

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Львівська політехніка»



Роман Віталій Іванович

УДК 681.121.89.082.4

**Підвищення точності ультразвукових витратомірів
в умовах спотворень структури потоку**

05.11.01 – прилади та методи вимірювання механічних величин

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі автоматизації теплових та хімічних процесів Національного університету «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник – кандидат технічних наук, доцент
МАТІКО Федір Дмитрович,
доцент кафедри автоматизації теплових та хімічних процесів
Національного університету «Львівська політехніка».

Офіційні опоненти – доктор технічних наук, професор
КОЛОМІЄЦЬ Леонід Володимирович,
завідувач кафедри акредитації, якості та споживчої політики
Одеської Державної академії технічного регулювання та
якості.

кандидат технічних наук, доцент
БРОДИН Юрій Іванович,
начальник відділу первинних еталонів одиниць об'єму і
витрати газу філії Метрологічного центру НАК «Нафтогаз
України».

Захист відбудеться 20 березня 2015 р. о 16.30 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д35.052.04 в Національному університеті «Львівська політехніка» (79013, Львів, вул. Устияновича, 5, ауд. 51, 10-го корпусу).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» (79013, Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий «___» лютого 2015 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
Д 35.052.04
к.т.н., доцент



Ю.З. Вашкурак

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Точність вимірювання витрати газоподібних енергоносіїв, зокрема природного газу, має величезне значення для всіх галузей промисловості. В умовах постійного дефіциту газу на вітчизняному ринку та його високої вартості, вкрай важливим є застосування високоточних та надійних засобів його обліку. Це зумовлює постійний та швидкий розвиток засобів вимірювання витрати газу, зокрема, на базі ультразвукових методів.

Широке застосування ультразвукових витратомірів (УЗВ) викликане рядом їх переваг: неінвазивність, широкий діапазон вимірювання, малі втрати тиску, можливість застосування для чистих і забруднених потоків та ін. Проте, серед їх недоліків слід виділити високу чутливість до відхилень умов потоку під час експлуатації від умов їх калібрування, зокрема, спотворення структури потоку мають значний вплив на похибку вимірювання витрати УЗВ.

У багатьох наукових працях запропоновано два способи вирішення цієї проблеми: встановлення перед УЗВ прямолінійної ділянки вимірювального трубопроводу (ВТ) достатньої довжини, або застосування спеціальних пристроїв підготовки потоку (ППП) та пристроїв кондиціонування потоку (кондиціонери потоку) перед витратоміром. Перший спосіб може бути застосований за умови, що відомі вимоги до довжин прямолінійних ділянок для конфігурацій ВТ із різними типами місцевих опорів (МО). Другий спосіб – застосування спеціальних PPP або кондиціонерів потоку призводить до збільшення втрат тиску.

Слід відмітити, що встановлення PPP або кондиціонерів потоку не знімає повністю питання вибору довжини прямолінійної ділянки ВТ, оскільки для УЗВ із встановленим PPP або кондиціонером потоку також необхідно витримати певну мінімальну її довжину. Також в окремих випадках встановлення PPP або кондиціонерів потоку та зміна їх характеристик під час експлуатації (зокрема із-за засмічення і неточності виготовлення) призводить до збільшення похибки вимірювання витрати.

Отже, **актуальними і вкрай важливими** є дослідження спрямовані на удосконалення УЗВ газу та визначення умов їх застосування (зокрема і мінімальних довжин прямолінійних ділянок ВТ), що дозволяють зменшити додаткову складову похибки вимірювання витрати, зумовлену спотворенням структури потоку. Зменшення цієї складової похибки дозволить підвищити точність вимірювання витрати газу за допомогою УЗВ, а отже і ефективність роботи виробництв, пов'язаних із транспортуванням та споживанням газоподібних енергоносіїв.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась згідно з планом роботи кафедри автоматизації теплових та хімічних процесів Національного університету «Львівська політехніка» за напрямом «Вимірювання витрати та кількості плинних енергоносіїв». Деякі питання дисертаційної роботи розроблялись здобувачем при виконанні держбюджетних та госпдоговірних науково-дослідних робіт: «Моделювання та мінімізація дисбалансів і втрат природного газу в газотранспортних системах, зумовлених похибками обліку», номер державної реєстрації 0110U001106 (2010-2012 рр., виконавець); «Дослідження та розроблення заходів щодо зменшення технологічних витрат і втрат

природного газу в газорозподільних підприємствах», номер державної реєстрації 0113U003193 (2013-2014 рр., виконавець); «Методи визначення фізичних властивостей енергоносіїв для задач їх обліку», номер державної реєстрації 0111U005381 (2011-2013 рр., виконавець); «Обстеження вузлів обліку природного газу в УМГ ДП «Укртрансгаз»», замовник – ЗАТ «Інститут енергоаудиту та обліку енергоносіїв», м. Львів, номер госпдоговору 1304 від 10.01.2011 р., (виконавець); «Обстеження вузлів обліку природного газу в системі «Chisinau-gaz»», замовник – ТОВ «Chisinau-gaz» (Молдова), номер госпдоговору 1833 від 24.01.2013 р., (виконавець); «Технічна експертиза обстеження та аналізу стану вузлів обліку природного газу на основі лічильників газу», замовник – ТзОВ «Інноваційні енергетичні системи», м. Київ, номер госпдоговору 1/Т/0476 від 26.02.2014 р., (виконавець).

Мета і завдання досліджень. Метою досліджень є підвищення точності вимірювання витрати газу за допомогою ультразвукових витратомірів в умовах спотворень структури потоку шляхом удосконалення ультразвукових витратомірів та визначенням вимог до їх застосування.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

- проаналізувати існуючі ультразвукові методи та витратоміри газу; уточнити класифікацію УЗВ газу та сформувані вимоги до їх вибору, що забезпечують найвищу точність вимірювання витрати в умовах спотворень структури потоку;

- проаналізувати сучасні методи розрахунку швидкості звуку в природному газі і розробити рекомендації щодо їх застосування в системах вимірювання витрати на базі УЗВ, а також для моделювання таких систем;

- виконати аналіз факторів впливу на метрологічні характеристики УЗВ; розробити рівняння відносної похибки системи вимірювання витрати газу на базі УЗВ із врахуванням додаткових складових похибки, що виникають в умовах експлуатації УЗВ;

- розробити методіку визначення залежності коректувального коефіцієнта від числа Рейнольдса для діаметральних УЗВ;

- виконати аналіз методів визначення координат розташування акустичних каналів (АК) УЗВ та їх вагових коефіцієнтів та вибрати метод для застосування під час проектування багатоканальних хордових УЗВ; удосконалити вибраний метод для підвищення точності інтегрування профілю швидкості потоку;

- удосконалити математичну модель УЗВ із двома хордовими АК на основі результатів його експериментальних досліджень та застосувати її для дослідження похибки витратоміра в умовах спотворень структури потоку після типових МО;

- розробити рекомендації для вибору довжин прямолінійних ділянок ВТ після типових МО для найбільш поширених конструкцій УЗВ із двома хордовими АК.

Об'єктом дослідження є процес вимірювання витрати та кількості газоподібних плинних енергоносіїв.

Предметом дослідження є ультразвукові витратоміри газу на основі різницевого часоімпульсного методу вимірювання витрати та похибки вимірювання витрати, зумовлені спотворенням структури потоку.

Методи досліджень. В основу дисертаційної роботи покладено використання методів обчислювальної гідродинаміки (CFD-методи) для моделювання газоподібних потоків та методи сучасних інформаційних технологій. Застосовано

числові методи інтегрування для визначення конструктивних характеристик УЗВ газу. Застосовано елементи матричного числення для обробки масивів даних за результатами CFD-моделювання. Дослідження метрологічних характеристик УЗВ газу виконані із застосуванням теорії похибок. Для виконання експериментальних досліджень метрологічних характеристик УЗВ газу застосовано методи планування та постановки експерименту.

Наукова новизна отриманих результатів. У дисертаційній роботі розв'язано важливу науково-прикладну задачу – підвищення точності вимірювання витрати за допомогою УЗВ шляхом усунення додаткової складової похибки, зумовленої спотворенням структури потоку. При цьому отримані такі нові наукові результати:

1. Уточнено класифікацію УЗВ газу за методом вимірювання витрати, за способом взаємодії з потоком, за кількістю акустичних каналів, за кутом нахилу акустичних каналів відносно осі потоку, за відбиванням звукових коливань, за схемою розташування акустичних каналів, що дало можливість сформулювати вимоги до вибору УЗВ для вимірювання витрати в умовах спотворень структури потоків.

2. Удосконалено рівняння відносної похибки системи вимірювання витрати газу на базі УЗВ, яке, на відміну від існуючих, дозволяє врахувати додаткові складові похибки вимірювання витрати, що виникають в умовах експлуатації УЗВ.

3. Удосконалено метод визначення координат розташування акустичних каналів багатоканальних хордових УЗВ та їх вагових коефіцієнтів шляхом уточнення вагової функції числового методу інтегрування Гауса-Якобі, що дозволяє підвищити точність інтегрування профілю швидкості потоку, а, відповідно, і точність вимірювання витрати, зокрема, в умовах спотворень структури потоку.

4. Запропоновано методологію удосконалення математичної моделі УЗВ на основі порівняння результатів CFD-моделювання та наявних еталонних даних про вимірювану витрату, що дозволяє усунути складові похибки моделі внаслідок неточності відтворення конструкції витратоміра та неточності відтворення газодинамічних властивостей потоку.

5. На основі запропонованої методології удосконалено математичну модель двоканального хордового УЗВ шляхом введення залежності калібрувального коефіцієнта від числа Re , що дозволило застосувати її для дослідження похибки витратоміра та підвищення його точності в умовах спотворень структури потоку.

