЗВ в умовах спотвореної структури потоку на основі CFD–моделювання та апробація цієї методики шляхом порівняння із результатами експериментальних досліджень реального УЗВ.

У багатьох практичних задачах просторову структуру потоку моделюють з використанням системи чотирьох диференціальних рівнянь в часткових похідних. До цієї системи входять три рівняння руху Нав'є–Стокса, та рівняння нерозривності, які в загальному випадку описують в нестационарній постановці закони збереження імпульсу (руху) частинок середовища та маси (принцип нерозривності). Також ця система рівнянь може включати рівняння стану компонентів плинного середовища, а також емпіричні залежності в'язкості цих компонентів середовища від температури і тиску. В подальшому будемо

називати цю систему рівнянь системою рівнянь Нав'є–Стокса, як це прийнято традиційно в відомих наукових джерелах [117-118].

За умови застосування системи рівнянь Нав'є–Стокса до моделювання стаціонарних газових потоків у заповнених ВТ задаються такими обмеженнями.

1. Швидкість газового потоку розглядається в тривимірній декартовій системі координат, тобто, $V = (v_x, v_y, v_z)$,

де v_x, v_y, v_z – проекції вектора швидкості на осі декартової системи координат x, y, z відповідно.

2. Газовий потік (повітря, природний газ) є в'язкою стисливою ньютонівською речовиною.

3. Газовий потік є стаціонарним або квазістаціонарним

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial}{\partial t}(\rho v_x) = 0, \quad \frac{\partial}{\partial t}(\rho v_y) = 0, \quad \frac{\partial}{\partial t}(\rho v_z) = 0. \quad (4.1)$$

4. Газовий потік протікає без обміну теплом із навколишнім середовищем – адіабатичний процес.

5. Для моделювання турбулентних потоків систему рівнянь Нав'є–Стокса усереднюють по Рейнольдсу та отримують так-звану RANS (Reynolds-averaged Navier–Stokes equations) форму, в результаті чого утворюються додаткові члени – напруження Рейнольдса $\tau_{ij} = -\rho \overline{v_i v_j}$. Для знаходження цих напружень багато дослідників використовують рівняння переносу кінетичної енергії турбулентності і її дисипації в рамках k-ε моделі турбулентності [118].

Спрощена система усереднених по Рейнольдсу рівнянь Нав'є–Стокса для стислої ньютонівської речовини, яка сформована із врахуванням розглянутих обмежень та описує газодинамічні характеристики турбулентного потоку в стаціонарній та квазістаціонарній постановці, може бути записана наступним чином [117-118]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z) = 0 \\ \rho \left(v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) + SQ_x \\ \rho \left(v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) + SQ_y \\ \rho \left(v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \left(\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) + SQ_z \end{array} \right. , \quad (4.2)$$

де ρ – густина газу, кг/м^3 ; P – тиск газу, МПа; SQ – зовнішні масові сили, що діють на одиницю маси середовища (гравітація, обертання системи координат) [118].

Система рівнянь (4.2) містить п'ять невідомих. Для того щоб замкнути цю систему необхідно доповнити її рівнянням стану для газу - стисливого середовища.

Для газового потоку напруження Рейнольдса або тензор в'язких зсувних напружень в рівнянні (4.2) визначаються залежністю виду [118]

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial j} + \frac{\partial v_j}{\partial i} - \frac{2}{3} \frac{\partial v_i}{\partial i} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}, \quad (4.3)$$

де i та j – декартові координати, $i = \{x, y, z\}$, $j = \{x, y, z\}$; $\mu = \mu_T + \mu_L$, μ_L – коефіцієнт динамічної в'язкості; μ_T – коефіцієнт кінематичної в'язкості; δ_{ij} – дельта-функція Кронекера ($\delta_{ij} = 1$ при $i = j$; $\delta_{ij} = 0$ при $i \neq j$).

Для того щоб розв'язати систему рівнянь (4.2), (4.3) застосовують числові методи та граничні умови. До найбільш розповсюджених відносять метод скінчених різниць (Finite Difference Method - FDM), метод скінчених об'ємів (Finite Volume Method - FVM) та метод скінчених елементів (Finite Elements Method - FEM). З використанням цих методів розроблені спеціальні програмні пакети для CFD моделювання. Такі пакети застосовують, зокрема, і для вирішення задач ультразвукової витратометрії [118].

На сьогодні розроблено багато програмних пакетів, які використовуються для CFD–моделювання і дослідження впливу спотвореної структури потоку на похибку УЗВ, серед яких: ряд програм розроблених в Christian Michelsen Research Institute (CMR) – MUSIC, USMINT, GARUSO, EMU, COMSOL Multiphysics; програмні пакети ANSYS Fluent та CFX, SolidWorks, OpenFOAM та багато інших [118].

В даній роботі для CFD–моделювання вибрано модуль інженерного аналізу Flow Simulations CAIP Solid Works, який використовує для розв’язку системи рівнянь (4.2) – (4.3) числовий метод скінчених об’ємів (FVM) в поєднанні із розбиттям розрахункового простору на елементарні об’єми за принципом фіктивних областей. Для знаходження напружень Рейнольдса в Flow Simulations використовується k – ϵ модель турбулентності [118, 119].

4.2.2 Метод дослідження похибки УЗВ на основі CFD–моделювання

Як вже зазначено вище, застосування CFD моделювання дозволяє вдосконалювати існуючі та досліджувати нові конструкції УЗВ. Однак, внаслідок неточностей відтворення конструкції УЗВ та внаслідок відмінностей модельованої структури потоку від дійсної, відхилення результатів CFD–моделювання від експериментальних даних можуть бути значними. Тому необхідно виконувати коректування моделі УЗВ введенням емпіричних залежностей. Розроблений в даній роботі метод такого уточнення моделі УЗВ та застосування уточненої моделі для дослідження УЗВ в умовах потоків із спотвореною структурою містить таку послідовність операцій:

1. Визначення конструктивних характеристик моделі УЗВ.

Для того, щоб побудувати тривимірну модель УЗВ в CAIP SolidWorks, потрібно знати його геометричні характеристики. Згідно ISO 17089–1:2010, до геометричних характеристик УЗВ відносять: внутрішній діаметр трубопроводу або ВТ, на якому встановлені ПЕА; кількість акустичних каналів (АК) і їх вагові коефіцієнти; довжину і кут нахилу АК відносно осі корпусу або ВТ на

якому встановлені ПЕА; відстань між парою ПЕА по осі трубопроводу, на якому встановлені ПЕА; тип просторового розташування АК (діаметральні, хордові, Δ -схема, V-схема, W-схема).

Існують випадки, коли деякі із перерахованих конструктивних характеристик УЗВ невідомі. Тоді виникає потреба їх обчислення на основі відомих характеристик. Зокрема, необхідно обчислити координати розміщення АК УЗВ та невідомі значення їх вагових коефіцієнтів, що може бути зроблено на основі класичних [114, 115, 120] та удосконаленого в роботі методу [121].

2. Визначення параметрів вимірюваного середовища.

Для того, щоб дослідити похибку УЗВ на основі CFD-моделювання, потрібно знати тип вимірюваного середовища та його термодинамічні характеристики. Значення термодинамічних характеристик середовища можна отримати за даними реального фізичного експерименту або сформувані масив їх значень із досліджуваного діапазону.

Основним результатом рішення системи рівнянь (4.2), (4.3) на базі якої працює Flow Simulations, є масиви швидкості та тиску. Це означає, що для числового рішення цієї системи потрібно задати, як граничні умови, тиск і швидкість потоку на граничних поверхнях моделі. Швидкість потоку допускається задавати за допомогою значення об'ємної або масової витрати.

3. Знаходження коректувального коефіцієнта моделі УЗВ.

Як відомо, ультразвуковий часоімпульсний метод вимірювання витрати заснований на вимірюванні швидкості потоку V вздовж акустичного шляху із подальшим отриманням об'ємної витрати Q за наступною формулою

$$Q = S \cdot V, \quad (4.4)$$

де S – площа поперечного перерізу, m^2 .

В залежності від кількості АК та типу їх просторового розташування, застосовують певний спосіб визначення швидкості потоку V : її можуть

приймати рівною швидкості, вимірюваній одним АК для діаметральних УЗВ, або визначати як зважену суму декількох значень швидкості, виміряних декількома АК.

Незважаючи на різноманітні способи отримання вимірюваного значення в залежності від кількості АК та схеми їх розміщення, вона відрізняється від дійсної середньої швидкості потоку V_S в перерізі, тим самим викликаючи гідродинамічну похибку. Для того, щоб врахувати цю відмінність, у рівняння витрати вводять коректувальний коефіцієнт

$$k = \frac{V_S}{V}. \quad (4.5)$$

Оскільки на практиці часто порівнюють виміряне Q та дійсне значення витрати Q_S , то коректувальний коефіцієнт в такому випадку обчислюють за формулою

$$k = \frac{Q_S}{Q}. \quad (4.6)$$

Під час CFD-моделювання УЗВ також необхідно усунути вказану гідродинамічну похибку, тобто для моделі теж необхідно визначити коректувальний коефіцієнт.

Введення коректувального коефіцієнта дозволяє усунути ще одну конструктивну складову похибки, що виникає під час побудови тривимірної моделі УЗВ за його конструкцією. Незважаючи на те, що відтворення геометричних характеристик УЗВ засобами проектування САПР Solid Works можна реалізувати досить точно, існують випадки, коли під час побудови тривимірної моделі УЗВ ці характеристики можуть бути визначені неточно. До таких характеристик можна віднести: розмір чутливих елементів ПЕА; розміри «кишень», в яких розміщено чутливі елементи ПЕА; розмір захисних покриттів чутливих елементів ПЕА.

Крім того, очевидно, що CFD–моделювання відтворює ефекти турбулентності потоку з деякою похибкою [116].

З метою усунення всіх розглянутих вище складових похибок, в запропонованом методі передбачено знаходження коректувального коефіцієнта моделі УЗВ, як функції від числа Рейнольдса.

3.1. Визначення характеристик вимірювального трубопроводу.

Знаходження коректувального коефіцієнта так само, як і калібрування реальних УЗВ, проводиться на потоках із повністю встановленою (ідеалізованою) структурою. Для цієї задачі довжина тривимірної моделі ВТ в САПР Solid Works повинна бути достатньою, щоб можна було виділити ділянку із стабільною швидкістю потоку по її довжині. Також, необхідно визначити місце встановлення перетворювачів тиску та температури для реалізації процесу приведення витрати з робочих умов до стандартних, як цього вимагають чинні методи вимірювання витрати.

3.2. Створення тривимірної моделі ВТ та УЗВ.

Використовуючи дані з пунктів 1, 2 та 3.1, в САПР Solid Works будують тривимірну модель ВТ та УЗВ. Роботу АК імітують, формуючи всередині ВТ лінії поширення акустичного сигналу між ПЕА, що не впливає суттєво на похибку відтворення конструкції УЗВ [116]. Flow Simulations дозволяє отримувати значення параметрів середовища (тиску, густини, швидкості) вздовж сформованих ліній. Будують тривимірну модель зануреного чутливого елемента перетворювача температури та отвору відбору тиску. Після того, як у тривимірній моделі ВТ відтворено всі ЗВТ, на його вході та виході будують твердотілі «заглушки», на яких в подальшому будуть накладені граничні умови.

Завершальним етапом в побудові тривимірної моделі ВТ та УЗВ є перевірка її на герметичність. Якщо побудова виконана правильно і модель є герметичною, то можна розпочинати етап CFD–моделювання.

3.3. Встановлення параметрів CFD–моделювання.

Після побудови тривимірної моделі ВТ та УЗВ і додатковими ЗВТ, потрібно задати параметри CFD-моделювання за допомогою модуля Flow Simulations.

