

DOI: 10.20535/1970.70(2).2025.348006

УДК 681.121

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ ВОДИ В ТРУБАХ ВЕЛИКИХ ДІАМЕТРІВ

*Гришанова І. А.**Національний технічний університет України**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна**E-mail: irgryshanova@gmail.com*

У зв'язку з постійним зростанням тарифів на ресурси, зокрема водні, проблема їхньої економії стала ще більш актуальною, ніж раніше. А яка ж економія може бути без точного обліку? Точне вимірювання витрати особливо в трубах великих діаметрів є дуже важливою задачею, оскільки навіть маленькі похибки призводять до неврахування значних об'ємів рідини, що проходить по таких трубах. Виникає питання, який метод вимірювання краще підходить для подібних об'єктів.

Чим більший діаметр, тим суттєвіші непрогнозовані збитки, пов'язані з низькою точністю вимірювання. У зв'язку з цим спостерігається підвищення потреби у високоякісних засобах виміру витрат саме на великих діаметрах, хоча ринок таких витратомірів дуже обмежений. З прийнятих за метрологічними показниками підходять лише електромагнітні та ультразвукові прилади, похибки яких зазвичай не перевищують кількох відсотків. Однак електромагнітні, як правило, на діаметри більше 300-400 мм не випускаються у зв'язку з різким ускладненням конструкції та збільшенням металоемності приладів. Проаналізовано також і інші найбільш використовувані методи з точки зору їх переваг і недоліків. На сьогоднішній день у світі існує тенденція, коли саме ультразвукова технологія задає планку для решти технологій вимірювання витрати. Досліджень особливостей застосування ультразвукового методу в трубах великих діаметрів вочевидь мало, хоча тут є достатньо специфічних питань, і вони були розглянуті в даній роботі.

Автор статті намагається оцінити фактори, що впливають на хід вимірювання, зокрема, монтаж, місцеві опори, гідродинамічні ефекти, що ймовірно впливають на метрологічні характеристики приладів обліку. Кількісно оцінюється вплив відмічених факторів, визначається найкраще застосування цих приладів і надаються відповідні рекомендації. За основу взято ультразвуковий неінвазійний метод.

При використанні неінвазійних ультразвукових технологій існують три потенційні технології, які можна застосувати. На їхній основі вирізняють ультразвукові час-імпульсні витратоміри, доплерівські ультразвукові витратоміри та крос-кореляційні ультразвукові витратоміри. Матеріал цієї статті обмежується використанням час-імпульсних приладів, оскільки вони, ймовірно, дозволять реалізувати метод вимірювання з найширшим діапазоном застосування, найвищою точністю та найнижчою невизначеністю.

Робота базується на базаторичному практичному досвіді використання ультразвукових витратомірів за різних умов експлуатації, розумінні технології, а також даних, що є у відкритому доступі.

Ключові слова: ультразвуковий метод, витрата води, похибка вимірювання, труба великого діаметра.

Вступ. Постановка проблеми

Точне вимірювання витрати в трубах великих діаметрів є дуже важливим аспектом, оскільки навіть маленькі похибки призводять до неврахування значних об'ємів ресурсів, що проходять по таких трубах. Досліджень особливостей вимірювання по цьому напрямку дуже мало, хоча тут є багато специфіки, яку слід було б розглянути [1]. Так, у відповідних стандартах і рекомендаціях [2] виробників витратомірів зазначаються довжини прямих ділянок для стабілізації потоків перед вимірювальною зоною, зазвичай відносно короткі, але чи є вони такими самими для вимірювання витрат у випадку діаметрів труб від 150 мм і вище? Проста лінійна теорія показує, що є цілком можливим, щоб завихрення не зменшувалось протягом певної довжини, як це стверджувалось раніше.

Якщо внутрішня поверхня труб дуже шорстка, то завихрення затухатимуть значно повільніше. Ця гіпотеза перевірялась на деяких магістральних трубопроводах в системі водопостачання Індії [3]. Важливо, щоб будь-які гідродинамічні ефекти, що існують в трубах, були зрозумілими. Поведінка витратомірів в неідеальних потоках отримала розповсюдження і експериментальне підтвердження. По-перше, вивчався аксіальний і тангенціальний рух рідини [4], по-друге, нелінійна теорія використовувалась для прогнозування полів розподілу швидкостей в потоці залежно від числа Рейнольдса, шорсткості труби і ступеня завихрення. Показано, що завихрення буде зменшуватися значно повільніше в трубах з високою внутрішньою шорсткістю. Це передбачення важливе, оскільки одним з пояснень може бути збереження завихрення

на великих відстанях в трубах великих діаметрів з великою кількістю відкладень на внутрішній поверхні трубопроводу. Дослідження обчислювальної гідродинаміки (CFD), яка використовує математичні моделі та цифрові методи для аналізу та симуляції, показали, що використання дуже високих значень шорсткості труби сприяє утворенню поперечної течії і посилює завихрення, що виникають у вигинах труб та інших їхніх конфігураціях [5].