Практичне значення одержаних результатів:

- визначено діапазони значень основних та додаткових складових відносної похибки системи вимірювання витрати на базі одно-, дво-, чотиріканальних УЗВ за часоімпульсним методом вимірювання витрати потоку;

- розроблено методику визначення коректувального коефіцієнта діаметральних УЗВ на основі результатів CFD-моделювання без необхідності його фізичного калібрування на спеціальних установках;

- за допомогою удосконаленого методу визначено координати розташування та вагові коефіцієнти АК УЗВ (при кількості хордових АК від 2 до 6), застосування яких дозволяє підвищити точність інтегрування профілю швидкості потоку; отримані значення координат розташування АК УЗВ та їх вагових коефіцієнтів застосовані при проектуванні витратомірів в ПрАТ «Енергооблік» (м. Харків);

- на основі розробленої методології удосконалення математичної моделі УЗВ,

розроблено методику дослідження його похибки в умовах потоків зі спотвореною структурою, яка може застосовуватись як на етапі проектування витратомірів, так і для діючих моделей; методика впроваджена в ПрАТ «Енергооблік» та застосована для дослідження похибки УЗВ газу ГУВР-011;

- на основі розробленої методики дослідження УЗВ в умовах спотворень структури потоку, сформовано рекомендації щодо вибору мінімальних довжин прямолінійних ділянок ВТ для класу УЗВ (двоканальні хордові, кут нахилу АК в межах 45... 67°) та конкретного реального УЗВ газу ГУВР-011А2.2/ВС, які дозволяють зменшити додаткову складову відносної похибки вимірювання витрати зумовлену спотворенням структури потоку під час інсталяції таких витратомірів;

- отримані в роботі наукові результати впроваджені в навчальний процес кафедри автоматизації теплових та хімічних процесів Національного університету «Львівська політехніка» в курсі лекцій «Технологічні вимірювання».

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно, на основі власних ідей і розробок, а окремі досягнуті у співавторстві з науковим керівником. В публікаціях, в яких викладено результати досліджень і які написані у співавторстві, автору належать: CFD-моделювання та обґрунтування впливу спотворень структури потоку на похибку визначення швидкості одноканальних діаметральних УЗВ [5, 10]; аналіз ультразвукових методів та засобів вимірювання витрати та обґрунтування їх вибору для вимірювання потоків із спотвореною структурою потоку [11]; розроблено методику визначення коректувального коефіцієнта діаметральних УЗВ за результатами CFD-моделювання [4, 12]; уточнення вагової функції числового методу інтегрування Гауса-Якобі на основі степеневого закону розподілу швидкості [1, 8]; виконано порівняльний аналіз методів розрахунку швидкості звуку в природному газі; виокремлено діапазон застосування та похибки цих методів для задач ультразвукової витратометрії [6, 9]; розроблено методику дослідження впливу спотворень структури потоку на похибку УЗВ за результатами CFD-моделювання [2, 13].

Апробація результатів роботи. Дисертаційна робота обговорювалась на засіданнях та наукових семінарах кафедри автоматизації теплових та хімічних процесів Національного університету «Львівська політехніка». Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на шести конференціях, а саме: 19-тій Міжнародній конференції з автоматичного управління «Автоматика/*Automatics* – 2012» (Київ, 26-28.09.12); 4-тій Міжнародній конференції молодих вчених «Енергетика та системи керування, *EPECS* – 2013» (Львів, 21-23.11.13); 4-тій Науково-практичній конференції «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання» (Івано-Франківськ, 26-27.11.13); Всеукраїнській науково-практичній інтернет-конференції молодих учених та студентів «Актуальні проблеми автоматизації та управління» (Луцьк, 18.03.14); 13-тій міжнародній науково-технічній конференції «ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи» (Київ, 23-24.04.14); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Інформаційні та моделюючі технології ІМТ – 2014 (сучасний стан та шляхи розвитку інформаційних технологій та технологій моделювання програмних та інформаційних систем)» (Черкаси, 29-31.05.14).

Публікації. За результатами дисертації опубліковано 13 наукових праць, у тому

числі, 7 статей у фахових виданнях з переліку ДАК України, серед них 2 праці в науковому журналі що входить до міжнародної наукометричної бази *Index Copernicus*, 6 матеріалів конференцій, 2 праці написані без співавторів.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків по роботі в цілому, списку використаних джерел та додатків. Загальний об'єм дисертації становить 184 сторінок, 41 рисуноків, 14 таблиць, з яких основна частина викладена на 155 сторінках (33 рисуноків, 11 таблиць), з них 3 сторінки повністю зайняті таблицями та ілюстраціями, список використаних джерел із 129 найменувань на 15 сторінках, 9 додатків на 29 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми, сформульовано мету та задачі наукових досліджень, показано зв'язок дисертації з науковими програмами та планами, визначено об'єкт та предмет досліджень, наукову новизну, практичну цінність та особистий внесок здобувача в одержаних результатах, наведено відомості про їх апробацію та впровадження.

В першому розділі наведені результати аналізу науково-технічної літератури щодо стану розвитку ультразвукових методів вимірювання витрати. На основі порівняння характеристик ультразвукових методів та витратомірів з традиційними методами та засобами вимірювання, визначено перелік їх переваг та недоліків з точки зору застосування для вимірювання витрати газових потоків.

За результатами аналізу особливостей конструкції УЗВ, їх технічних характеристик визначено ознаки, за якими необхідно виконувати класифікацію УЗВ: за методом вимірювання витрати потоку; за способом взаємодії з потоком; за кількістю АК; за кутом нахилу АК відносно осі потоку; за відбиванням звукових коливань; за схемою розташування АК. Уточнено класифікацію УЗВ за вказаними ознаками (див. рис.1), що дозволило сформулювати вимоги до вибору УЗВ газу, виконання яких дають змогу мінімізувати похибку вимірювання витрати зумовлену спотворенням структури потоку.

Зокрема, за результатами аналізу суті ультразвукових методів вимірювання витрати встановлено, що різницевий метод має простішу реалізацію в порівнянні із кореляційним методом; в ньому реалізована можливість вимірювати швидкості потоку чистих газів без врахування швидкості звуку в газі на відміну від методу на основі ефекту Доплера; теоретичний принцип вимірювання витрати потоку закладений в різницевому методі дозволяє застосовувати цей ультразвуковий метод вимірювання витрати для багатоканальних хордових УЗВ. Отже, для високоточного вимірювання витрати потоків газу із спотвореною структурою потоку доцільно застосовувати УЗВ на базі різницевого часоімпульсного методу вимірювання витрати потоку.

Із врахуванням результатів класифікації УЗВ за всіма виділеними ознаками, рекомендовано для забезпечення високої точності вимірювання витрати газу в умовах спотвореної структури потоку застосовувати контактні багатоканальні УЗВ з хордовим розташуванням АК побудовані за принципами різницевого часоімпульсного методу вимірювання витрати.

Зважаючи на необхідність визначення швидкості звуку в природному газі для вимірювання витрати потоку для деяких типів УЗВ (за ефектом Доплера, за ефектом дрейфу та для акустичного низькочастотного методу), для розрахунку сумарної довжини акустичного шляху а також для моделювання УЗВ всіх розглянутих типів, виконано порівняльний аналіз методів розрахунку швидкості звуку в природному газі, зокрема і методів рекомендованих нормативними документами ГОСТ 30319.1-96, ГОСТ 30319.3-96, ISO 20765-1:2005. В результаті вибрано методи для вирішення вказаних завдань із врахуванням набору параметрів складу природного газу та області застосування методів.

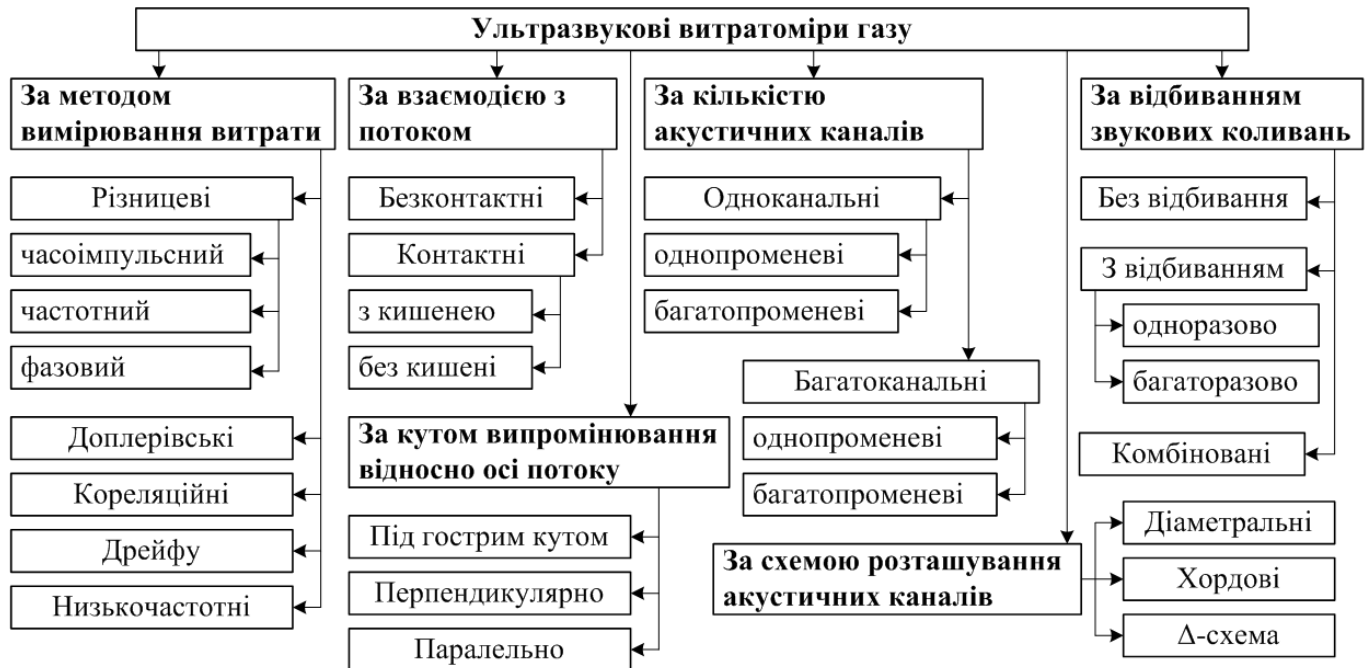


Рисунок 1 – Діаграма класифікації УЗВ газу

Передумовами застосування УЗВ для комерційного обліку природного газу є їх висока точність, надійність, а також наявність нормативного забезпечення. За результатами аналізу нормативної бази УЗВ встановлено, що: на сьогодні в Україні відсутні нормативні документи щодо застосування УЗВ; нормативні документи інших держав не містять необхідних рекомендацій щодо вибору довжин прямолінійних ділянок ВТ та інсталяції УЗВ, що створює передумови для виникнення додаткової похибки УЗВ, зумовленої спотворенням структури потоку.

На основі виконаних в першому розділі досліджень сформульовані мета, задачі та шляхи вирішення проблем, поставлених у дисертаційній роботі.