Flow Simulations автоматично інтерпретує пустий простір тривимірної моделі як простір, заповнений середовищем. В залежності від взаємного розміщення моделі і середовища (всередині або зовні) в Flow Simulations, всі задачі поділяють на два типи: внутрішні (internal) та зовнішні (external). Розроблений метод розглядає лише внутрішні задачі.

Оскільки вирішується завдання моделювання УЗВ газів, то у якості плинного середовища (fluid type) необхідно задати «газ», а режим руху потоку – ламінарний і турбулентний. Flow Simulations дозволяє задавати умови, які будуть існувати на стінках тривимірної моделі. До таких параметрів відносять шорсткість і теплові умови на внутрішній і зовнішній частині стінок. Вибір цих характеристик залежить від умов проведення експерименту при дослідженнях реальних УЗВ та потреб при моделюванні нових.

Також необхідно задати параметри, які впливають на розрахункову сітку (розмір елементарного об'єму) і критерії завершення розрахунку, а отже, і на точність вирішення задачі. Очевидно, що чим дрібніша розрахункова сітка, тим ближчим є дискретне рішення моделі до неперервної функції зміни параметрів і тим точніше процес CFD-моделювання відтворить реальний процес, однак при цьому дрібніша розрахункова сітка, очевидно, вимагає більших обчислювальних ресурсів комп'ютера. Тому під час встановлення параметрів, що впливають на розрахункову сітку, необхідно досягти компромісу між бажаною точністю і наявними ресурсами комп'ютера.

Кожен із числових методів, які реалізуються в пакетах для CFD-моделювання, вимагають задати початкові та граничні умови. Важливим фактором для налаштування початкових та граничних умов є те, який тип задачі реалізується (стаціонарна або нестаціонарна задача, внутрішня або зовнішня). Як було сказано вище, в запропонованому та розробленому методі розглядаються внутрішні задачі, а тому, граничні умови потрібно задавати на

внутрішніх частинах твердотілої моделі, тобто на отворах (на тілах «заглушках» в напрямку в середину моделі). Так як задача розглядається в стаціонарній постановці, всі настройки початкових умов можна залишати без зміни (за замовчуванням).

На кожній із граничних поверхонь моделі граничні умови можуть бути задані значеннями таких параметрів: швидкість потоку (для газів також число Маха); масова чи об'ємна витрата; статичний/повний тиск.

Встановлення граничних умов є завершальним із обов'язковим кроком, після чого виконують процес CFD–моделювання у Flow Simulations.

3.4. Побудова залежності коректувального коефіцієнта моделі УЗВ від числа Рейнольдса.

За результатами CFD–моделювання в Flow Simulations отримують масиви значень параметрів потоку (швидкість потоку по кожному із АК, тиск, температура). Пропонується визначати коректувальний коефіцієнт моделі на основі результатів моделювання таким чином.

За аналогією до (4.6) для окремого фіксованого значення витрати коректувальний коефіцієнт моделі слід обчислити за наступною формулою:

$$k = \frac{Q_{c.3P}}{Q_{c.УЗВ}}, \quad (4.7)$$

де $Q_{c.3P}$ – еталонна об'ємна витрата за стандартних умов; $Q_{c.УЗВ}$ – об'ємна витрата за стандартних умов, отримана за результатами CFD–моделювання.

За умови, коли відомим є значення витрати за робочих умов, значення еталонної витрати за стандартних умов обчислюють за наступною формулою:

$$Q_{c.3P} = Q_{p.3P} \cdot \left(\frac{p \cdot T_c}{p_c \cdot T \cdot K \cdot (T, p)} \right), \quad (4.8)$$

де p , T – еталонні значення тиску та температури; K – коефіцієнт стисливості; $p_{\tilde{n}} = 0,101325$ МПа та $T_{\tilde{n}} = 293,15$ К (20 °С) – стандартні значення тиску та температури.

Слід зазначити, що еталонне значення витрати за робочих умов $Q_{p,3P}$ відповідає дійсному значенню витрати Q_S у ВТ. Це дійсне значення витрати під час моделювання може бути визначене таким чином:

- вибирається із діапазону вимірювання для конкретної моделі та типорозміру УЗВ за умови моделювання відомої конструкції УЗВ;
- приймається рівним показам еталонного витратоміра під час моделювання експерименту.

Також, треба зауважити, що значення еталонних витрати, тиску та температури використовуються для налаштування параметрів CFD–моделювання (граничні умови).

Розрахунок об'ємної витрати моделі УЗВ за результатами CFD–моделювання виконується за формулою [117, 118]:

$$Q_{c,UZB} = \left(3600 \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \sum_{i=1}^N \omega_i V_i \right) \cdot \left(\frac{p_{UZB} \cdot T_c}{p_c \cdot T_{UZB} \cdot K \cdot (T_{UZB}, p_{UZB})} \right), \quad (4.9)$$

де p_{UZB} , T_{UZB} – значення тиску та температури у секції модельованого УЗВ, мПа та К, відповідно;

ω_i , V_i – ваговий коефіцієнт та швидкість потоку знайдені вздовж i -ого АК УЗВ, відповідно;

D – діаметр ВТ, м.

Швидкість потоку за i -им АК визначається як середнє значення швидкості потоку вздовж цього АК. Визначивши за формулою (4.7) значення коректувального коефіцієнта УЗВ для множини зразкових значень витрати, отримують залежність цього коефіцієнта від витрати у табличній формі.

Для того, щоб застосувати цю залежність для довільних значень витрати під час моделювання УЗВ та для аналізу можливості застосування цієї залежності для моделей УЗВ в умовах гідродинамічно подібних потоків доцільно отримати аналітичний вираз (формулу) залежності коректувального коефіцієнта від числа Рейнольдса - $k = f(\text{Re})$.

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

Після знаходження корегувального коефіцієнта, рівняння витрати УЗВ отримає остаточний вигляд [117, 118]:

$$Q_{c.УЗВ} = k \cdot \left(3600 \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \sum_{i=1}^N \omega_i \cdot V_i \right) \cdot \left(\frac{\rho_{УЗВ} \cdot T_c}{\rho_c \cdot T_{УЗВ} \cdot K \cdot (T_{УЗВ} \rho_{УЗВ})} \right). \quad (4.10)$$

Отримане рівняння (4.10) може бути застосоване для CFD-моделювання процесу вимірювання витрати в умовах потоків із спотвореною внаслідок дії різноманітних МО структурою.

Для підготовки тривимірної моделі УЗВ та CFD-моделювання потоку газу у ВТ із встановленим МО виконують дії за п.3.1 – п.3.3. Під час побудови тривимірної моделі ВТ реалізують відповідний тип МО, задають геометричні характеристики та розміщення МО, довжини прямолінійних ділянок.

При відтворенні умов реального фізичного експерименту встановлюють відстань між МО та УЗВ, що відповідає умовам експерименту.

Під час дослідження впливу розміщення МО на похибку моделі УЗВ почергово встановлюють значення довжини прямолінійної ділянки ВТ між МО та УЗВ із досліджуваного діапазону.

Отримані за результатами моделювання в Flow Simulations масиви значень параметрів потоку застосовують для обчислення вимірюваного за допомогою моделі УЗВ значення витрати згідно (4.10).

Відносне відхилення значення витрати обчисленого за формулою (4.10) (тобто за результатами CFD–моделювання) визначають відносно еталонного значення витрати (4.8) за формулою

$$\delta = \frac{Q_{c.УЗВ} - Q_{c.ЗР}}{Q_{c.ЗР}} \cdot 100, \% \quad (4.11)$$

У рамках цієї роботи відхилення визначені відносно експериментальних значень витрати, отриманих під час виконання вимірювань на перевірювальній установці для УЗВ встановленого після типових МО.

4.2.3 Застосування методики CFD–моделювання для дослідження похибки УЗВ ГУВР–011

Розроблена методика була застосована для дослідження похибки УЗВ ГУВР–011. Під час моделювання відтворені конфігурації ВТ із встановленими МО, які досліджувались експериментально у лабораторії ПРАТ «Енергооблік». Це дає можливість порівняти результати CFD–моделювання цього УЗВ із даними експериментальних досліджень впливу структури потоку після МО на УЗВ ГУВР–011, тобто зробити висновок про адекватність розробленого методу.

Слід підкреслити, що і експериментальні дослідження і, відповідно, моделювання УЗВ ГУВР–011А2.2/ВС виконані без встановлення струменевипрямляча чи пристрою підготовки потоку.

Результати застосування методу представлені нижче.

1. Визначення конструктивних характеристик УЗВ.

Згідно паспортних даних витратомір ГУВР–011А2.2/ВС являє собою УЗВ із двома хордовими акустичними каналами. Вхідні дані по УЗВ ГУВР–011А2.2/ВС: довжина АК – L_b ; кут нахилу АК відносно осі ВТ – α ; вагові

коефіцієнти АК – ω_i . Для розрахунку додаткових параметрів які необхідні для відтворення тривимірної моделі УЗВ в САПР Solid Works застосовано наступні формули, отримані на основі розрахункової схеми, зображеної на рис. 4.3:

– $d_h = L_b \cdot \sin \alpha$ – ширина площини в якій лежать АК,

– $H_h = \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_h}{2}\right)^2} = \sqrt{R^2 - \left(\frac{d_h}{2}\right)^2}$ – відстань між площиною АК і віссю

ВТ.

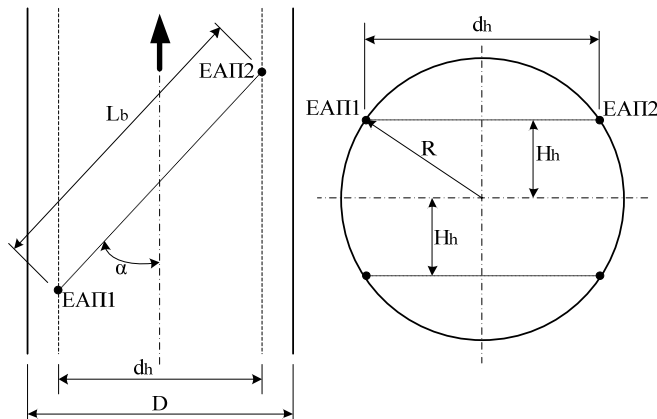


Рисунок 4.3 – Розрахункова схема досліджуваного УЗВ

2. Визначення параметрів вимірюваного середовища.

Вимірювальним середовищем є повітря. Значення параметрів середовища, отримані за результатами метрологічної перевірки УЗВ встановленого на прямій ділянці ВТ, наведені у табл. 4.2.

Таблиця 4.2 Параметри потоку під час перевірки УЗВ ГУВР–011

№	$T_{ET}, ^\circ C$	$P_{ET}, \text{кПа}$	$q_{p,ET}, \text{м}^3/\text{ГОД.}$	$T_{ГУВР}, ^\circ C$	$P_{ГУВР}, \text{кПа}$
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. Визначення коефіцієнтів корекції моделі УЗВ від числа Рейнольдса

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

ВТ, на якому встановлювався УЗВ ГУВР-011 під час експерименту, має наступні характеристики: діаметр ВТ рівний $D = 100$ мм; довжина прямолінійної ділянки ВТ під час проведення повірки згідно експериментальних даних обумовлена умовою $l > 5D = 500$ мм.

Для формування симетричного профілю розвиненого турбулентного потоку перед УЗВ під час CFD-моделювання за різних значень витрати, його тривимірною моделлю встановлено на відстані 10 м від початку ВТ. Вигляд побудованої в САПР Solid Works тривимірної моделі секції ВТ, на якій встановлений УЗВ, показано на рис. 4.4.