Взагалі довжина необхідних прямих ділянок залежить від конструкції витратоміра і особливостей його інсталяції. Тестування зазвичай виконується на трубах малих діаметрів, а дані досліджень на трубах великих діаметрів доволі обмежені. Це означає, що й досі ефект діаметра на вимоги до довжин прямих ділянок, місць встановлення вимірювачів витрати з огляду на збурення в потоці не вивчений. Зокрема, зменшення викривлення профілю швидкостей потребує більшої довжини прямої ділянки в трубах великих діаметрів, ніж в трубах малих діаметрів.

Виникає питання, а який метод вимірювання краще підходить для труб великих діаметрів?

Аналіз останніх досліджень

Існує багато різноманітних методів і відповідно засобів вимірювання витрат, які знайшли своє застосування, але не всі вони використовуються на великих трубопроводах (рис. 1).



Рис. 1. Характерний вигляд труби великого діаметра, що тривалий час перебувала в експлуатації

Так, електромагнітний метод вимірювання є дуже чутливим до навіть незначних відкладень на стінках вимірювальної ділянки: магнетити, тверді струмопровідні осад. Поява таких відкладень є неминучою через продукти корозії трубопроводів. Внаслідок цього виникає повільний дрейф показів витратомірів і впродовж декількох місяців додаткова похибка сягатиме 15-20 %.

Електромагнітні витратоміри не можуть працювати без автономного джерела живлення, яке потрібне для магнітних котушок. Вони також є дуже чутливими до наявності сторонніх струмів у

трубопроводах і потенціалів на них. Поява таких струмів призводить до нестабільної роботи і додаткових неврахованих похибок. Великий діапазон вимірювання до 1:1000 є сумнівною перевагою, оскільки суттєво залежить від наявності домішок у потоці.

Вихрові витратоміри застосовуються здебільшого для вимірювання витрат малов'язких середовищ, переважно пари і газів. В них малий динамічний діапазон і висока нижня межа вимірювання.

Вихрові витратоміри є чутливими до утворення твердих відкладень на тілі обтікання, характеризуються значними втратами тиску на номінальних витратах і зазвичай на великих діаметрах не використовуються.

Основним недоліком турбінних витратомірів [6] є наявність рухомих частин, які піддаються зношенню. Наявність механічних домішок, як твердих продуктів корозії трубопроводів, мулу призводять до збільшення похибок і швидкого виходу з ладу. При частковому забрудненні вхідного струмовипрямляча збільшення похибки може досягати 10-12 %. Вони створюють великий опір потоку. Встановлення витратомірів великого діаметра через вузький діапазон вимірювання витрати і значні втрати тиску є недоцільним.

Саме широке розповсюдження отримали ультразвукові витратоміри. Вони не є чутливими до наявності суспензій, іржі та струмопровідних домішок, електричних завод, не мають рухомих частин, можуть працювати на автономному живленні, що дозволяє, як мінімум десять років безперебійної роботи.

Одна з суттєвих переваг використання ультразвукових методів полягає в тому, що ультразвукові витратоміри можна використовувати не лише інвазійно, коли датчики здатні контактувати з рідиною, хоча й не втручаються в рух потоку, але й неінвазійно, тобто з перетворювачами, встановленими на зовнішній поверхні трубопроводу. Такий метод зазвичай називають ультразвуковим методом з накладними датчиками [7].

Цей метод дозволяє проводити вимірювання без порушення конструкції трубопроводу, і тому вимірювання можна здійснювати там, де з міркувань безпеки, гігієни, безперервності постачання ресурсу або вартості неможливо втрутитися в трубопровід. Цей метод також забезпечує основу для перевірки існуючих лічильників, а головне, - він широко використовується в трубах великих діаметрів. Таким чином, неінвазійний метод ультразвукового вимірювання можна застосовувати як тимчасовий, напівпостійний або постійний метод вимірювання.

При використанні неінвазійних ультразвукових технологій існують три потенційні технології, на основі яких створено ультразвукові часімпульсні витратоміри, доплерівські ультразвукові витратоміри та крос-кореляційні ультразвукові

ві витратоміри. Сфера охоплення цієї публікації обмежується використанням саме час-імпульсних витратомірів, оскільки вони, ймовірно, дозволять створити метод вимірювання з найширшим діапазоном застосування, найвищою точністю та найнижчою невизначеністю [8], але тут є достатньо специфічних питань, і вони розглядатимуться в даній роботі.

Особливості вимірювання ультразвуковим методом

Отже, оцінимо фактори, що впливають на хід вимірювання, а саме на метрологічні характеристики процесу, зокрема, монтаж, параметри трубопроводу, властивості вимірюваної рідини, особливості експлуатації, тощо [9].

Вплив монтажу.