У другому розділі проаналізовано фактори впливу на метрологічні характеристики УЗВ, діапазони значень додаткових похибок, зумовлених дією цих факторів, та виділено найбільш значимі додаткові похибки: 1) додаткова похибка вимірювання витрати внаслідок зміни геометричних розмірів УЗВ, спричиненої відхиленням робочої температури газу від температури калібрування УЗВ $\delta_{D(\Delta T)}$; 2) додаткова похибка вимірювання витрати внаслідок зміни геометричних розмірів УЗВ, спричиненої відхиленням робочого тиску від тиску калібрування УЗВ $\delta_{D(\Delta p)}$; 3) додаткова похибка вимірювання середньої швидкості, зумовлена спотворенням

структури потоку $\delta_{D(v)}$; 4) додаткова похибка вимірювання витрати внаслідок зміни калібрувального коефіцієнта УЗВ, отриманого на повітрі, під час його застосування для вимірювання витрати іншого газу $\delta_{D(k_{cal})}$.

На основі рівняння об'ємної витрати ультразвукового методу вимірювання, рівняння приведення виміряного значення об'ємної витрати до стандартних умов та сформованого переліку додаткових похибок, отримано удосконалене рівняння відносної похибки системи вимірювання витрати газу на базі УЗВ:

$$\delta_{q_c} = \sqrt{\delta_{K_q}^2 + \delta_p^2 + \delta_T^2 + \delta_K^2 + \delta_{k_{cal}}^2 + 4\delta_D^2 + \delta_v^2 + \delta_{D(\Delta T)}^2 + \delta_{D(\Delta p)}^2 + \delta_{D(v)}^2 + \delta_{D(k_{cal})}^2}, \quad (1)$$

де δ_{K_q} – відносна похибка коректора витрати та об'єму газу; δ_p – відносна похибка визначення абсолютного тиску газу; δ_T – відносна похибка визначення термодинамічної температури газу; δ_K – відносна похибка визначення коефіцієнта стисливості газу; $\delta_{k_{cal}}$ – відносна похибка визначення калібрувального коефіцієнта УЗВ; δ_D – відносна похибка визначення внутрішнього діаметра ВТ або УЗВ; δ_v – відносна похибка визначення швидкості потоку.

Для визначення додаткових похибок $\delta_{D(\Delta T)}$, $\delta_{D(\Delta p)}$ розроблені та унормовані стандартами (зокрема і ISO 17089) аналітичні залежності, які, за умови їх реалізації у алгоритмах обчислювачів УЗВ, дають можливість виконати коректування результатів вимірювання, а, відповідно, і зменшити ці похибки.

Нами досліджено додаткову похибку вимірювання швидкості потоку $\delta_{D(v)}$ одноканальним діаметральним УЗВ, що встановлений після одного з найбільш поширених типів МО «90° коліно», за допомогою CFD-моделювання. Моделювання виконане для чотирьох різних кутів встановлення АК (див. рис.3). За результатами моделювання встановлено, що: 1) значення похибки $\delta_{D(v)}$ залежить як від довжини прямолінійної ділянки ВТ між УЗВ та МО (див. рис.2), так і від кута встановлення АК УЗВ; 2) за умови малої довжини прямолінійної ділянки ВТ між УЗВ та МО (менше 10D) відносна похибка визначення швидкості потоку одноканальним діаметральним УЗВ може досягати за модулем 8 %.

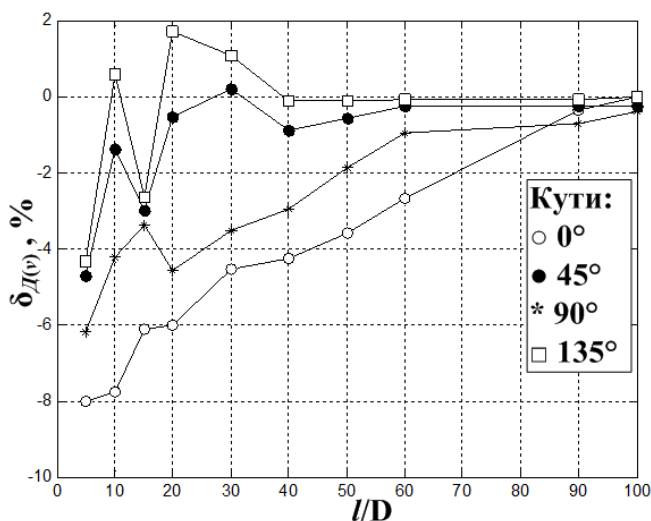


Рисунок 2 – Залежність $\delta_{D(v)}$ від довжини прямолінійної ділянки ВТ між УЗВ та МО

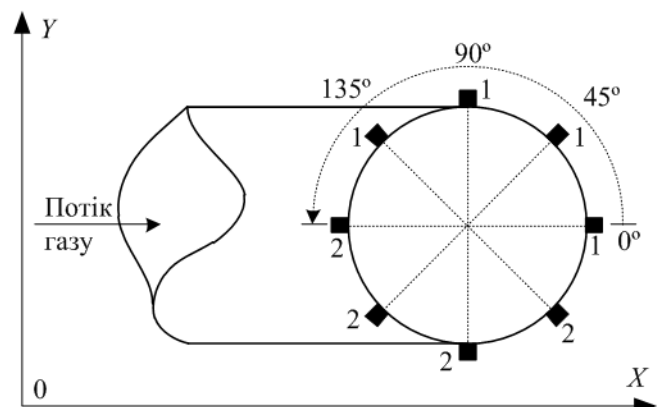


Рисунок 3 – Варіанти інсталяції АК одноканального діаметрального УЗВ:
1, 2 – передавач і приймач звукових коливань за різних кутів встановлення діаметрального АК УЗВ

Додатково виконано аналіз численних експериментальних даних, опублікованих в науково-технічній літературі, та підтверджено, що додаткова похибка $\delta_{D(v)}$ залежить від геометричних характеристик ВТ та МО (типів та розмірів МО, довжин ділянок ВТ), конструкції УЗВ (кількості і типу АК, форми секції УЗВ), а також від газодинамічних характеристик потоку (числа Рейнольдса). Це зумовило складність отримання аналітичних залежностей для визначення похибки $\delta_{D(v)}$ та широкий діапазон її значень. Для різних умов інсталяції УЗВ, різних типів МО ця похибка може перевищувати 8... 10 %. Тому дослідження цієї похибки та розроблення рекомендацій для її зменшення є першочерговим завданням для підвищення точності вимірювання витрати за допомогою УЗВ.

В третьому розділі удосконалено математичні моделі одноканального діаметрального та багатоканального хордового УЗВ та запропоновано методологію уточнення їх параметрів на основі результатів CFD-моделювання та експериментальних досліджень УЗВ.

Математична модель одноканального діаметрального УЗВ представлена нами в наступному вигляді

$$\begin{cases} q_v = \frac{\pi D^2}{4} k_v v_d; \\ k_v = f(\text{Re}), \text{Re}_{\min} \leq \text{Re} \leq \text{Re}_{\max}, \end{cases} \quad (2)$$

де q_v – об'ємна витрата газу в робочих умовах; D – внутрішній діаметр ВТ або корпуса УЗВ; k_v – коректувальний коефіцієнт що враховує відмінність вимірної швидкості потоку вдовж діаметрального АК УЗВ v_d , від середньої по перерізу ВТ швидкості потоку \bar{v} ; Re – число Рейнольдса.

За результатами аналізу науково-технічних праць встановлено, що на сьогодні дослідниками пропонуються два способи визначення залежності $k_v = f(\text{Re})$: експериментально на спеціальних лабораторних установках при наявності зразкових значень витрати (швидкості потоку \bar{v}); за допомогою аналітичних залежностей виведених на основі класичних законів розподілу швидкості потоку в перерізі ВТ.

Перший спосіб трудомісткий та має високу вартість. Другий спосіб також має ряд недоліків: більшість відомих аналітичних залежностей $k_v = f(\text{Re})$ справедливі лише для ВТ із гладкою внутрішньою поверхнею в діапазоні Re від $5 \cdot 10^3$ до $5 \cdot 10^6$ і не враховують наявності ламінарного граничного прошарку біля стінок ВТ; всі відомі аналітичні залежності не враховують вплив поля температур у поперечному перерізі ВТ та конструктивних особливостей АК УЗВ: наявність «кишень», значне занурення електроакустичних перетворювачів (ЕАП) в потік.

Пропонується для визначення залежності $k_v = f(\text{Re})$ використовувати методи тривимірного моделювання та обчислювальної гідро- та аеродинаміки потоків (CAD/CFD-моделювання). Сучасні CAD/CFD програмні пакети дають можливість створити тривимірний макет УЗВ та секції ВТ із збереженням всіх його конструктивних особливостей та геометричних характеристик та отримати розподіл параметрів потоку, зокрема і швидкості, в кожній точці розрахункової сітки по всьому об'єму досліджуваного тривимірного макету. При цьому отриманий розподіл параметрів потоку враховує усі особливості макету та властивості плинного середовища, рух якого моделюють. На основі запропонованих підходів

ґрунтується методологія удосконалення математичної моделі (2), що передбачає визначення загального вигляду залежності $k_v = f(Re)$ та її параметрів на основі результатів CAD/CFD-моделювання конкретної конструкції УЗВ.

На основі запропонованої методології розроблено методику побудови залежності $k_v = f(Re)$ за результатами CFD-моделювання секції ВТ із встановленим УЗВ, яка передбачає реалізацію залежності

$$k_v = \bar{v}/v_d = \frac{2}{R^2} \int_0^R v(r)rdr \Big/ \frac{1}{R} \int_0^R v(r)dr, \quad (3)$$

де $v(r)$ – закон розподілу швидкості потоку; r – координата точки у перерізі ВТ; R – радіус ВТ. Методика реалізується виконанням таких етапів:

1. Визначення середньої по перерізу тривимірного макету УЗВ швидкості \bar{v} .

Так як CFD-моделювання проводиться для потоку із встановленою (незбуреною) структурою, то профіль швидкості потоку, а отже й середня швидкість \bar{v} по довжині УЗВ не змінюється, і може бути визначена за формулою $\bar{v} = \sum_{i=1}^n v(i) / n$,

де $v(i)$ – значення швидкості потоку в i -тій комірці довільного перерізу УЗВ, коли $i = 1 \dots n$, а n – це кількість точок в перерізі.