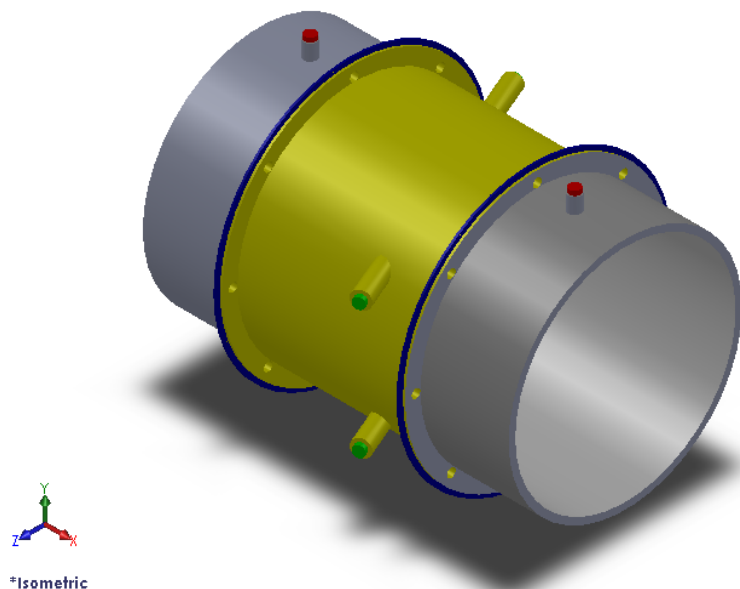


Рисунок 4.4 – Тривимірною моделлю УЗВ ГУВР-011

Так як експериментальні дослідження виконані на повітрі, то для моделювання також встановлено тип середовища – повітря. Моделюється внутрішня (internal) задача, так як середовище буде протікати в середині створеної тривимірної моделі ВТ та УЗВ. Під час CFD–моделювання прийнято, що поверхня стінки ВТ адіабатична, тобто відсутній теплообмін плинного середовища з поверхнею ВТ. На всіх стінках задається прилипання потоку, тобто розглядається тертя потоку на стінках ВТ. Оскільки під час експерименту застосовано ВТ із нержавіючої сталі, абсолютна еквівалентна шорсткість якого не перевищує 0,03 мм, то таке ж значення шорсткості ВТ встановлене під час моделювання. Для моделювання ефектів турбулентності потоку застосовано k–ε модель турбулентності.

Як граничні умови на вході в тривимірну модель ВТ за напрямком потоку задано вхідну масову витрату, визначену за значеннями параметрів з еталонного лічильника. Розрахунок масової витрати через відому робочу витрату, тиск і температуру виконано за формулою [117, 118]:

$$Q_m = Q_{p.ET} \cdot \left(\frac{\rho_c \cdot p_{ET} \cdot T_c}{p_c \cdot T_{ET} \cdot K} \right), \quad (4.12)$$

де $K = \frac{z}{z_c}$ - коефіцієнт стисливості повітря;

z – фактор стисливості за робочих умов;

z_c – фактор стисливості за стандартних умов;

$p_c = 1,20445$ (для повітря).

Фактор стисливості за робочих умов розраховується згідно методики ГСССД МР 112–03 [122].

За граничні умови на виході моделі вибираємо статичний тиск $p_{ГУВР}$ та температуру $T_{ГУВР}$ (табл. 4.2).

В результаті CFD–моделювання та застосування для отриманих пар значень витрати $Q_{c.ЗР}$, $Q_{c.УЗВ}$ формули (4.7), отримано залежність

коректувального коефіцієнта від числа Рейнольдса. Графік залежності зображено на рис. 4.5.

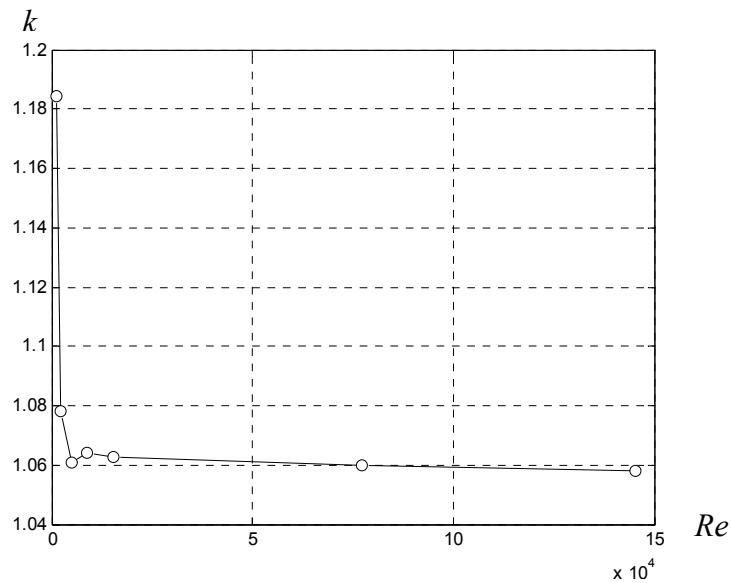


Рисунок 4.5 – Залежність коректувального коефіцієнта моделі УЗВ від числа Рейнольдса

Дана залежність апроксимована за допомогою виразу, що має наступний вигляд

$$k = \begin{cases} 38,79 \operatorname{Re}^{-0,7837} + 1,01; & \operatorname{Re} = 1000 \div 5000 \\ -1,148 \cdot 10^{-10} \operatorname{Re}^2 + 2,675 \cdot 10^{-6} \operatorname{Re} + 1,049; & \operatorname{Re} = 5000 \div 1,5 \cdot 10^4 \\ -3,567 \cdot 10^{-8} \operatorname{Re} + 1,063; & \operatorname{Re} = 1,5 \cdot 10^4 \div 15 \cdot 10^4 \end{cases} \quad (4.13)$$

Відносне відхилення значень коректувального коефіцієнта, отриманих за формулою (4.13) від значень, отриманих за формулою (4.7), не перевищує 0,01 %, що дозволяє застосовувати формулу (4.13) під час дослідження роботи цього УЗВ у діапазоні чисел Рейнольдса від $1 \cdot 10^3$ до $1,5 \cdot 10^5$, який є типовим для реальних потоків природного газу в газопроводах.

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

У практиці експлуатації УЗВ відома велика кількість МО різних типів. Для виконання експериментальних досліджень УЗВ та моделювання вибрано

МО двох типів – «90° коліно» і «два коліна в різних площинах ($l < 5D$)». Вибір цих МО зумовлений певними міркуваннями.

Згідно [104] 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. Зокрема у [112] наведені дані про те, що похибка вимірювання витрати викликана цими МО може сягати до 8 % в залежності від конфігурації УЗВ та його відстані до цих МО. Схематичний вигляд структури потоку, яка формується після його проходження через ці МО, зображено на рис. 4.6 [104].

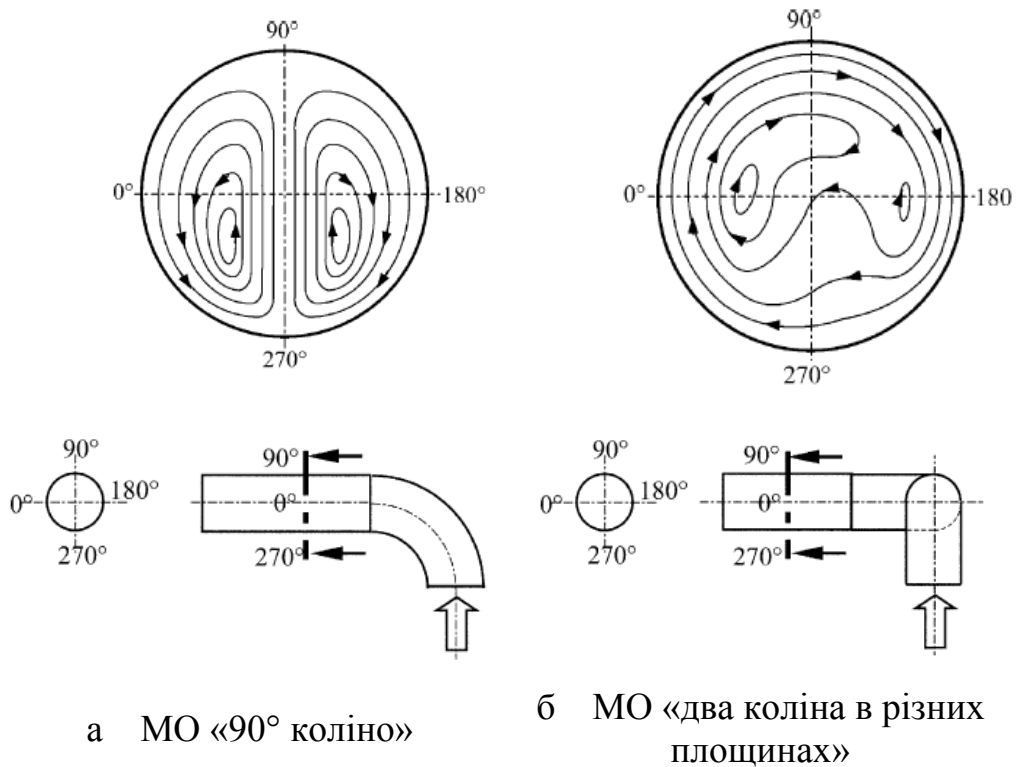


Рисунок 4.6 Структура потоку вниз за течією після МО за умови ідеальної структури потоку на їх вході

Теоретичний вигляд структури потоку після МО «90° коліно» вперше описав Dean в 1928 р. Згідно теоретичних та експериментальних досліджень [105, 22] потік після проходження через МО «90° коліно» спотворюється із

утворенням двох вихорів (рис. 4.6, а), які зникають і переходять в повністю розвинений потік після $50D$ прямолінійної ділянки [105]. Структуру потоку після МО «два коліна в різних площинах» теоретично розраховано в [105] та експериментально підтверджено в [123]. Перехід головного вихору (рис. 4.6, б) в повністю розвинений потік проходить досить повільно, і починається після $100D$ прямолінійної ділянки.

Як видно, спотворення структури потоку після розглянутих вище МО зберігається на достатньо довгій відстані від них, що свідчить про необхідність особливо детального дослідження їх впливу на роботу УЗВ. Тому у роботі вибрані для дослідження МО саме таких типів.

Тривимірна модель ВТ із МО « 90° коліно» та «два коліна в різних площинах ($l < 5D$)», побудована за геометричними характеристиками, що були реалізовані під час експерименту, представлена на рис. 4.7. У всіх варіантах УЗВ ГУВР–011 встановлений в нормальному положенні, коли ПЕА знаходяться в горизонтальній площині.

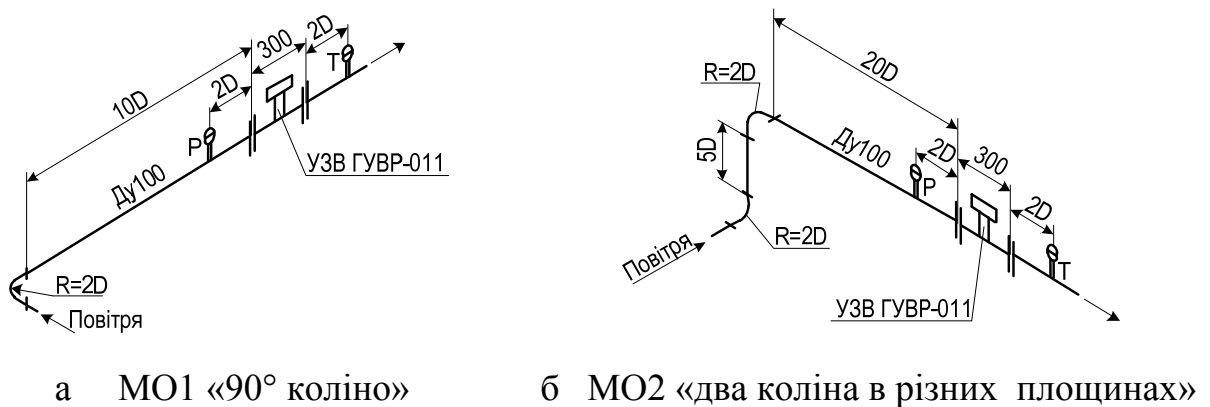
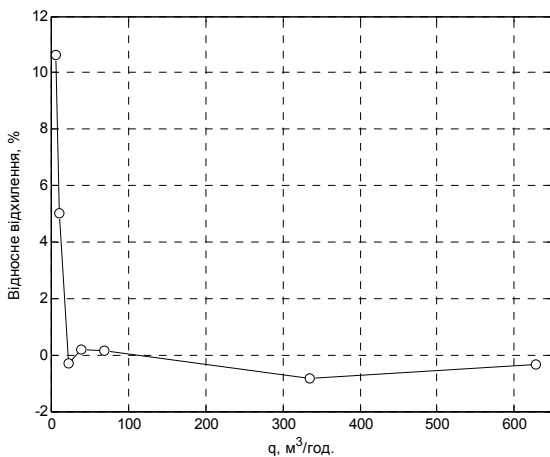


Рисунок 4.7 Аксонометрична схема ВТ із встановленим МО та УЗВ

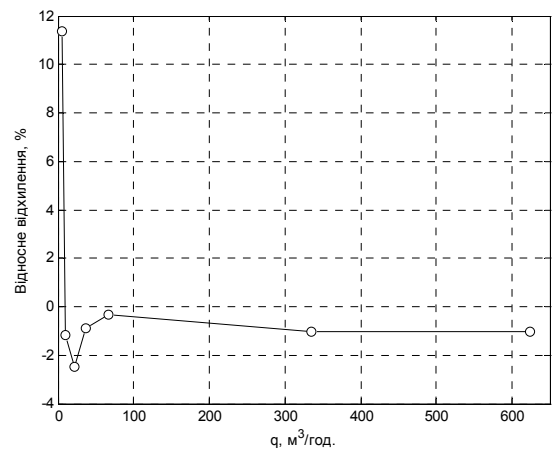
За результатами CFD–моделювання обчислено значення витрати повітря за формулою (4.10) та їх відносне відхилення від значень витрати, отриманих експериментально за показами УЗВ ГУВР–011.

Залежності цього відносного відхилення, отримані за результатами CFD–моделювання ВТ із МО «90° коліно» і ВТ із МО «два коліна в різних площинах ($l < 5D$)», представлені на рис. 4.8.

Як видно із рисунку 4.8, результати CFD–моделювання добре узгоджуються із результатами експериментальних досліджень у діапазоні витрати від $0,05 \cdot Q_{\max}$ до Q_{\max} : для випадку моделювання УЗВ, встановленого після МО «90° коліно», максимальне відносне відхилення між модельованими значеннями витрати та експериментальними значеннями складає 0,86 % (рис. 4.8,а), а для встановлення УЗВ після МО «два коліна в різних площинах» значення відносного відхилення у вказаному діапазоні зміни витрати не перевищує 1,04 % (рис. 4.8,б). Це свідчить про адекватність розробленої методики і доказує можливість її застосування для дослідження впливу спотворень потоку після різного роду МО на похибку вимірювання витрати УЗВ.



а) МО «90° коліно», $l = 10D$



б) МО «два коліна в різних площинах»,
 $l = 20D$

Рисунок 4.8 – Залежність відносного відхилення між значеннями витрати, отриманими за результатами CFD–моделювання та експериментальними значеннями витрати

Слід нагадати, що наведені вище результати експериментальних досліджень, отримані для УЗВ ГУВР–011А2.2/ВС без встановлення струминовипрямляча чи пристрою підготовки потоку.

За результатами виконаних досліджень була вдосконалена конструкція цього УЗВ та введений пристрій підготовки потоку, що дозволило зменшити похибку УЗВ ГУВР до значення менше 1 % у основному діапазоні вимірювання витрати навіть за умови його встановлення після таких складних МО, які розглянуті у роботі.

Таким чином, за результатами виконаних досліджень 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 подальшого розвитку одного із таких методів, а саме методу кінцевих об'ємів, що реалізований в програмному пакеті для CFD-моделювання Solid Works, розроблено методику дослідження похибки УЗВ викликані спотворенням структури потоку місцевими опорами. На основі порівняння результатів дослідження реального УЗВ, отриманих за розробленою методикою, із результатами експериментальних досліджень цього УЗВ виконано апробацію і підтвердження адекватності розробленої методики, та підтверджено можливість її застосування для дослідження впливу спотворень потоку після різного роду МО на похибку вимірювання витрати за допомогою УЗВ. Встановлено, що результати CFD–моделювання впливу спотворень потоку після МО «90° коліно» та «два коліна в різних площинах» на похибку УЗВ добре узгоджуються із результатами експериментальних досліджень у діапазоні витрати реального УЗВ від $0,05 \cdot Q_{\max}$ до Q_{\max} : їх відмінність не перевищувала 1 %.

Розроблена методика реалізована при дослідженнях впливу різноманітних МО та конфігурацій ВТ на похибку діючих моделей УЗВ, а також може бути застосована для удосконалення конструкції існуючих і розробки нових ЗВТ витрати газу та рідини.

4.3 Висновки по розділу 4

В результаті виконаних досліджень:

1. Розроблено та опробовано методологію калібрування (повірки) ультразвукових витратомірів газу ГУВР–011 в діапазоні витрат, що перевищує верхню границю існуючих витратовимірвальні установок.

Розроблено комбінований метод та відповідна методика, що дозволяють здійснити калібрування (повірку) УЗВ газу в діапазоні витрат, який, як мінімум вдвічі, перевищує верхні границі існуючих витратомірних установок. Даний метод забезпечує калібрування (повірку) лічильників різного діаметру, і в першу чергу, лічильників з діаметром більше 300 мм.

Перевага розроблені методології полягає в тому, що в умовах відсутності можливості проведення повірки «класичним» методом у всьому діапазоні витрат, вона забезпечує повноцінне калібрування (повірку) лічильників в половині діапазону витрат з подальшою перевіркою їх працездатності у верхньому діапазоні витрат і в цьому зв'язку вона є більш достовірною, ніж існуючі імітаційні методи, засновані на вимірюванні швидкості ультразвуку в лічильнику, які не враховують всі збурючі фактори, що виникають у вимірювальному трубопроводі при протіканні середовища.

2. Розроблено метод дослідження похибки УЗВ в умовах спотвореної структури потоку на основі CFD–моделювання та експериментальних даних реального УЗВ. Доказано можливість застосування розробленого методу для дослідження впливу спотворень потоку після різного роду МО на похибку вимірювання витрати за допомогою УЗВ.

Показано що, дана методика може бути застосована для подальшого удосконалення конструкції існуючих і розробки нових засобів вимірювання витрати, а також, забезпечити покращення метрологічного забезпечення цих засобів.

ВИСНОВКИ

В результаті виконаних в дисертаційній роботі теоретичних та експериментальних досліджень вирішена актуальна для національної економіки науков–прикладна задача підвищення якості обліку енергетичних ресурсів і води шляхом підвищення точності ультразвукового вимірювання витрат текучих (плинних) середовищ на основі удосконалення методів і засобів вимірювання 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, атестувати та занести їх до Державного реєстру ЗВТ України, РФ, країн СНГ на рівні, сертифікованому міжнародним органом з сертифікації «Bureau Veritas» на відповідність вимогам стандарту ISO 9001;

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

2. Вперше для проведення експериментальних досліджень 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 точністю: границі відносної похибки визначення об'єму та об'ємної витрати рідини першої установки дорівнюють $\pm 0,08$ %, об'єму та об'ємної витрати газу другої - $\pm 0,3$ %.

3. Вперше розроблено та апробовано методологію калібрування ультразвукових витратомірів газу, зокрема ГУВР–011, який дає змогу шляхом комплексного використання експериментальних і імітаційних результатів дослідження збільшити діапазон вимірювання, тобто, практично вдвічі підняти верхню межу 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,

– їх нормований метрологічний інтервал можна збільшити вдвічі, що є актуальним для національної економіки.

5. Удосконалено одноканальний і багатоканальний часово-імпульсний ультразвуковий метод вимірювання витрати текучого середовища на базі розвитку їх математичних моделей, що дозволило зменшити похибку вимірювання різниці часу розповсюдження сигналів вздовж і проти потоку і забезпечити підвищення точності вимірювання довжини шляху поширення акустичних сигналів та їх багатоканальної обробки, і, як слід, знизити похибку вимірювання витрати середовища.

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

7. Отримав подальший розвиток метод оцінювання точності ультразвукових витратомірів в умовах спотвореної структури потоку та наявності різного роду місцевих опорів шляхом використання CFD- моделювання та експериментальних даних реального УЗВ, що дає змогу виконувати оперативні дослідження впливу спотворень потоку після різного роду місцевих опорів на похибку вимірювання витрати середовища за допомогою створених та існуючих УЗВ.

Достовірність отриманих в дисертації результатів підтверджується результатами метрологічних досліджень випробувань, практичним застосуванням витратомірів в умовах експлуатації для технологічного та комерційного обліку.

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» приладів, здатних до самокалібрування, діагностування та запобігання впливу на процес вимірювання будь-яких небажаних факторів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про енергозбереження. Закон України від 01.07.1994 № 74/94–ВР. Редакція станом на 01.01.2013 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: zakon.rada.gov.ua>laws/annot/74/94–вр.
2. Про Комплексну державну програму енергозбереження України. Постанова Кабінету Міністрів України від 05.02.1997 р. № 148 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.darom.info/kopleksna_prog_1997–2010.doc.
3. Про забезпечення єдності вимірювань. Закон України від 01.07.1994 № 74/94–ВР. Редакція станом на 01.01.2013 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: zakon.rada.gov.ua>laws/annot/74/94–вр.
4. РД 50–213–80. Правила измерения расхода газов и жидкостей сужающими устройствами. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 320 с.
5. ГОСТ 8.361–79. Расход жидкости и газа. Методика выполнения измерений по скорости в одной точке сечения трубы. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 320 с.
6. ГОСТ 8.439–81. Расход воды в напорных трубопроводах. Методика выполнения измерений методом площадь–скорость. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 320 с.
7. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ: справочник. Кн. 1/ под общ. ред. Е.А. Шорникова. – СПб.: Политехника, 2002. – 409 с.
8. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ: справочник: Кн. 2/ под общ. ред. Е.А. Шорникова. – СПб.: Политехника, 2004. – 412 с.
9. Власюк Я.М. Вдосконалення засобів і нормативної документації для метрологічного забезпечення вузлів обліку природного газу: дис. ... канд. техн. наук / Я.М. Власюк. – Івано-Франківськ, 2012. – 142 с. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: library.nung.edu.ua
10. Власюк Я.М. Концепція єдиної системи обліку природного газу України (оптимізація впровадження промислових лічильників різних методів

вимірювання)/ Я.М. Власюк, М.І. Чуприн, Л.Я. Власюк// Методи та прилади контролю якості. – Івано-Франківськ, 2007. – № 18. – С. 73–75.

11. ДСТУ 3339–96. Теплосчетчики. Общие технические требования. – К.: Госстандарт Украины, 1996. – 9 с.

12. Клаасен К.Б. Основы измерений: Электронные методы и приборы в измерительной технике; пер. с англ. / К.Б. Клаасен. – М.: Постмаркет, 2000. – 352 с.