2. Визначення середньої вздовж АК УЗВ швидкості v_d пропонується виконувати інтегруванням «захоплених» променем швидкостей в розрахункових комірках кожного j -го перерізу вздовж АК (лінія ab на рис.4) за формулою (4)

$$v_d = \sum_{j=1}^{Np} \left(\left(\frac{z(j+1) - z(j)}{\cos \varphi} \right) \cdot \left(\frac{v(j+1) + v(j)}{2} \right) \right) / L, \quad (4)$$

де $z(j)$ – координата розташування j -го перерізу на осі z ; Np – кількість перерізів.

3. Визначення за формулою (3) коректувального коефіцієнта k_v для кожного із значень Re та побудова аналітичної залежності $k_v = f(Re)$.

В результаті застосування розробленої методики отримано залежність коректувального коефіцієнта k_v від Re для одноканального діаметрального УЗВ

$$k_v = -0,8152 \cdot Re^{-0,3591} + 0,9484. \quad (5)$$

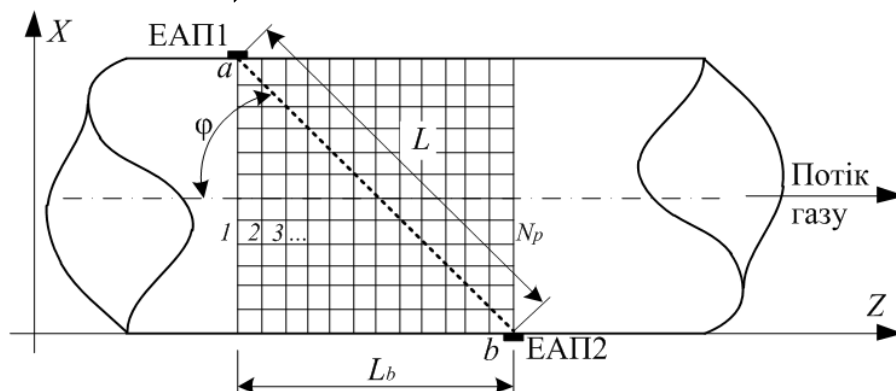


Рисунок 4 – Вимірювальна секція одноканального діаметрального УЗВ: ЕАП1, ЕАП2 – електроакустичні перетворювачі УЗВ

Виконано порівняння значень коефіцієнта $k_{v(5)}$, отриманих за формулою (5), із значеннями $k_{v(H)}$, отриманими за формулою Нікурадзе (див. рис.5), яку широко

застосовують у дослідницькій практиці (зокрема і відомі організації AGA та GERG).

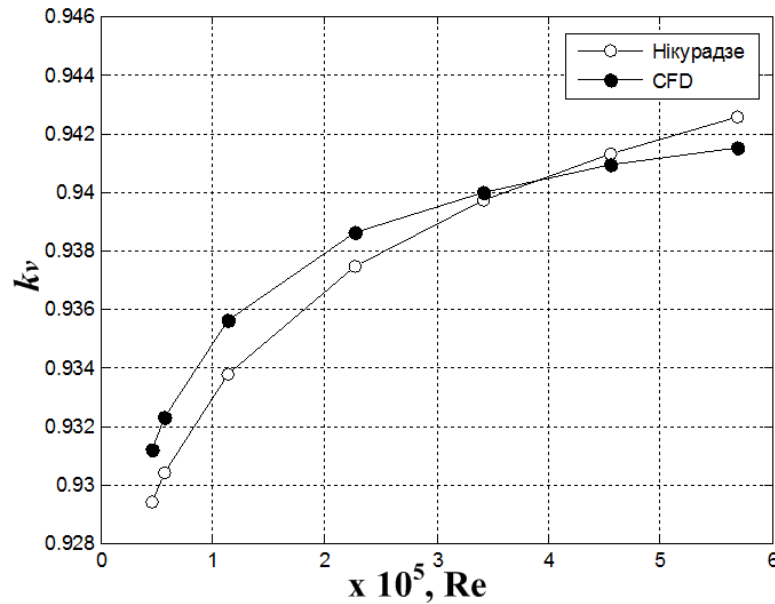


Рисунок 5 – Графіки залежностей $k_v = f(Re)$ одноканального діаметрального УЗВ

За результатами порівняння встановлено, що відносне відхилення $\delta_{k_v} = (k_{v(5)} - k_{v(H)})/k_{v(H)} \cdot 100$ не перевищує $\pm 0,5\%$ в діапазоні Re від $4 \cdot 10^4$ до $6 \cdot 10^5$, який відповідає діапазону швидкості потоку під час застосування окремих моделей УЗВ у промисловості. Отримані результати підтверджують адекватність запропонованої методики та можливість її застосування для визначення залежності $k_v = f(Re)$ для одноканальних діаметральних УЗВ. Однак отримана залежність $k_v = f(Re)$ містить похибку внаслідок неточності відтворенням методами CFD-моделювання ефектів турбулентності потоку та похибки дискретизації розрахункової сітки. Тому, пропонується застосовувати методику для визначення залежності $k_v = f(Re)$ для УЗВ, які застосовують в некомерційних цілях, що не вимагають високої точності вимірювання. Для комерційних цілей розроблена методика може бути використана як допоміжний інструмент поряд із експериментальним визначенням $k_v = f(Re)$.

Рівняння об'ємної витрати за робочих умов для багатоканального УЗВ із хордовим розташуванням АК має наступний вигляд

$$q_v = \frac{\pi D^2}{4} \sum_{i=1}^N \left(\frac{2\sqrt{R^2 - x(i)^2}}{\pi R} w(i) v_h(i) \right), \quad (6)$$

де $x(i)$, $w(i)$ – координата розташування та ваговий коефіцієнт i -го хордового АК; $v_h(i)$ – виміряна швидкість потоку вздовж i -го АК; N – кількість хордових АК.

Для реалізації рівняння (6) необхідно визначити координати розташування $x(i)$ та значення вагових коефіцієнтів $w(i)$ для кожного хордового АК.

Нами удосконалено метод визначення координат розташування та вагових коефіцієнтів АК УЗВ. В основу методу покладено числовий метод інтегрування (ЧМІ) Гауса-Якобі, формула якого має вигляд

$$\int_{-1}^{+1} W(x) \cdot f(x) dx = \int_{-1}^{+1} (1-x)^\alpha (1+x)^\beta \cdot f(x) dx = \sum_{j=1}^N w_j f(x_j), \quad (7)$$

де x – абсциса ЧМІ, що відповідає координаті розташування АК (див. рис.7); w – вага функції ЧМІ, що відповідає ваговому коефіцієнту АК; $W(x)$ – вагова функція ЧМІ; α, β – коефіцієнти вагової функції ЧМІ, зазвичай рівні 0,5.

ЧМІ Гауса-Якобі дає можливість отримати наближений розв’язок визначеного інтегралу на проміжку інтегрування $x \in [-1; 1]$ для функції $f(x)$. У якості функції $f(x)$ розглянуто розподіл швидкості потоку в перерізі ВТ, для якого відомі тільки декілька швидкостей, вимірених у точках розташування АК.

Розглядаючи симетричний незбурений профіль швидкості потоку під час усталеного режиму руху потоку запропоновано застосувати вагову функцію у вигляді $W(x) = (1-x^2)^k$, де $\alpha = \beta = k$. Зміна значення k ($k > 0$), дає можливість наблизити форму кривої $W(x)$, до вигляду кривої розподілу швидкості потоку у ВТ (див. рис.6) та отримати значення x та w , які забезпечать точне інтегрування профілю швидкості.

За результатами аналізу відомих законів розподілу швидкості, для модифікації функції $W(x)$ прийнято степеневий закон розподілу швидкості турбулентного потоку, який добре узгоджується із результатами експериментальних досліджень:

$$\frac{v(r)}{v_{\max}} = \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/n_t}, \quad (8)$$

де n_t – коефіцієнт Нікурадзе, що характеризує ступінь турбулентності потоку, тобто коефіцієнт n_t є функцією числа Рейнольдса.

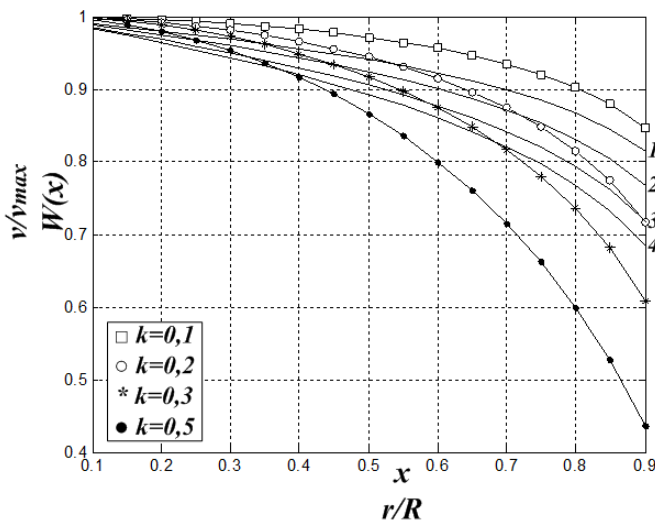


Рисунок 6 – Порівняння кривих вагової функції ЧМІ Гауса-Якобі та степеневого закону розподілу швидкості: 1 – $Re=10^7$; 2 – $Re=10^6$; 3 – $Re=10^5$; 4 – $Re=10^4$

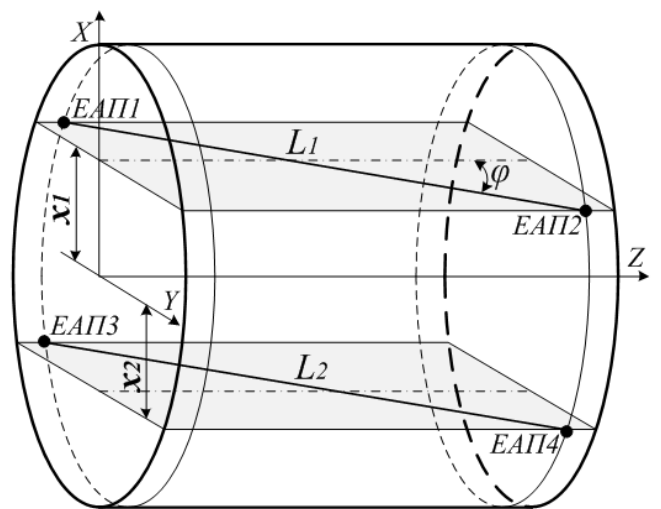


Рисунок 7 – Схема розташування АК двоканального хордового УЗВ

Запропоновано модифікувати вагову функцію ЧМІ Гауса-Якобі на основі порівняння її із степеневим законом розподілу швидкості турбулентного потоку (8) (нормованим за швидкістю v_{\max} та R).

За результатами аналізу технічних характеристик УЗВ встановлено, що переважну більшість УЗВ застосовують для вимірювань у промисловості в умовах

турбулентного режиму руху потоку ($Re \geq 10^4$). Для прикладу, діапазон вимірювання витрати УЗВ газу ГУВР-011 відповідає діапазону зміни Re від 10^4 до 10^7 .

Для ряду значень k виконано оцінку середнього квадратичного відхилення (СКВ) значень вагової функції та значень розподілу швидкості потоку (8) при різних Re із діапазону від 10^4 до 10^7 . Встановлено, що мінімум СКВ відповідає значенню $k = 0,2$ (див. рис.6) для діапазону Re від 10^4 до 10^7 та діапазону абсцис від 0,1 до 0,9.

Такими чином, запропоновано удосконалений метод визначення координат розташування АК багатоканальних хордових УЗВ та їх вагових коефіцієнтів, який передбачає застосування уточненої вагової функції $W(x) = (1 - x^2)^{0,2}$, що забезпечує підвищення точності інтегрування профілю швидкості потоку за декількома вимірними значеннями швидкості по хордових каналах УЗВ для діапазону Re від 10^4 до 10^7 . Рівняння удосконаленого методу мають вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} w(i) = \frac{1}{(1 - x(i)^2)^k} \int_{-R}^{+R} PL[x(i)](1 - x^2)^k dx; \\ PL[x(i)] = \prod_{\substack{l=0 \\ l \neq i}}^N \frac{x - x(l)}{x(i) - x(l)}; \quad i = 1, 2, \dots, N; \\ PJ = f(N, k); \quad k = 0, 2; \quad x(i) = roots(PJ), \end{array} \right. \quad (9)$$

де PL – поліном Лагранжа; PJ – поліном Якобі.

У роботі отримано аналітичні вирази поліномів Лагранжа та Якобі для різних N і застосовано удосконалений метод для обчислення координат розташування та вагових коефіцієнтів АК для 2, 3, 4, 5 та 6-ти канальних УЗВ (див. табл.1). Отримані значення пропонуються для застосування під час проектування УЗВ.

Таблиця 1

Координати розташування АК та їх вагові коефіцієнти для різної кількості АК

N	x	w	N	x	w	
2	$\pm 0,54232$	0,96012	5	$\pm 0,88956$	0,24842	
				$\pm 0,52202$	0,46807	
3	$\pm 0,74535$	0,55757		0	0,54940	
	0	0,84284		$\pm 0,94019$	0,14568	
4	$\pm 0,83916$	0,35850		6	$\pm 0,68847$	0,35590
	$\pm 0,32651$	0,62854			$\pm 0,25339$	0,49434

Перевірку адекватності удосконаленого методу (9) виконано шляхом порівняння значень витрати, отриманих за рівнянням (6), для якого значення вагових коефіцієнтів обчислені із застосуванням (9), із значеннями витрати, обчисленими на основі інтегрування всього профілю швидкості, отриманого за функціями Salami. Функції Salami є аналітичними виразами, які з високою точністю відтворюють профіль швидкості потоку після типових МО, що дає змогу застосувати їх для перевірки моделей швидкісних витратомірів. Також виконано порівняння значень витрати, отриманих згідно (6), за умови, що значення координат

розташування АК та їх вагових коефіцієнтів обчислені за класичним ЧМІ Гауса-Якобі та за удосконаленим методом (9). Відносна похибка обчислена за формулою

$$\delta_q = 100 \cdot (q_v - q_{v.salami}) / q_{v.salami}, \quad (10)$$

де q_v – витрата, обчислена за рівнянням (6) із застосуванням $x(i)$, $w(i)$ отриманих за класичним ЧМІ Гауса-Якобі, або за удосконаленим методом (9); $q_{v.salami}$ – витрата обчислена інтегруванням всього профілю швидкості Salami.

Функції швидкості Salami розроблені для потоків у ВТ із круглим перерізом, що передбачає застосування полярної системи координат $v = f(r_s, \theta_s)$, де r_s – радіус довільної точки потоку, а θ_s – кут нахилу радіуса r_s . Тому обчислення витрати $q_{v.salami}$ доцільно виконати таким чином:

$$q_{v.salami} = \int_0^{2\pi} \int_0^1 v(r_s, \theta_s) r_s dr_s d\theta_s. \quad (11)$$

Для застосування рівняння (6) необхідно визначити швидкість потоку v_h вздовж кожного хордового АК. Пропонується визначити швидкість v_h за допомогою виділення лінії АК на профілю Salami (див. рис.8,а) та застосування для обчислення швидкості потоку v_h відомого рівняння

$$v_h(x, \theta) = \frac{1}{2\sqrt{R^2 - x^2}} \left[\int_0^{\sqrt{R^2 - x^2}} v\left(\sqrt{x^2 + L^2}, \theta + \arctg \frac{L}{x}\right) dL + \dots \right. \\ \left. + \int_0^{\sqrt{R^2 - x^2}} v\left(\sqrt{x^2 + L^2}, \theta - \arctg \frac{L}{x}\right) dL \right], \quad (12)$$

де $x = (0 \dots 1)R$ – координат розташування АК; θ – кут інтегрування (рис.8,а).

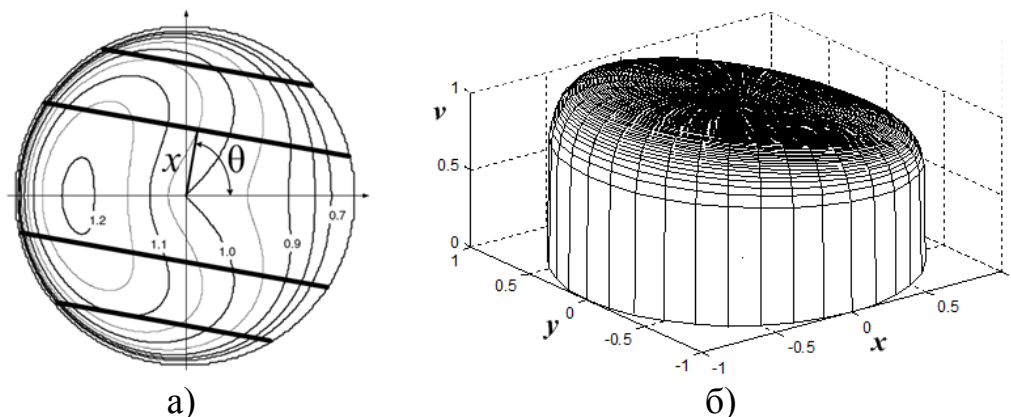


Рисунок 8 – Функція швидкості Salami P09: а) ізотакси швидкості та розташування АК 4-канального УЗВ; б) профіль швидкості в тривимірних координатах

На рис.8 представлено приклад побудови профілю швидкості потоку після МО «90° коліно» за функцію швидкості Salami P09 (див. рис.8,б), на основі якого виконана перевірка удосконаленого методу.

За результатами визначення відхилення δ_q відносно функції швидкості Salami P09 встановлено (див. рис.9), що застосування удосконаленого методу визначення $x(i)$, $w(i)$ зменшує похибку вимірювання витрати 4-канального хордового УЗВ

порівняно із класичним методом визначення $x(i)$, $w(i)$ ($k = 0,5$) на 0,25 %.

Отже, застосування удосконаленого методу (9) визначення координат розташування АК і їх вагових коефіцієнтів для проектування багатоканальних УЗВ дає можливість підвищити точність інтегрування профілю швидкості потоку в умовах спотворень його структури, а, відповідно, і точність вимірювання витрати багатоканальними УЗВ.

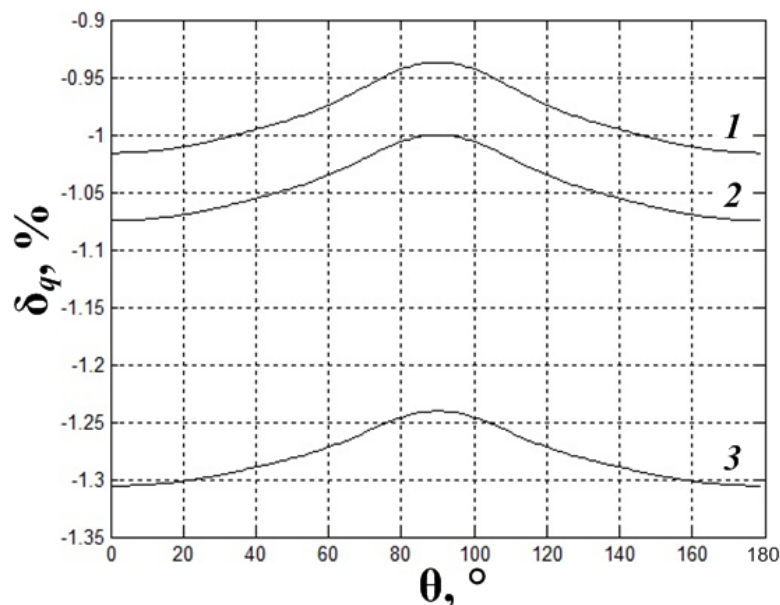


Рисунок 9 – Залежність похибки δ_q 4 каналного УЗВ від кута інтегрування для функції Salami P09: 1 – удосконалений метод; 2 – метод на основі ЧМІ із $k = 0,3$; 3 – метод на основі класичного ЧМІ Гауса-Якобі ($k = 0,5$)

Математична модель УЗВ, отримана на основі рівняння витрати (6) та рівнянь методу (9), може бути застосована для моделювання реальних конструкцій багатоканальних УЗВ в поєднанні з CFD-методами моделювання, які дають можливість визначити швидкість потоку по кожному АК. Однак при такому способі застосування цієї моделі можуть виникати суттєві похибки моделювання внаслідок таких причин:

1) неточностей відтворення геометричних характеристик багатоканальних УЗВ та ВТ САД-засобами, внаслідок складності конструкції таких УЗВ та у випадках, коли деяка інформація про ці характеристики УЗВ відсутня, або неправильно визначена (розміри ЕАП); розміри «кишень» АК, в яких розміщено ЕАП і розміри їх захисних покриттів; повна довжина АК);

2) неточності відтворення методами CFD-моделювання ефектів турбулентності потоку та похибки дискретизації розрахункової сітки.