13. Деклараційний патент на винахід 29777 А, Україна, МПК G01 F1/66. Ультразвуковий спосіб вимірювання витрат рідини в трубопроводі/ В.І. Близнюк, В.В. Костильов, В.Л. Сорокопут, А.А. Стеценко. – № 97062920; заявл. 19.06.1997; опубл. 29.12.1999, Бюл. № 8.

14. Пат. 2277700 Россия, МПК G01 F1/66. Врезная секция ультразвукового расходомера/ А.И. Стеценко, А.А. Стеценко, В.Л. Сорокопут, В.В. Костылев, А.А. Чумаченко (Украина). – № 2004102383/28; заявл. 29.01.2004; опубл. 10.06.2006, Бюл. № 16.

15. Патент на винахід 22920 А, Україна, МПК G01 F1/66. Ультразвуковий доплерівський витратомір/ В.І. Близнюк, В.В. Костильов, В.Л. Сорокопут, А.І. Стеценко, А.А. Стеценко. – № 96124832; заявл. 24.12.1996; опубл. 30.06.1998, Бюл. № 3.

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

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

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

19. 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.

20. 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.

21. 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.

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

23 Дослідження похибки ультразвукових витратомірів за умов спотвореної структури потоку на основі CFD-моделювання/ Є. Пістун, Ф. Матіко, В. Роман [та ін.] // Метрологія та прилади. – 2014. – № 4. – С.13–23.

24. Хансуваров К.И. Техника измерения давления, расхода, количества и уровня жидкости, газа и пара/ К.И. Хансуваров, В.Г. Цейтлин. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 287 с.

25. Чистяков В.С. Краткий справочник по теплотехническим измерениям/ В.С. Чистяков. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.

26. ГОСТ 15528–86. Средства измерения расхода, объема или массы протекающих жидкости и газа. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 320 с.

27. ГОСТ 2939–63. Газы. Условия для определения объема. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 320 с.

28. ГОСТ 30319.0–96. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Общие положения. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 320 с.

29. ГОСТ 30319.1–96. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение физических свойств природного газа, его компонентов и продуктов его переработки. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 320 с.

30. ГОСТ 30319.2–96. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение коэффициента сжимаемости. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 320 с.

31. ГОСТ 30319.3–96. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение физических свойств по уравнению состояния. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 320 с.
32. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа/ Л.Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1970. – 904 с.
33. Монахов В.И. Измерение расхода и количества жидкости, газа и пара/ В.И. Монахов. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 128 с.
34. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества: справочник / П.П. Кремлевский. – Л.: Машиностроение, 1989. – 701 с.
35. Ландау Л.Д. Электродинамика сплошных сред / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Гос. изд-во техн.-теор. лит-ры, 1957. – 532 с.
36. Брановер Г.Г. Магнитная гидродинамика несжимаемых сред/ Г.Г. Брановер, А.Б. Цинобер. – М.: Наука, 1970. – 380 с.
37. Метрологическое обеспечение измерений расхода воды в Украине / В.Б. Большаков, В.Ф. Белоусов, Н.И. Косач [и др.] // Український метрологічний журнал. – 2003. – № 3. – С. 44–48.
38. Большаков В.Б. Электромагнитный преобразователь вектора скорости жидкостных потоков / В.Б. Большаков, Н.И. Косач, С.Ю. Тюпа //Метрология и метрологическое обеспечение. – 2008: Сб. докл. 18-го нац.. симп. с междунар. участием. – Созополь, Болгария. – 2008. – С. 122–127.
39. Шеклиф Дж. Теория электромагнитного измерения расхода / Дж. Шеклиф. – М.: Мир, 1965. – 268 с.
40. Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления: Т. II / Г.М. Фихтенгольц. – М.–Л.: ОГИЗ. Гос. изд-во техн.-теор. лит-ры, 1948. – 860 с.
41. Повх И.Л. Теоретическая гидромеханика / И.Л. Повх. – Л.: Машиностроение, 1976. – 504 с.
42. Корсунский Л.М. Электромагнитные гидрометрические приборы / Л.М. Корсунский. – М.: Стандартгиз, 1964. – 180 с.

43. Зависимость показаний электромагнитных расходомеров от физико-химических свойств измеряемой среды / В.Б. Большаков, Н.И. Косач, И.В. Марфенко [и др.] // Український метрологічний журнал. – 1998. – № 2. – С. 46–49.
44. Электромагнитный метод измерения скорости жидкостных потоков/ В.Б. Большаков, Н.И. Косач, И.В. Марфенко [и др.] // Український метрологічний журнал. – 1997. – № 4. – С. 43–46.
45. Зависимость показаний электромагнитных расходомеров от физико-химических свойств измеряемой среды/ В.Б. Большаков, Н.И. Косач, В.А. Несвитаило [и др.] // Український метрологічний журнал. – 1998. – № 2. – С. 46–49.
46. Большаков В.Б. Створення мобільного еталона передавання одиниці витрати рідини/ В.Б. Большаков, Н.І. Косач, Р.В. Стеценко// Український метрологічний журнал. – 2009. – № 3. – С. 46–52.
47. Ультразвуковые расходомеры и система учета на их основе/ В. Близнюк, В. Костылев, В. Сорокопут [и др.] // Современные технологии автоматизации. – М.: СТА–Пресс, 1998. – № 2. – С. 56–57.
48. Коротков П.А. Тепловые расходомеры/ П.А. Коротков, Д.В. Беляев, Р.К. Азимов. – М.: Машиностроение, 1969. – 176 с.
49. Цейтлин В.Г. Техника измерения расхода и количества жидкостей, газов и паров/ В.Г. Цейтлин. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 359 с.
50. Хамидулин В.К. Ультразвуковые контрольно–измерительные устройства и системы/ В.К. Хамидулин. – Л.: Изд-во , 1989. – 248 с.
51. Некрасов Ю.П. Зависимость показаний термоанемометра от давления/ Ю.П. Некрасов, П.И. Савостенко// Измерительная техника. – 1991. – № 5. – С. 21–23.
52. Термоэлектрические эффекты: методы и средства исследований/ И.П. Куритнык, П.Р. Гамула, Ф.И. Скорпад [и др.] // Измерения, контроль, автоматизация. – 1991. – № 1. – С. 10–16.
53. Скрипник Ю.А. Линеаризация и стабилизация характеристики преобразования термоэлектрического термометра/ Ю.А. Скрипник, А.И. Химичева// Измерительная техника. – 1996. – № 5. – С. 42–45.

54. Сухаревский О.И. Математическое моделирование функционирования теплового массового расходомера МР-01/ О.И. Сухаревский, Д.Н. Жартовский// Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2001. – № 6. – С. 56–60.

55. Власюк Я.М. Реалізація концепції створення єдиної системи обліку природного газу в Україні/ Я.М. Власюк, І.С. Кисіль, О.Є Середюк// Методи та прилади контролю якості. – Івано-Франківськ, 2005. – № 13. – С. 61–65.

56. ГОСТ 5542–87. Газы горючие для промышленного и коммунально-бытового назначения. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 320 с.

57. Корн Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров)/ Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1973. – 831 с.

58. Измерения в промышленности: справочник/ под ред. П. Профоса. – В 3 томах. – Т. 1. Теоретические основы. – М.: Металлургия, 1990. – 496 с.

59. Мейзда Ф. Электронные измерительные приборы и методы измерений; пер. с англ. / Ф. Мейзда. – М.: Мир, 1990. – 535 с.

60. Коробко И.В. Ультразвуковой метод измерения расхода и количества жидкостей и газов/ И.В. Коробко, А.Н. Дидковская, П.К. Кузьменко [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.c-o-k.com.ua/content/view/376>

61. Ультразвуковая расходометрия: как и зачем повышать точность измерений/ С.И. Покрас, А.И. Покрас, И.С. Покрас [и др.] / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.sempal.com

62. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория: Справочник/ Я.Д. Ширман, Ю.И. Лосев, Н.Н. Минервин [и др.]; под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: ЗАО «МАКВИС», 1998. – 828 с.

63. Бурдун Г.Д. Основы метрологии/ Г.Д. Бурдун, Б.Н. Марков. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 256 с.

64. Вострокнутов Н.Н. Цифровые измерительные устройства: Теория погрешностей, испытания, поверка/ Н.Н. Вострокнутов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 208 с.

65. Орнатский П.П. Автоматические измерения и приборы/ П.П. Орнатский. – К.: Вища школа, 1986. – 503 с.
66. ISO 17089:2010. Measurement of fluid flow in closed conduits – Ultrasonic meters for gas – Part 1: Meters for custody transfer and allocation measurement. http://www.iso.org/iso/ru/catalogue_detail.htm?csnumber=41235.
67. International recommendation OIML R 137-1&2 Gas meters. Part 1: Metrological and technical requirements. Part 2: Metrological controls and performance tests. <http://www.nist.gov/pml/wmd/upload/oiml-r137.pdf>.
68. Ф. Херрманн, А. Эрлих, Т. Дитц. Точность изготовления – ключевой фактор общего качества ультразвукового // Третий международный семинар по измерению течения углеводородов в Юго-Восточной Азии, ВНИИР, 9-11 марта Казань, 2004.
69. Цейтлин В.Г. Расходоизмерительная техника/ В.Г. Цейтлин. – М.: Изд-во стандартов, 1977. – 240 с.
70. Ультразвук. Маленькая энциклопедия/ под ред. И.П. Поляминой. – М.: Сов. Энциклопедия, 1979. – 234 с.
71. Киясбейли А.Ш. Частотно-временные ультразвуковые расходомеры и счетчики/ А.Ш. Киясбейли, А.М. Измайлов, В.М. Гуревич. – М.: Машиностроение, 1984. – 20 с.
72. Применение ультразвука в медицине. Физические основы; пер. с англ./ под ред. Л.Р. Гаврилова. – М.: Мир, 1989. – 278 с.
73. Киясбейли А.Ш. Первичные преобразователи систем измерения расхода и количества жидкостей/ А.Ш. Киясбейли, Л.М. Лифшиц. – М.: Энергия, 1980. – 80 с.
74. Fluid flow measurement system for pipes. – Patent US, № 3.– P. 940–985.
75. Фильчаков П.Ф. Справочник по высшей математике/ П.Ф. Фильчаков. – К.: Наукова думка, 1974. – 744 с.
76. ГОСТ 8.207–76. Государственная система обеспечения единства измерений. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения / В кн.

«Основополагающие стандарты в области метрологического обеспечения». – М.: Изд-во стандартов, 1983. – С. 150–158.

77. Борисов А.Н. Обработка нечеткой информации в системах принятия решений/ А.Н. Борисов, А.В. Алексеев, Г.В. Меркурьев. – М.: Радио и связь, 1989. – 304 с.

78. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление; пер. с англ./ А. Пегат. – М.: БИНОМ, 2011. – 798 с.

79. Орлов А.И. Эконометрика/ А.И. Орлов. – М.: Экзамен, 2002. – 442 с.

80. Володарський Є.Т. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю/ Є.Т. Володарський, В.В. Кухарчук, В.О. Поджаренко, Г.Б. Сердюк. – Вінниця: Велес, 2001. – 220 с.

81. Новицкий П.В. Оценка погрешностей результатов измерений/ П.В. Новицкий, И.А. Зограф. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.

82. Методика експериментальних досліджень впливу параметрів природного газу на метрологічні характеристики лічильників природного газу/ А.Г. Бестелесний, Я.М. Власюк, І.С. Кисіль [та ін.] // Методи та прилади контролю якості. – Івано-Франківськ, 2007. – № 18. – С. 46–50.

83. Андрійшин М.П. Вимірювання витрати та кількості газу: Довідник/ М.П. Андрійшин. – Івано-Франківськ: ПП «Сімик», 2004. – 160 с.

84. Глова Ю.С. Повірочна установка АПУ–011/40 / Ю.С. Глова, І.В. Кирияненко, В.Л. Сорокопут [та ін.] Актуальные вопросы метрологического обеспечения измерений рас хода и количества гидкостей и газов: Международная метрологическая конференция», 4-6 сентября 2013 г., Казань, Россия. – 2013 г.

85. Москалюк А.Ф. Разработка, внедрение и опыт эксплуатации установки высшей точности для поверки счетчиков воды/ А.Ф. Москалюк // Проблеми обліку теплоти та води в Україні: зб. матеріалів конф. – К., 2002. – С. 63–68.

86. Либунский В.С. Модернизация и создание проливных установок на базе комплекса «Взлет АПК»/ В.С. Либунский// Проблеми обліку теплоти та води в Україні: зб. матеріалів конф. – К., 2002. – С. 143–146.

87. Кузовков В.М. Новые разработки эталонных СИТ и и установок для поверки счетчиков воды и тепла/ В.М. Кузовков// Проблемы обліку теплоти та води в Україні: зб. матеріалів конф. – К., 2002. – С. 147–152.

88. Лачков В.И. К вопросу о методах поверки расходомеров/ В.И. Лачков, О.Б. Чугунок// Коммерческий учет энергоносителей: сб. материалов конф. – СПб., 2004. – С. 50–53.

89. Фатхутдинов А.Ш. Автоматизированный учет нефти и нефтепродуктов при добыче, транспортировке и переработке/ А.Ш. Фатхутдинов, М.А. Слепян. – М.: ООО «Недра–Бизнес–центр», 2002. – 417 с.

90. Калибровка ультразвуковых расходомеров газа ГУВР-011 в диапазоне расходов, превышающем пределы существующих расходоизмерительных установок/ А.А. Стеценко, В.Л. Сорокопут, С.Д. Недзельский [и др.] // Метрологія та вимірювальна техніка: IX Міжнар. наук.-техн. конф. «Метрологія – 2014», 15–16 жовтня 2014 р., Харків: наук. праці. – Х.: ННЦ «Інститут метрології», 2014.

91. Стеценко А.А. Результаты испытаний ультразвуковых счетчиков газов ГУВР-011 на соответствие требованиям международного стандарта ISO/FDIS 17089-1:2009(E) / А.А. Стеценко // Материалы научно-практического семинара. – Харьков, 2011.

92. Результаты исследования метрологических характеристик ультразвуковых время-импульсных расходомеров/ В.В. Костылев, В.Л. Сорокопут, А.И. Стеценко [и др.] // Метрологія у механіці: I Міжнар. наук.-техн. конф, 1998 р., Харків: наук. праці. – Х., 1998.

93. Стеценко А.А. Проблемы метрологического обеспечения ультразвуковых счетчиков газа / А.А. Стеценко // Материалы конференции «Измерения. Качество. Безопасность». – УНИИМ, Екатеринбург, 2012.

94. Стеценко А.А. Состояние метрологической базы в Украине по поверке счетчиков газа на рабочей среде «природный газ» при рабочих давлениях / А.А. Стеценко // Актуальные вопросы метрологического обеспечения учета жидкостей и газов: Всерос. науч.-практ. конф.: ВНИИР, Казань, 2012.

95. Большаков В.Б. Исследование метрологических характеристик ультразвуковых расходомеров с накладными датчиками/ В.Б. Большаков, В.В. Костылев, В.Л. Сорокопут [и др.] // Экология, технология, экономика водоснабжения и канализации: сб. докладов междунар. конгресса, 15–19 апреля 1997 г., Ялта, Украина.

96. Метрологія. Методи визначення міжповіркового та міжкалібрувального інтервалів засобів вимірювання. ДСТУ–Н РМГ 74: 2009.

97. Стеценко А.А. Дослідження метрологічних характеристик газового ультразвукового витратоміра ГУВР–011. – Івано-Франківськ, Витратометрія–2007, 23–25 жовтня 2007.

98. Методика поверки (калібровки) «Счетчики газа ультразвуковые ГУВР–011» МПУ 24487975.01:2011. – Харьков: ННЦ «Институт метрологии», 2011 г.

99. Гуревич, В.М., Козобродов В.А., Калугин Д.А. и др. Ультразвуковые счетчики газа, воды и теплоносителя с автономным питанием // материалы 13-й конф.: Коммерч. Учет энергоносителей. – СПб.:Борей – Арт, апр. 2001. – С. 135 – 138.

100. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике/ Л. Бергман; пер. с нем. – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1957. – 728 с.

101. Ноздрев В.Ф. Применение ультразвуки в молекулярной физике/ В.Ф. Ноздрев. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1958. – 456 с.

102. Нормативно-методичне забезпечення застосування ультразвукових лічильників / М.І. Болховітін, С.А. Бондарев, Ю.В. Назаренко [та ін.] // Трубопровідний транспорт. – № 3 (81). – 2013. – С. 22–23.

103. Froysa K.-E. A ray theory approach to investigate the influence of flow velocity profiles on transit times in ultrasonic flow meters for gas and liquid / K.-E. Froysa, P. Lunde // 24 Scandinavian Symposium on Physical Acoustics Ustaoset 28–31 January 2001.

104. Ruppel C. Effects of upstream installations on the reading of an ultrasonic flowmeter / C. Ruppel, F. Peters // Flow Measurement and Instrumentation 15 (2004). – P. 167–177.

105. Fluid mechanics of flow metering /W. Merzkirch, K. Gersten, V. Hans [et al.]. – Springer, 2005. – 267 p.

106. Hilgenstock A. Analysis of installation effects by means of computational fluid dynamics – CFD vs experiments? / A. Hilgenstock, R. Ernst // Flow Measurement and Instrumentation. – 1996. – Vol. 7. – № ¾. – P. 161–171.

107. ANN based data integration for multi-path ultrasonic flowmeter [text] /H. Zhao, L. Peng, T. Takahashi [et al.] // Sensors Journal, IEEE. – Vol. 14. – Issue 2.

108. Martins R. S. Numerical evaluation of upstream bend installation effects on fully developed flowprofiles aiming ultrasonic flowmetering / R. S. Martins // 21st International Congress of Mechanical Engineering, October 24–28, 2011, Natal, RN, Brazil.

109. De Sainpaio P.A.B. Numerical simulation of an ultrasonic flowmeter for measurement of two-phase gas-liquid stratified flow / P.A.B. De Sainpaio, J.L.H. Faccini // 19th International Congress of Mechanical Engineering, November 5–9, 2007, Brazil, DF.

110. Holm M. Simulation of flowmeter calibration factors for various installation effects / M. Holm, J. Stang, J. Delsing // Measurement, 15. – 1995. – P. 235–244.

111. Wright W.M.D. Characterisation of capacitive ultrasonic transducer gas flowmeters / W.M.D. Wright, S.A. O’Riordan // Proceedings of the 26th International Manufacturing Conference, IMC 26, 2009.

112. Using optimization algorithms and CFD to improve performance of ultrasonic flowmeters / C.J. Duffell, G.J. Brown, N.A. Barton [et al.] // 2nd International South East Asia Hydrocarbon Flow Measurement Workshop, 25–28 March 2003. – P. 16.

113. Numerical simulation of multi-path ultrasonic flowmeter: Ultrasonic path error analysis / L. Fei, H. Cunfu, W. Bin [et al.] // First International Conference on Sensor Device Technologies and Applications, 2010.

114. CFD optimized acoustic flow measurement and laboratory verification / T. Staubli, B. Luscher, F. Senn [et al.] // HYDRO, 2007, Granada, Spain.

115. Voser A. Analyse und Fehleroptimierung der mehrpfadigen akustischen

Durchflussmessung in Wasserkraftanlagen / A. Voser // ETH Zürich, Dissertation Nr. 13102, 1999.

116. Barton N.A. In-service performance of ultrasonic flowmeters – Application and validation of CFD modelling methods / N.A. Barton // Report № 2002/72, National Engineering Laboratory, East Kilbride, Glasgow, November, 2002.

117. Turkowski M. New criteria for the experimental validation of CFD simulations / M. Turkowski, P. Szufleński // Flow Measurement and Instrumentation. – Vol. 34. – December, 2013. – P. 1–10.

118. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов [и др.]. – СПб.: БВХ-Петербург, 2005. – 800 с.: ил. ISBN 5-94157-558-0.

119. Matsson J. An introduction to SolidWorks Flow Simulation 2010 / J. Matsson. – Mission, Kansas: SDC Publications, 2010. – 297 p.

120. A method based on a novel flow pattern model for the flow adaptability study of ultrasonic flowmeter / D. Zheng, P. Zhang, T. Zhang [et al.] // Flow Measurement and Instrumentation, 29 (2013). – P. 25–31.

121. Роман В.І. Уточнення вагових коефіцієнтів акустичних каналів ультразвукових витратомірів / В.І. Роман, Ф.Д. Матіко // Приладобудування: стан і перспективи: зб. тез XIII Міжнар. наук.-техн. конф., 23–24 квітня 2014 р. – Київ: ПБФ, НТУУ «КПІ», 2014. – С. 216–217.

122. МР 112-03. ГСССД. Определение плотности, фактора сжимаемости, показателя адиабаты и коэффициента динамической вязкости сухого воздуха в диапазоне температур 200...400 К при давлениях до 20 МПа / Козлов А. Д., Мамонов Ю. В., Роговин М. Д., Рыбаков С. И., 2003.

123. Xiong W. Velocity and turbulence measurements downstream of flow conditioners / W. Xiong, K. Kalkuhler, W. Merzkirch // Flow Measurement Instrumentation, 14 . – 2003. – P. 249–260.

124. Schluter Th. PIV measurements of the time-averaged flow velocity downstream of flow conditioners in a pipeline / Th. Schluter, W. Merzkirch // Flow Measurement Instrumentation, 7. – 1996. – P. 173–179.

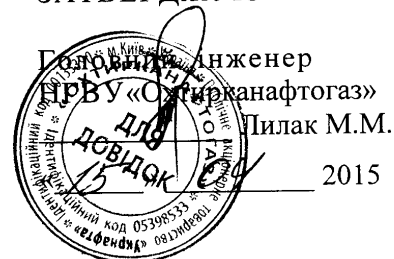
125. Методика поверки (калибровки) «Счетчики газа ультразвуковые ГУВР-011» МПУ 24487975.01:2011. – Харьков: ННЦ «Институт метрологии», 2011 г.

126. Рекомендация Р Газпром 5.13-2010 «Организация и порядок проведения поверки и калибровки ультразвуковых преобразователей расхода газа в ОАО «Газпром». – М.: ЦНТИ, 2010 г.

ДОДАТКИ

Додаток А

ЗАТВЕРДЖУЮ



Головний інженер
 НГВУ «Охтирканафтогаз»
 Пилак М.М.
 2015

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи здобувача кафедри «Метрології та виміральної техніки» Харківського національного університету радіоелектроніки Стеценка Андрія Анатолійовича «Удосконалення ультразвукового методу і засобів вимірювання витрати текучого середовища у закритих каналах», представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

НГВУ «Охтирканафтогаз» має досвід з експлуатації лічильників газу. На теперішній час в НГВУ «Охтирканафтогаз» знаходяться в експлуатації 8 ультразвукових лічильників газу ГУВР-011, які були встановлені на різних об'єктах нашого підприємства протягом 2009-2013 років. В даних ультразвукових лічильниках газу ГУВР-011 впроваджено наступні нові результати дисертаційної роботи Стеценка А.А.:

- розроблено двоканальний ультразвуковий метод вимірювання витрати текучого середовища, який передбачає обробку результатів вимірювання швидкості потоку вимірюваного середовища і, як результат, зменшення абсолютної похибки визначення часу поширення сигналу вздовж і проти потоку;
- оптимізовано багатоканальний ультразвуковий метод вимірювання витрати текучого середовища, який передбачає взаємне розташування акустичних каналів у перерізі трубопроводу відповідно до вибраних апроксимаційних квадратурних формул, що дозволяє враховувати профіль швидкостей, а також забезпечує зменшення абсолютної похибки визначення часу поширення сигналу вздовж і проти потоку.