З метою усунення вказаних недоліків моделювання УЗВ нами запропоновано виконувати удосконалення математичної моделі за допомогою введення в неї залежності калібрувального коефіцієнта від числа Рейнольдса $k_{cal} = f(Re)$. Значення k_{cal} для фіксованого Re пропонуємо визначати на основі еталонних значень витрати та параметрів потоку, отриманих експериментальним шляхом, за формулою

$$k_{cal} = q_{c.et} / q_c, \quad (13)$$

де $q_{c.et}$ – еталонне значення об'ємної витрати газу за стандартних умов; q_c – значення

об'ємної витрати, отримане за моделлю (9) на основі результатів CFD-моделювання та зведене до стандартних умов. Для зведення витрати q_v до стандартних умов застосовано відому залежність $q_c = q_v p T_c / (p_c T K)$, де p та T – значення тиску та термодинамічної температури за робочих умов, K – коефіцієнт стисливості газу. Визначення залежності $k_{cal} = f(Re)$ слід виконувати для умов відсутності спотворень структури потоку.

Отже, запропоновано методологію удосконалення математичної моделі УЗВ, що полягає у визначенні на основі результатів CFD-моделювання та наявних еталонних даних про вимірювану витрату залежності $k_{cal} = f(Re)$ та введення цієї залежності у математичну модель. Застосовуючи запропоновану методологію та рівняння удосконаленого методу визначення вагових коефіцієнтів АК отримано математичну модель багатоканального УЗВ у вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} q_v = k_{cal} \frac{\pi D^2}{4} \sum_{i=1}^N \frac{2\sqrt{R^2 - x(i)^2}}{\pi R} w(i) v_h(i); \\ k_{cal} = f(Re), \quad Re_{\min} \leq Re \leq Re_{\max}; \\ w(i) = \frac{1}{(1 - x(i)^2)^k} \int_{-R}^{+R} PL[x(i)] (1 - x^2)^k dx; \\ PL[x(i)] = \prod_{\substack{l=0 \\ l \neq i}}^N \frac{x - x(l)}{x(i) - x(l)}; \quad i = 1, 2, \dots, N; \\ PJ = f(N, k); \quad k = 0, 2; \quad x = \text{roots}(PJ). \end{array} \right. \quad (14)$$

Математична модель (14), застосована у комплексі з CAD/CFD-засобами моделювання, дає можливість дослідити вплив окремих конструктивних характеристик УЗВ на вимірюване значення витрати під час їх проектування, а також дослідити вплив спотворень структури потоку на значення витрати, вимірюване за допомогою діючого УЗВ, залежність $k_{cal} = f(Re)$ для якого отримана за результатами експериментальних досліджень в умовах незбуреного потоку.

В четвертому розділі на основі запропонованої методології удосконалення математичної моделі УЗВ розроблено методику дослідження багатоканальних УЗВ в умовах потоків зі спотвореною структурою. Методика передбачає виконання такої послідовності операцій:

1. Визначення конструктивних характеристик УЗВ із застосуванням удосконаленого методу визначення координат розташування АК та їх вагових коефіцієнтів та на основі даних виробника УЗВ.

2. Визначення параметрів вимірюваного середовища на основі результатів експериментальних досліджень УЗВ.

3. Розроблення залежності $k_{cal} = f(Re)$ моделі УЗВ від числа Рейнольдса:

3.1. Визначення характеристик ВТ.

3.2. Створення твердотілої моделі ВТ та УЗВ.

3.3. Моделювання розподілу параметрів потоку в секції УЗВ за допомогою CAD/CFD програмного пакету.

3.4. Побудова $k_{cal} = f(Re)$ за умов відсутності спотворень структури потоку.

4. Дослідження похибки УЗВ в умовах потоків із спотвореною структурою: створюють макет ділянки ВТ із встановленим МО, відтворюють просторове розташування МО та довжини прямолінійних ділянок, що відповідають умовам експлуатації (див. рис.10). Досліджують вплив розташування МО на похибку УЗВ, почергово змінюючи значення довжини прямолінійної ділянки ВТ до МО.

Адекватність методики перевірено порівнянням результатів моделювання із результатами експериментальних досліджень, виконаних для УЗВ газу ГУВР-011 на перевірювальній установці ПрАТ «Енергооблік». Дослідження виконано за умови встановлення УЗВ на прямолінійній ділянці ВТ, довжина якої забезпечує формування неспотвореної структури потоку, а також за умови встановлення УЗВ після типових МО: «90° коліно» та «два 90° коліна в перпендикулярних площинах ($l < 5D$)» (рис.10).

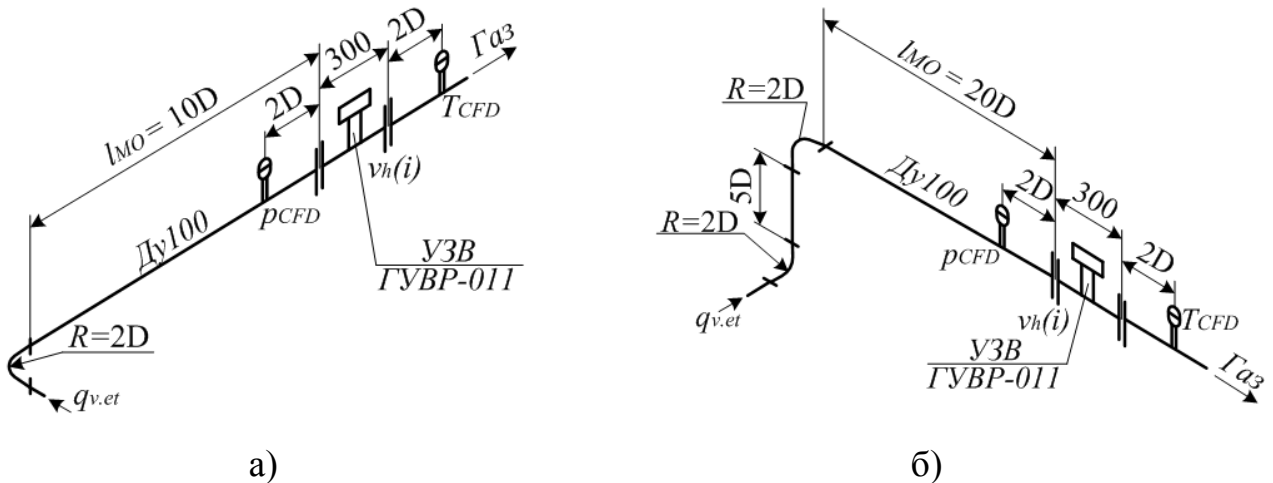


Рисунок 10 – Аксонометричні схеми макетів ВТ із встановленим МО:
а) «90° коліно»; б) «два 90° коліна в перпендикулярних площинах ($l < 5D$)»

На основі результатів експериментальних досліджень УЗВ, встановленого на прямолінійній ділянці ВТ, та результатів CFD-моделювання отримано за формулою (13) вектор значень коефіцієнта k_{cal} та розроблено аналітичну залежність $k_{cal} = f(Re)$. Отримана аналітична залежність може бути застосована для моделювання УЗВ ГУВР-011 у діапазоні чисел Рейнольдса від $1 \cdot 10^3$ до $1,5 \cdot 10^5$.

Застосувавши значення конструктивних характеристик УЗВ серії ГУВР-011 та аналітичний вираз залежності $k_{cal} = f(Re)$, із (14) отримано математичну модель двоканального хордового УЗВ серії ГУВР-011

$$\begin{cases} q_v = k_{cal} \left[\frac{\pi D^2}{4} \frac{2\sqrt{R^2 - (0,5807R)^2}}{\pi R} \frac{1}{2} (v_{h1} + v_{h2}) \right]; & Re = \frac{4q_{v.et} \rho_{et}}{\pi \mu D}, \\ k_{cal} = \begin{cases} 38,79 Re^{-0,7837} + 1,01; & \text{для } Re = 1 \cdot 10^3 \div 5 \cdot 10^3; \\ -1,148 \cdot 10^{-10} Re^2 + 2,675 \cdot 10^{-6} Re + 1,049; & \text{для } Re = 5 \cdot 10^3 \div 1,5 \cdot 10^4; \\ -3,567 \cdot 10^{-8} Re + 1,063; & \text{для } Re = 1,5 \cdot 10^4 \div 1,5 \cdot 10^5, \end{cases} \end{cases} \quad (15)$$

де v_{h1} , v_{h2} – швидкості потоку визначені вздовж 1-го і 2-го хордового АК УЗВ ГУВР-011 за результатами CFD-моделювання.

Модель (15) застосовано для обчислення результату вимірювання витрати за допомогою УЗВ ГУВР-011А2.2/ВС, що встановлений після МО «90° коліно» та МО «два 90° коліна в перпендикулярних площинах ($l < 5D$)». При цьому значення витрати $q_{v.et}$ були прийняті рівними експериментальним значенням витрати, що отримані за показами еталонного лічильника газу на перевірювальній установці.

Обчислено відносне відхилення δ_M значень витрати, отриманих за моделлю (15), від значень витрати, отриманих експериментально за показами УЗВ ГУВР-011. Для обчислення відхилення δ_M значення витрат зведені до стандартних умов. Залежності δ_M від витрати, отримані під час моделювання ВТ із двома вказаними вище варіантами встановлення МО, наведені на рис.11.