За весь час роботи лічильники газу ГУВР-011 показали себе як надійні, стабільні та сучасні прилади, які відповідають сьгоднішнім технологічним вимогам виробництва.

Головний метролог
 НГВУ «Охтирканафтогаз»

Г.П. Однороб

ЗАТВЕРДЖУЮ

Головний інженер

НГВУ „Полтаванафтогаз”



Венгльовський М.М.

«08» 04 2015р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи здобувача кафедри «Метрології та вимірювальної техніки» Харківського національного університету радіоелектроніки Стеценка Андрія Анатолійовича «Удосконалення ультразвукового методу і засобів вимірювання витрати текучого середовища у закритих каналах», представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Здобувачем кафедри «Метрології та вимірювальної техніки» Харківського національного університету радіоелектроніки Стеценко А.А. в дисертаційній роботі впроваджено наступні нові результати:

- розроблено рекомендації та методика щодо застосування ультразвукових лічильників газу ГУВР-011 для комерційного та технологічного обліку в галузях газо- та нафтовидобування, транспортування газу в житлово-комунальному господарстві та інших галузях;

- розроблено 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.

Дані результати використані в семи ультразвукових лічильниках газу ГУВР-011, що знаходяться в експлуатації в НГВУ «Полтаванафтогаз» з 2012 року.

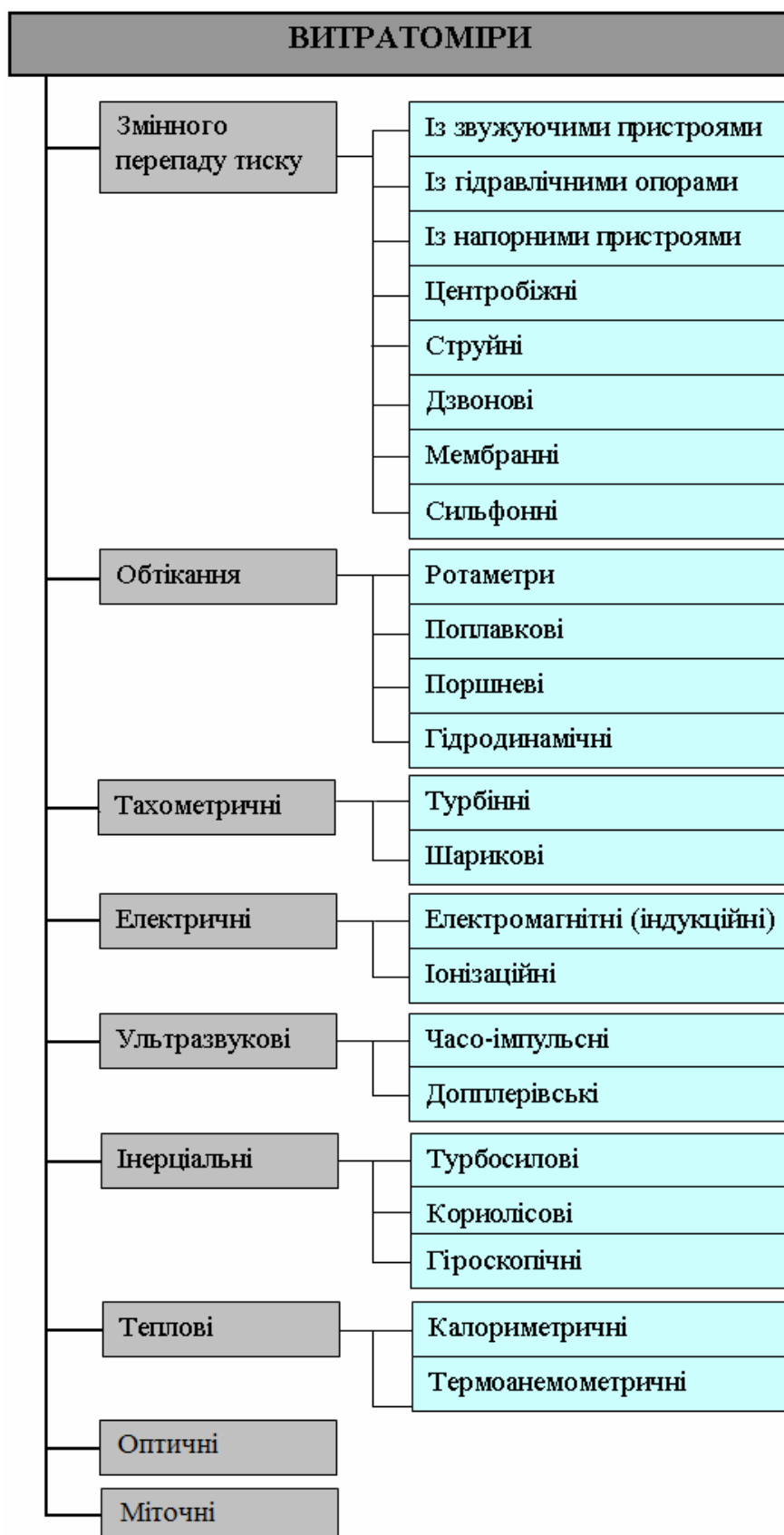
За весь час роботи лічильники газу ГУВР-011 показали себе як сучасні високоточні прилади, що відповідають вимогам комерційного та технологічного обліку природного газу з заявленими метрологічними характеристиками, які підтверджуються відповідними свідоцтвами про повірку.

Головний метролог
НГВУ „Полтаванафтогаз”

Р.І. Боряк

Додаток Б

Класифікація основних видів витратомірів [7, 26]



Додаток В

Фізичні якості текучого середовища [24, 25, 49]

При вирішенні завдань вимірювання витрати і кількості текучого середовища, зокрема рідини, найбільш суттєве значення мають такі їх фізичні якості, як густина, стискаємість, температурне розширення, в'язкість.

1. Густина рідини

$$c = M/V \quad (\text{B.1})$$

де M – маса рідини в об'ємі V .

Якщо рідина неоднорідна, наприклад, багатофазне середовище з різним розподіленням складу за об'ємом V , то за виразом (Б.1) визначають середню густину в об'ємі.

На практиці густину рідини іноді визначають за її питомою (об'ємною) вагою

$$\gamma = G/V, \quad (\text{B.2})$$

де G – вага рідини в об'ємі V .

Густина і об'ємна вага рідини зв'язані співвідношенням:

$$\gamma = \rho/g, \quad (\text{B.3})$$

де g – прискорення вільного падіння.

2. Стискаємість рідини під дією тиску характеризується коефіцієнтом об'ємного стискування розмірністю

$$\beta_V = \frac{1}{V} \cdot \frac{\Delta V_p}{\Delta p}, \quad (\text{B.4})$$

де ΔV_p – зміна первинного об'єму при збільшенні тиску на величину Δp .

Коефіцієнт об'ємного стискування для рідин дуже малий: для води він дорівнює $2 \cdot 10^9$ м²/Н. Тому рідини вважають такими, що практично не стискаються.

3. Температурне розширення рідини характеризується коефіцієнтом температурного розширення розмірністю

$$\beta_t = \frac{1}{V} \cdot \frac{\Delta V_t}{\Delta t}, \quad (\text{B.5})$$

де ΔV_t – зміна первинного об'єму при збільшенні температури на величину Δt .

Коефіцієнт β_t для крапельних рідин невеликий. Так, наприклад, для води в залежності від діапазону температур і тиску від змінюється в границях 0,00015—0,00075. Таким чином, густина і питома вага крапельних рідин незначно змінюються при зміні тиску і температури.

На відміну від рідин газу характеризуються значною стискаемістю і великими коефіцієнтами температурного розширення.

4. Залежність густини газу від тиску і температури встановлена рівнянням стану. Для ідеальних газів застосовують рівняння Клапейрона

$$\rho = \frac{P}{g \cdot R \cdot T}, \quad (\text{B.6})$$

де P – абсолютний тиск газу (додаток надлишкового та барометричного тисків);

g – відносна масова частка газу;

T – абсолютна температура газу;

R – газова стала, різна для різних газів, але незалежна від P і T .

Розв'язок рівняння (Б. 6) відносно R , при умові постійності ($g \cdot R \cdot T$), дає розрахункові співвідношення за допомогою яких можна визначити густину газу

для будь-якого робочого стану (P_p, T_p) , якщо відомі дані для нормального стану $(P_i = 10,136 \cdot 10^4 \text{ н/м}^2 \text{ (760 мм рт. ст)}, T_i = 293^\circ\text{C})$, і навпаки:

$$c_p = c_H \cdot \frac{P_p}{P_H} \cdot \frac{T_H}{T_p}, \quad c_H = c_p \cdot \frac{P_H}{P_p} \cdot \frac{T_p}{T_H} \quad (\text{B.7})$$

Рівняння стану для газової суміші різних газів із різними газовими сталими, має вигляд:

$$\rho_{\text{noi}} = \frac{(D_{i1} + D_{i2} + \dots + D_{ik})}{(g_1 \cdot R_1 + g_2 \cdot R_2 + \dots + g_k \cdot R_k) \cdot T}, \quad (\text{B.8})$$

де $D_{i1}, D_{i2}, \dots, D_{ik}$ – парціальний тиск газів, що входять до суміші (тиск, який мав би один газ із суміші в об'ємі і при температурі суміші);

g_1, g_2, \dots, g_k – відносні масові частки газів, що входять до суміші;

R_1, R_2, \dots, R_k – відповідні газові сталі газів.

Рівняння стану для кожного із газів, що входять до суміші, має вигляд:

$$\rho_k = \frac{P_{ik}}{R_k \cdot T} \quad (\text{B.9})$$

Практично всі гази (за виключенням азоту і гелію) не є ідеальними, тому в розрахункові формули вводять відповідні поправочні коефіцієнти, що враховують неідеальність газу.

5. В'язкість рідини характеризується опором, що протидіє взаємному переміщенню суміжних шарів рідини. Динамічний коефіцієнт в'язкості μ визначається із формули Ньютона:

$$P_{iAD} = \eta \cdot F \cdot \Delta v \cdot \Delta x, \quad (\text{B.10})$$

де P_{iAD} – сила, яку треба прикласти для переміщення (утримання) одного шару рідини відносно іншого;

F – площа поверхні шару рідини;

Δv – відносна швидкість двох шарів рідини;

Δx – відстань між шарами рідини.

Залежність динамічного коефіцієнта в'язкості від температури описується емпіричними формулами Пуазейля (для чистої води)

$$\eta = 0,0179 / (1 + 0,0368T + 0,000221T^2) \quad (\text{B.11})$$

і Міллікена (для повітря)

$$\eta = 1,745 \cdot 10^{-6} + 5,03 \cdot 10^{-9}T. \quad (\text{B.12})$$

Наприклад, при температурі 20°C масло має в'язкість у 100000 разів більшу, ніж вода.

Кінематичний коефіцієнт в'язкості

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{B.13})$$

Кінематичний коефіцієнт в'язкості крапельних рідин при гідравлічних розрахунках звичайно не враховується.

При розрахунках витрати рідини використовують поняття ідеальної рідини – модель реальної рідини, позбавленої в'язкості. Розрахунки уточнюють введенням поправочних коефіцієнтів.

Додаток Д

Д.1 Густина, швидкість розповсюдження ультразвуку в вуглеводнях, що входять до складу нафти та нафтопродуктів, та їх температурний коефіцієнт при $t = 20^{\circ}\text{C}$ [100, 101]

Вуглеводень	ρ , кг/м^3	C , м/с	α_t , м/с-град
Пентан	621	1035	-4,2
Гексан	654	1145	-4,3
Гептан	684	1219	-4,5
Октан	703	1226	-4,4
Нонан	738	1248	-4,4
Циклогексан	779	1284	-4,0
Метилциклогексан	764	1247	-5,6
Бензол	878	1326	-5,2
Толуол	866	1331	-4,3
Етилбензол	868	1338	-4,4
м-Ксилол	863	1340	-4,1
о-Ксилол	871	1360	-4,1
п-Ксилол	860	1330	-4,8

Д.2 Швидкість розповсюдження ультразвуку в деяких рідинах [34]

Рідина	C , м/с
Ацетон	1192
Вода	1481
Бензин	1158
Метиловий спирт	1123
Етиловий спирт	1180
Керосин	1315
Дизельне паливо	1367
Трансформаторне мастило	1444

Додаток Е

Основні технічні дані автоматизованих повірочних установок

Е.1 Основні технічні дані АПУ–011/40

Параметр, одиниця виміру	Значення
Ємкість збірної резервуару, м ³	1,3 + 0,10
Температура води, °С	20 ± 5
Похибка виміру температури води, не більше, °С	± 0,3
Діапазон відтворення об'ємної витрати води, м ³ /год	від 0,085 до 40
Точність підтримання миттєвої витрати води, %	1,0
Надлишковий тиск води у вимірювальній ділянці, МПа.	від 0,05 до 0,3
Точність установки і підтримання тиску води, не гірше, %	5,0
Об'ємний вміст повітря в воді, не більше, %.	0,01
Діаметр умовного проходу досліджуваних ЗВТ, мм	від 15 до 180
Кількість приладів на вимірювальній ділянці	від 1 до 6
Ємкість вагового баку, м ³	0,32 + 0,03
Тривалість зливу води з вагового баку, с, не більше	30
Тривалість спрацювання перекидного пристрою, мс	25
Різниця інтервалів переключення ПП, не більше, мс	±1,2
Кількість еталонних витратомірів, шт	2
Основна відносна похибка еталонного витратоміра у діапазоні витрат 1:20, не більше, %	±0,25
Діапазон зважування цифрових ваг, кг	0,1 до 500
Похибка визначення маси вагового бака, г	±20
Похибка виміру інтервалів часу, не більше, с	1·10 ⁻⁴
Напруга трифазної мережі змінного струму, В	220 ⁺²² -33
Споживана електроустановкою потужність, кВт	7,5

Е.2 Основні технічні дані АПУ–Г–011/2500

Параметр, одиниця виміру	Значення
Діапазон витрати повітря, м ³ /год.	від 0,5 до 2500
Кількість еталонних лічильників, од.	4
Робочі діапазони еталонних лічильників (ЕЛ), м ³ /год: ЕЛ1 – турбінний лічильник ЛГЕ–2500 ЕЛ2 – турбінний лічильник ЛГЕ–250 ЕЛ3 – роторний лічильник типорозміру G2,5 ЕЛ4 – роторний лічильник РЛ–М	від 250 до 2500 від 25 до 250 від 3 до 25 від 0,5 до 4,0
Основна відносна похибка ЕЛ в робочих діапазонах, %	не більше 0,25
Діаметр умовного проходу лічильників, що повіряються (калібруються), мм	від 40 до 200
Кількість одночасно повіряємих лічильників, од	4
Температура робочого середовища, °С	20 ±5
Похибка вимірювання температури повітря, °С, не більше	± 0,06
Точність підтримання миттєвої витрати повітря, %	не гірше ±1
Надлишковий тиск повітря в установці, кПа	від –7,0 до –0,5
Точність завдання і підтримання тиску повітря, %	не гірше ±2
Гранична максимальна температура повітря, °С	25
Гранична мінімальна температура повітря, °С	15
Відносна вологість при 25 °С, %	до 80
Напруга трифазної мережі змінного струму, В	220 ⁺²² –33
Споживана потужність трифазної мережі, кВт	7,5
Живлення ЕОМ і вимірювальних приладів однофазне, В	220
Споживана потужність однофазної мережі, кВт	1,0
Частота мережі живлення, Гц	50 ±1
Тиск повітря, що забезпечується компресором, МПа	0,6–0,8
Продуктивність компресора, м ³ /ч.	не більше 4
Електричний опір ізоляції між електричними ланцюгами і корпусом обладнання в нормальних умовах, МОм	не менше 20

Додаток Ж

Характеристики витратомірів типу УВР-011*)

Характеристики	Значення							
	32	40	50	65	80	100	150	200
DN врезной секции, мм	32	40	50	65	80	100	150	200
Порогове значення витрати Q_p , м ³ /год	0,02	0,03	0,04	0,04	0,1	0,15	0,35	0,6
Мінімальне значення витрати Q_{\min} , м ³ /год	0,20	0,35	0,50	0,8	1,3	2,0	4,5	8
Перехідне значення витрати, м ³ /год	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0	9,0	12,0
Максимальне значення витрати Q_{\max} , м ³ /год	30	45	75	120	180	285	640	1130
Відносна похибка вимірювання витрати в діапазоні Q_{\min} – Q_p , %	4							
Відносна похибка вимірювання витрати в діапазоні Q_p – Q_{\max} , %	1							
Втрати тиску при Q_{\max} (не більше), кПа	5							

*) Витратоміри УВР-011А/В, УВР-011А/ВС призначені для роботи в діапазоні температур рідини від 0°С до 150°С, при тиску в трубопроводі до 1,6 МПа.

Додаток К

Дані первинної та періодичних повірок (калібрувань)
витратомірів УВР–011 за період 1996–2012 роки

№	Номер	Похибка при повірці, %		
		первинний	через 2 роки	через 4 роки
1	130	0,56	-0,58	0,36
2	318	0,5	-0,67	0,51
3	320	-0,78	-0,5	-0,27
4	321	-0,17	0,39	-0,44
5	324	-0,41	-0,35	-0,09
6	326	-0,41	0,12	0,31
7	329	-0,3	-0,29	-0,34
8	334	0,6	-0,58	0,21
9	344	-0,32	-0,07	0,08
10	353	-0,43	-0,54	0,17
11	357	-0,36	0,26	-0,38
12	376	0,41	0,11	-0,22
13	377	0,42	-0,19	-0,16
14	390	0,12	-0,39	-0,38
15	401	0,38	0,49	-0,42
16	420	0,43	0,4	-0,46
17	448	0,33	-0,2	0,26
18	452	0,59	0,58	-0,07
19	460	0,15	0,23	0,21
20	477	0,36	-0,17	0,17
21	480	0,23	0,4	-0,56
22	481	0,27	0,2	-0,12
23	482	-0,18	0,31	-0,17
24	486	-0,51	0,34	0,17
25	487	-0,56	0,61	0,66
26	488	-0,17	0,08	0,54
27	491	0,24	-0,06	0,26
28	493	0,33	0,37	0,28
29	510	0,39	0,22	0,29
30	880	0,16	0,41	-0,24
31	1007	0,22	0,15	0,24
32	1086	0,34	0,29	0,11
33	1125	-0,34	-0,2	0,51
34	1167	0,2	0,13	0,28
35	1168	-0,26	-0,07	-0,38
36	1169	0,32	-0,16	0,22
37	1183	0,19	0,63	0,37
38	1185	0,26	-0,12	0,15
39	1188	-0,2	-0,32	0,16
40	1202	0,37	0,19	-0,59

Додаток Л

Таблиця Л.1 – Результати оцінки відхилення коефіцієнтів калібрування

Зав. №	№180		№189		№194		№333	
	k_Q	δ_k	k_Q	δ_k	k_Q	δ_k	k_Q	δ_k
0	0,97	-5,96219098	0,9603	-8,39454355	0,9337	-8,80054698	0,9746	-7,41022231
4,9	0,97	-5,96219098	0,9603	-8,39454355	0,9337	-8,80054698	0,9746	-7,41022231
10,7	0,9725	-5,7198255	0,9628	-8,1560622	0,9361	-8,5661262	0,9775	-7,13471404
13,1	0,9767	-5,31265148	0,967	-7,75541353	0,9405	-8,13635476	0,9811	-6,79270378
15,1	0,9807	-4,9248667	0,971	-7,37384337	0,9447	-7,72611838	0,9846	-6,46019381
17,4	0,9854	-4,46921958	0,9756	-6,93503768	0,9496	-7,24750928	0,9886	-6,08018241
20	0,9903	-3,99418323	0,9806	-6,45807498	0,955	-6,72006251	0,9931	-5,65266958
22,9	0,9933	-3,70334464	0,9848	-6,05742631	0,9587	-6,3586638	0,9975	-5,23465704
25,4	0,9961	-3,4318953	0,9889	-5,66631689	0,9619	-6,04610275	1,0022	-4,78814364
28,6	0,9993	-3,12166747	0,9937	-5,2084327	0,9655	-5,69447158	1,0076	-4,27512825
32	1,0031	-2,75327193	0,9994	-4,66469522	0,9698	-5,27446767	1,014	-3,66711001
36,4	1,0086	-2,22006786	1,0076	-3,88247639	0,976	-4,66888064	1,023	-2,81208436
43,2	1,0137	-1,72564227	1,0161	-3,0716398	0,9831	-3,97538582	1,0284	-2,29906897
51,6	1,0153	-1,57052836	1,0181	-2,88085472	0,9851	-3,78003516	1,0308	-2,07106213
59,3	1,0166	-1,4444983	1,0195	-2,74730516	0,9864	-3,65305724	1,0331	-1,85255558
66,7	1,0181	-1,29907901	1,0211	-2,5946771	0,9879	-3,50654425	1,0357	-1,60554817
76,2	1,0198	-1,13427048	1,023	-2,41343127	0,9896	-3,34049619	1,0384	-1,34904047
86,5	1,0213	-0,98885119	1,025	-2,22264619	0,9911	-3,1939832	1,0393	-1,26353791
98,2	1,0232	-0,80465342	1,0279	-1,94600782	0,993	-3,00840008	1,0402	-1,17803534
116,8	1,0261	-0,52350945	1,0322	-1,5358199	0,9957	-2,74467669	1,0414	-1,06403192
142,9	1,029	-0,24236549	1,0366	-1,11609272	0,9988	-2,44188318	1,0429	-0,92152765
168,4	1,0295	-0,19389239	1,0378	-1,00162167	1,0008	-2,24653253	1,045	-0,72202166
216,2	1,0298	-0,16480853	1,0387	-0,91576839	1,0026	-2,07071694	1,0477	-0,46551397
266,7	1,03	-0,14541929	1,0397	-0,82037585	1,0048	-1,85583122	1,0493	-0,31350941
326,5	1,0303	-0,11633543	1,0409	-0,7059048	1,0073	-1,6116429	1,0504	-0,20900627
400	1,0307	-0,07755696	1,0424	-0,56281599	1,0104	-1,30884938	1,0515	-0,10450314
484,8	1,0312	-0,02908386	1,0445	-0,36249165	1,015	-0,85954288	1,0522	-0,03800114
640	1,0319	0,038778478	1,0476	-0,06677478	1,0215	-0,22465325	1,0531	0,047501425
842,1	1,0315	0	1,0483	0	1,0238	0	1,0526	0
1142,9	1,0305	-0,09694619	1,0482	-0,00953925	1,0245	0,068372729	1,0512	-0,13300399
1454,5	1,0299	-0,15511391	1,0481	-0,01907851	1,0251	0,126977925	1,0506	-0,1900057
1777,8	1,0299	-0,15511391	1,0481	-0,01907851	1,0251	0,126977925	1,0506	-0,1900057