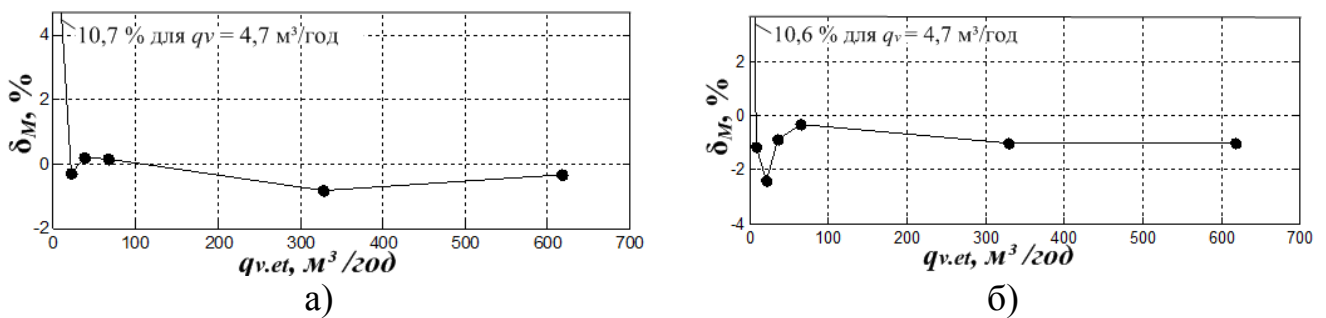


Рисунок 11 – Залежність відносного відхилення δ_M від витрати газу:
а) МО «90° коліно», $l_{MO} = 10D$; б) МО «два 90° коліна в перпендикулярних площинах ($l < 5D$)», $l_{MO} = 20D$

Як видно із рис.11, результати моделювання добре узгоджуються із результатами експериментальних досліджень у діапазоні витрати від $0,05q_{max}$ до q_{max} . Для випадку моделювання УЗВ встановленого після МО «90° коліно» максимальне значення δ_M складає 0,86 %, а для встановлення УЗВ після МО «два 90° коліна в перпендикулярних площинах ($l < 5D$)» значення δ_M для вказаного діапазону зміни витрати не перевищує 1,04 %. Це свідчить про адекватність запропонованої методики і можливість її застосування для дослідження впливу спотворень потоку на похибку вимірювання витрати за допомогою УЗВ.

Розроблену методику застосовано для дослідження додаткової похибки УЗВ, зумовленої спотворенням структури потоку після типових МО, в залежності від довжини прямолінійної ділянки між МО та УЗВ для УЗВ таких конструкцій:

1) двоканальні хордові УЗВ із кутом розташування АК в діапазоні $\varphi = 45^\circ \dots 67^\circ$; обчислення координат розташування АК та їх вагових коефіцієнтів виконане за удосконаленим в роботі методом;

2) УЗВ газу ГУВР-011А2.2/ВС із двома хордовими АК.

Додаткову похибку вимірювання витрати досліджуваним УЗВ, що виникає внаслідок спотворень структури потоку, визначено за формулою

$$\delta_{D(v)} = 100 \cdot (q_c - q_{c.et}) / q_{c.et} \quad (16)$$

де $q_c = q_v p_{CFD} T_c / (p_c T_{CFD} K)$ – витрата газу за стандартних умов, отримана за результатами моделювання УЗВ ГУВР-011; p_{CFD} , T_{CFD} – значення тиску та

термодинамічної температури за робочих умов отримані з результатів CFD-моделювання (рис.10); K – коефіцієнт стисливості газу; $q_{c.et}$ – еталонне значення витрати за стандартних умов.

За результатами моделювання визначено мінімальні необхідні довжини l_{min} прямолінійних ділянок між МО та УЗВ (див. табл.2) за такими критеріями:

1) l_{min} рівне довжині, за якої похибка вимірювання витрати УЗВ знаходиться в межах границь основної похибки, визначених виробником;

2) l_{min} рівне довжині, за якої збільшення її значення на $10D$ не призводить до зміни похибки більш ніж на $0,3\%$. В кожному випадку вибиралось більше значення довжини визначене за двома вказаними критеріями.

Таблиця 2

Мінімальна довжина прямолінійних ділянок ВТ перед УЗВ без ППП

№	Тип МО	$l_{min} \geq l/D$		
		2-канальні УЗВ ($\varphi=45^\circ \dots 67^\circ$)	ГУВР-011 ($\varphi=67^\circ$)	УЗВ* ($\varphi=67^\circ$)
1	90° коліно	50	30	30
2	Два коліна в різних площинах ($l \leq 5D$)	40	40	30
3	Заглушений трійник що змінює напрям потоку	50	50	40
4	Два коліна 90° в одній площині U-конфігурація ($l \leq 10D$)	50	50	40
5	Два коліна 90° в одній площині S-конфігурація ($l \leq 10D$)	60	60	50
6	Дифузор (80/100)D	20	20	20
7	Конфузор (130/100)D	40	20	20

* УЗВ координати розташування та вагові коефіцієнти якого визначені за вдосконаленим методом

Таким чином додатково підтверджено, що застосування удосконаленого методу визначення координат розташування та вагових коефіцієнтів АК УЗВ дає змогу підвищити точність вимірювання в умовах потоків із спотвореною структурою.

Отримані результати досліджень щодо вибору мінімальних довжин прямолінійних ділянок (табл.2) дають можливість удосконалити нормативні та методичні документи щодо вимірювання витрати газу за допомогою УЗВ.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено науково-практичне завдання підвищення точності вимірювання витрати газу за допомогою ультразвукових витратомірів шляхом зменшення додаткової складової похибки вимірювання витрати, зумовленої спотворенням структури потоку та розроблення вимог щодо застосування УЗВ. Основні результати й висновки дисертаційної роботи полягають в наступному:

1. За результатами аналізу існуючих ультразвукових методів та витратомірів газу уточнено класифікацію УЗВ газу за методом вимірювання витрати, за способом взаємодії з потоком, за кількістю АК, за кутом нахилу АК відносно осі потоку, за відбиванням звукових коливань, за схемою розташування АК, що дало можливість сформулювати вимоги до вибору витратомірів для вимірювання витрати в умовах спотворень структури потоків.

2. За результатами аналізу сучасних методів розрахунку швидкості звуку в природному газі та їх тестування відносно високоточних експериментальних даних розроблено рекомендації щодо застосування цих методів в системах вимірювання витрати природного газу на базі УЗВ, а також для моделювання таких систем.

3. За результатами аналізу факторів впливу на метрологічні характеристики УЗВ та оцінки діапазонів значень основних та додаткових похибок удосконалено рівняння відносної похибки системи вимірювання витрати газу на базі УЗВ, яке, на відміну від існуючих, дозволяє врахувати додаткові складові похибки вимірювання витрати, що виникають в умовах експлуатації УЗВ. Це дає можливість визначити характеристики точності УЗВ в певних областях їх застосування, зокрема в умовах вимірювання витрати потоків із спотвореною структурою.

4. Розроблено методику визначення залежності коректувального коефіцієнта від числа Рейнольдса для УЗВ із діаметральним АК, що дає змогу розробити витратоміри для задач, які не потребують високої точності вимірювання витрати, без застосування високоякісної процедури калібрування таких УЗВ. Отримано аналітичну залежність коректувального коефіцієнта від числа Рейнольдса для таких УЗВ для діапазону Re від $4 \cdot 10^4$ до $6 \cdot 10^5$, що забезпечує обчислення коректувального коефіцієнта із відхиленням не більше $\pm 0,5$ % відносно залежності Нікурадзе.

5. Удосконалено метод визначення координат розташування АК УЗВ та їх вагових коефіцієнтів шляхом уточнення вагової функції числового методу інтегрування Гауса-Якобі, що дозволило підвищити точність інтегрування профілю швидкості потоку, зокрема і в умовах спотворень його структури. Удосконалений метод застосовано для визначення координат розташування і вагових коефіцієнтів АК хордових УЗВ із кількістю каналів від 2 до 6 при проектуванні витратомірів, зокрема в ПрАТ «Енергооблік» (м. Харків).

6. Запропоновано методологію удосконалення математичної моделі УЗВ на основі порівняння результатів CFD-моделювання та наявних еталонних даних про вимірювану витрату, що дозволяє усунути складові похибки моделі внаслідок неточності відтворення конструкції витратоміра та неточності відтворення газодинамічних властивостей потоку.

7. Реалізуючи запропоновану методологію на основі результатів експериментальних досліджень двоканального УЗВ газу (ГУВР-011) удосконалено його математичну модель, що дозволило застосувати її для дослідження похибки цього витратоміра в умовах спотворень структури потоку, які виникають під час інсталяції.

8. Розроблено методику дослідження похибки УЗВ в умовах потоків зі спотвореною структурою, що передбачає застосування удосконаленої математичної моделі УЗВ та дає змогу виконати дослідження УЗВ як на етапі проектування витратомірів, так і для діючих моделей. Методика впроваджена в ПрАТ

«Енергооблік» (м. Харків).

9. За розробленою методикою виконано дослідження додаткової похибки двоканальних УЗВ, зумовленої спотворенням структури потоку, та сформовано рекомендації щодо вибору мінімальних довжин прямолінійних ділянок ВТ після типових МО. Застосування розроблених рекомендацій забезпечує зменшення вказаної складової похибки під час інсталяції таких витратомірів та є базою для вдосконалення нормативних документів щодо вимірювання витрати УЗВ.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Роман В. І. Визначення вагових коефіцієнтів акустичних каналів ультразвукових витратомірів [Текст] / В. І. Роман, Ф. Д. Матіко // Метрологія та прилади : Науково-виробничий журнал. – 2014. – Вип.3. – С. 11–20. *(журнал входить до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus)*.

2. Пістун Є. П. Дослідження похибки ультразвукових витратомірів за умов спотвореної структури потоку на основі CFD-моделювання [Текст] / Є. П. Пістун, Ф. Д. Матіко, В. І. Роман, А. А. Стеценко // Метрологія та прилади : Науково-виробничий журнал. – 2014. – Вип.4. – С. 13–23. *(журнал входить до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus)*.

3. Роман В. І. Підвищення точності багатоканальних ультразвукових витратомірів шляхом удосконалення методу інтегрування витрати [Текст] / В. І. Роман // Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація : Вісник НУ«ЛП». – 2014. – №792. – С. 57–64.

4. Матіко Ф. Д. Визначення калібрувального коефіцієнта ультразвукових перетворювачів витрати із діаметральним акустичним каналом [Текст] / Ф. Матіко, В. Роман // Методи та прилади контролю якості. – 2013. – №2(31). – С. 59–66.

5. Роман В. І. Дослідження похибки вимірювання швидкості потоку за допомогою ультразвукового перетворювача із діаметральним акустичним каналом [Текст] / В. І. Роман, Ф. Д. Матіко // Вимірювальна техніка та метрологія: Міжвідомчий науково-технічний збірник. – 2013. – Вип.74. – С. 58–64.

6. Матіко Ф. Д. Порівняльний аналіз методів визначення швидкості звуку [Текст] / Ф. Д. Матіко, В. І. Роман, Р. М. Федоришин // Вимірювальна техніка та метрологія: Міжвідомчий науково-технічний збірник. – 2012. – Вип.73. – С.56–62.

7. Роман В. І. Аналіз ультразвукових методів та засобів вимірювання витрати газових потоків [Текст] / В. І. Роман // Вісник Інженерної Академії України. – 2012. – Вип.3-4. – С. 270–276.

8. Роман В. І. Уточнення вагових коефіцієнтів акустичних каналів ультразвукових витратомірів [Текст] / В. І. Роман, Ф. Д. Матіко // Збірник тез доповідей XIII Міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування: стан і перспективи», НТУУ«КПІ», 23-24 квітня 2014 р. – Київ, 2013. – С. 216–217.

9. Роман В. І. Методи визначення швидкості звуку в природному газі для вимірювання його витрати [Текст] / В. І. Роман, Ф. Д. Матіко, Р. М. Федоришин // Матеріали XIX Міжнародної конференції з автоматичного управління «Автоматика / Automatics–2012», НУХТ, 26-28 вересня 2012 р. – Київ, 2012. – С. 436–437.

10. Роман В. І. Вплив гідродинамічних збурень на точність вимірювання швидкості потоку ультразвуковими витратомірами газу [Електронний ресурс] / В. І. Роман, Ф. Д. Матіко // Матеріали VI Міжнародної конференції молодих вчених «Енергетика та системи керування / ERECS–2013», НУ«ЛП», 21-23 листопада 2013 р. – Львів, 2013. – С. 54–57.

11. Роман В. І. Ультразвукові методи та засоби вимірювання витрати газових потоків із спотвореною структурою [Текст] / В. І. Роман, Ф. Д. Матіко // Збірник тез доповідей IV Науково-практичної конференції «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання», ІФНТУНГ, 26-27 листопада 2013 р. – Івано-Франківськ, 2013. – С. 154–155.

12. Роман В. І. Моделювання ультразвукових перетворювачів витрати із діаметральним акустичним каналом [Електронний ресурс] / В. І. Роман, Ф. Д. Матіко // Матеріали науково-практичної інтернет-конференції молодих учених та студентів «Актуальні проблеми автоматизації та управління», ЛНТУ, 18 березня 2014 р. Луцьк, 2014. Вип.1. – С. 238–244.

13. Роман В. І. CFD-моделювання впливу спотворень структури потоку на похибку ультразвукових витратомірів [Текст] / В. І. Роман, Ф. Д. Матіко // Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції «ІМТ-2014 Інформаційні та моделюючі технології (сучасний стан та шляхи розвитку інформаційних технологій та технологій моделювання програмних та інформаційних систем)», ЧНУ ім. Б.Хмельницького, 29-31 травня 2014 р. – Черкаси, 2014. – С. 46.

АНОТАЦІЯ

Роман В.І. Підвищення точності ультразвукових витратомірів в умовах спотворень структури потоку. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.01 – прилади та методи вимірювання механічних величин. – Національний університет «Львівська політехніка» МОН України, Львів, 2015 р.

У дисертаційній роботі розв’язано важливу науково-прикладну задачу – підвищення точності вимірювання витрати за допомогою ультразвукових витратомірів шляхом зменшення додаткової похибки зумовленої спотворенням структури потоку. Уточнено класифікацію та вимоги до вибору ультразвукових витратомірів газу для їх застосування в умовах спотворень структури потоку. Удосконалено рівняння відносної похибки системи вимірювання витрати газу на базі УЗВ, що дозволило врахувати додаткові складові похибки вимірювання витрати. Удосконалено метод визначення координат розташування акустичних каналів УЗВ та їх вагових коефіцієнтів, що дозволило підвищити точність інтегрування профілю швидкості потоку, зокрема, і в умовах спотворень його структури. Запропоновано методологію удосконалення математичної моделі УЗВ на основі результатів CFD-моделювання та наявних еталонних даних про вимірювану витрату, на основі якої удосконалено математичну модель багатоканальних УЗВ та розроблено методику дослідження похибки УЗВ в умовах потоків зі спотвореною структурою. Методика впроваджена в ПрАТ «Енергооблік» (м. Харків), застосована

для дослідження додаткової похибки двоканальних УЗВ, зумовленої спотворенням структури потоку, для розроблення рекомендацій щодо усунення цієї похибки та удосконалення нормативних документів з вимірювання витрати за допомогою УЗВ.

Ключові слова: ультразвукові витратоміри, структура потоку, додаткова похибка, математична модель, CFD-моделювання, методика дослідження.

АННОТАЦІЯ

Роман В.И. Повышение точности ультразвуковых расходомеров в условиях искажений структуры потока. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.01 – приборы и методы измерения механических величин. – Национальный университет «Львовская политехника» МОН Украины, Львов, 2015.

В диссертационной работе решена важная научно-прикладная задача – повышение точности измерения расхода с помощью ультразвуковых расходомеров газа путем устранения дополнительной составляющей погрешности измерения расхода обусловленной искажением структуры потока. Уточнено классификацию ультразвуковых расходомеров газа и сформулированы требования к выбору ультразвуковых расходомеров для измерения расхода в условиях искажений структуры потока. Для повышения точности измерения расхода в условиях искажения структуры потока рекомендуется использовать многоканальный хордовый ультразвуковой расходомер по разностному времяимпульсному методу измерения расхода с врезным способом установки электроакустических преобразователей. Проведен анализ современных методов расчета скорости газа в природном газе и их тестирование относительно высокоточных экспериментальных данных. Разработаны рекомендации по применению этих методов в системах измерения расхода газа на базе ультразвуковых расходомеров, а также для моделирования таких систем. Используя анализ факторов влияния на метрологические характеристики ультразвуковых расходомеров, проведено оценку диапазонов значений их основных и дополнительных погрешностей. Это дает возможность уточнить характеристики точности ультразвуковых расходомеров в определенных областях их применения, в частности в условиях измерения расхода потоков с искаженной структурой. Усовершенствовано уравнение относительной погрешности системы измерения расхода на базе ультразвукового расходомера газа, которое, в отличие от существующих, позволяет учесть дополнительные составляющие погрешности измерения расхода, возникающих в условиях эксплуатации ультразвуковых расходомеров.

За результатами CFD-моделирования разработана методика определения зависимости корректирующего коэффициента от числа Рейнольдса для диаметральных ультразвуковых расходомеров, что позволяет разработать расходомеры для задач, не требующих высокой точности измерения расхода, без применения дорогостоящей процедуры их калибровки. За результатами разработанной методики, получена аналитическая зависимость корректирующего коэффициента от числа Рейнольдса для диаметрального расходомера с диапазоном

числа Рейнольдса от $4 \cdot 10^4$ до $6 \cdot 10^5$, что обеспечивает вычисление значений коэффициента с отклонением не более $\pm 0,5$ % относительно зависимости Никурадзе.

Усовершенствован метод для определения координат расположения акустических каналов многоканальных ультразвуковых расходомеров и их весовых коэффициентов. Усовершенствование проведено с помощью уточнения весовой функции численного метода интегрирования Гаусса-Якоби, что позволило повысить точность интегрирования профиля скорости потока, в том числе и в условиях искажений его структуры. Усовершенствованный метод определения координат расположения акустических каналов и их весовых коэффициентов применен для хордовых ультразвуковых расходомеров с количеством акустических каналов от 2 до 6 при проектировании расходомеров, в частности в АО «Энергоучет» (Харьков).

На основании результатов CFD-моделирования и имеющихся эталонных данных об измеряемом расходе, предложена методология совершенствования математической модели ультразвукового расходомера. Суть совершенствования заключается в возможности устранить составляющие погрешности математической модели вследствие неточности воспроизведения конструкции ультразвукового расходомера и неточности воспроизведения газодинамических свойств потока средствами для CFD-моделирования. За результатами реализации предложенной методологии на основе результатов экспериментальных исследований ультразвукового расходомера газа ГУВР-011, усовершенствована его математическая модель, что позволило применить ее для исследования погрешности этого ультразвукового расходомера в условиях искажений структуры потока, возникающие при установке на измерительном трубопроводе типичных местных сопротивлений.

Разработана методика исследования погрешности ультразвуковых расходомеров в условиях потоков с искаженной структурой, предусматривающая применение усовершенствованной математической модели ультразвукового расходомера и позволяет выполнять исследования, как на этапе проектирования расходомеров, так и для действующих моделей. Методика исследования погрешности ультразвуковых расходомеров внедрена в АО «Энергоучет» (Харьков). По разработанной методике выполнено исследование дополнительной погрешности двухканальных хордовых ультразвуковых расходомеров, обусловленной искажением структуры потока, и сформированы рекомендации по выбору минимальных длин прямолинейных участков измерительного трубопровода после типичных местных сопротивлений. Применение разработанных рекомендаций обеспечивает уменьшение указанной составляющей погрешности при установке таких расходомеров и является базой для совершенствования нормативных документов по измерению расхода с помощью ультразвуковых расходомеров.

Ключевые слова: ультразвуковые расходомеры, структура потока, дополнительная погрешность, математическая модель, CFD-моделирование, методика исследования.

SUMMARY

Roman V.I. Improving the accuracy of ultrasonic flowmeters in conditions of distortion of flow structure. – Manuscript.

Dissertation for the scientific degree of candidate of technical sciences by the specialty 11.05.01 – The devices and methods for measurement of mechanical values. – Lviv Polytechnic National University the Ministry of Education and Science of Ukraine of Ukraine, Lviv, 2015.

The dissertation work is devoted to important scientific and applied problem – improving the accuracy of ultrasonic flowmeters by elimination of additional error of flow measurement caused by flow structure distortion. The classification of ultrasonic gas flowmeters and requirements for their choice in conditions of flow structure distortion are improved. The equation for relative error of flow measurement system based on ultrasonic gas flowmeters is improved. This equation provides the possibility to take into account the additional error of flowrate measurement. The method for determination of the coordinates of location of acoustic channels of ultrasonic flowmeters and their weight factors is improved. Therefore it was increased the accuracy of integration of flow velocity profile particularly in conditions of its structure distortion. The methodology of improving of mathematical model of ultrasonic flowmeter based on CFD-modeling results and available reference data about measured flowrate is proposed. Based on this methodology the mathematical model of multichannel ultrasonic flowmeter is improved and the method of investigation of the error of multichannel ultrasonic flowmeters in conditions of distortion of the flow structure is developed. The method is implemented at the private joint stock company "Energooblik" (the city of Kharkiv, Ukraine). It is applied for investigation of the additional error of two-channel gas ultrasonic flowmeters caused by flow structure distortion, for the development the recommendations for elimination of such error and also for improvement the flow measurement regulatory documents.

Keywords: ultrasonic flowmeters, flow structure, additional error, mathematical model, CFD-modeling, research method.