Ультразвукові накладні датчики, закріплені на зовнішній поверхні трубопроводу, фактично є ультразвуковим витратовимірювальним перетворювачем з одним діаметром і, як наслідок, страждають від проблем, пов'язаних з некоректним врахуванням профілю швидкості. При цьому виникають похибки, що обумовлені зміною профілю швидкості повністю розвиненого потоку при зміні числа Рейнольдса, а також внаслідок впливу конфігурацій трубопроводів вище за течією, таких як вигини та клапани.

Вплив характеристик трубопроводів.

Окрім впливу місцевих опорів, що розташовані вище за течією, на ультразвукові витратоміри з накладним кріпленням, виникають додаткові невизначеності внаслідок їх використання і пов'язані з широким спектром розмірів труб, матеріалів труб, товщини стінок та матеріалів футерування. Далі буде наведено рекомендації щодо діапазону розмірів та типів труб, з якими можна застосовувати цю технологію. Вимірювання часто проводяться на трубах, що експлуатуються вже деякий час і можуть зазнати корозії та ерозії. Також розглядатиметься вплив шорсткості стінок труби на вимірювальні характеристики витратомірів і буде визначено, які властивості трубопроводів має забезпечити користувач.

Вплив властивостей вимірюваної рідини.

Накладні ультразвукові датчики можна використовувати з широким спектром рідин, що мають різну в'язкість та густину. Для чистих рідин існує два ефекти. По-перше, ефекти гідродинаміки, спричинені зміною числа Рейнольдса залежно від густини та в'язкості, та по-друге, вплив зміни швидкості звуку на характеристики витратоміра. Хоча накладні датчики призначені для роботи з чистими рідинами, можливо, що такі рідини міститимуть невелику кількість захоплених бульбашок повітря або твердих частинок, пов'язаних з потоком. Вплив цих ефектів не можна ігнорувати поряд з обмеженнями, спричиненими рідинами з високим затуханням сигналу.

Вплив, що залежить від виробника.

Загальна досяжна точність, окрім залежності від вищезазначених факторів, також вноситиметься елементами, які закладає безпосередньо виробник. До них належать технологія, використовувана виробником для вимірювання різниці в часі проходження сигналу, компенсація, якщо така є, для числа Рейнольдса та швидкості звуку в рідині. Достовірність вимірювання можна підвищити, використовуючи низку діагностичних інструментів.

Особливості експлуатації.

Метрологічні характеристики за певного методу вимірювання, ймовірно, значно залежать від експлуатаційних умов, в яких він реалізується. Перетворювачі можна встановити таким чином, щоб для проведення вимірювання використовувалася одинарний, подвійний або чотирикратний прохід труби ультразвуковим променем. Розташування перетворювачів відносно труби, методи отримання правильного положення перетворювачів та методи накладання перетворювачів для збереження їхнього положення обов'язково слід враховувати. Суттєвим аспектом є зменшення впливу порушення профілю потоку. Ультразвук, що генерується перетворювачами, повинен бути добре «з'єднаний» з трубопроводом. Підготовка трубопроводу та використання відповідного з'єднувача важливі для отримання точних вимірювань. Температура процесу впливає на вибір сполучної речовини, а також на вибір перетворювача. Важливим також є вибір частоти роботи ультразвукових перетворювачів з різним розміром труб. Для використання накладних датчиків потрібно знати внутрішній діаметр труби. Це досягається шляхом введення користувачем зовнішнього діаметра труби та товщини її стінки.

Ймовірний вплив похибок у будь-якому з цих переглянутих аспектів під час вимірювань так чи інакше пов'язаний з математичною моделлю, реалізованою в ультразвуковому методі вимірювання з накладними датчиками [10].

Математична модель ультразвукового методу вимірювання з накладними датчиками

На рис. 2 показано елементи типового ультразвукового витратоміра з накладними датчиками.

Хоча різні виробники виконують процедуру обробки сигналів різними способами та використовують різні алгоритми для обчислення витрати, нижче в загальній формі наведено математичну модель, покладену в основу вимірювання. Витрата обчислюється за допомогою різниці в часі проходження ультразвуку від перетворювача T1 до перетворювача T2 та часу проходження ультразвуку від перетворювача T2 до перетворювача T1.

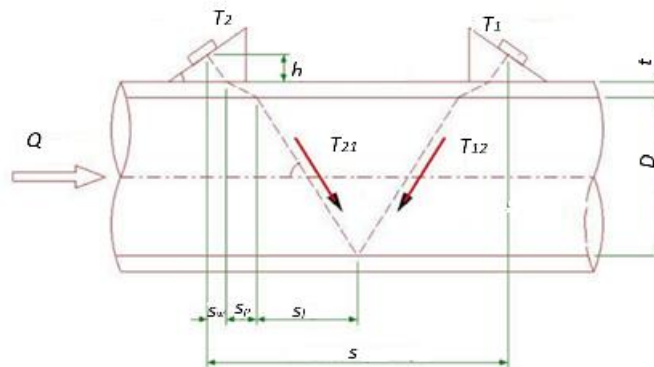


Рис. 2. Схема витратомірної ділянки з накладними ультразвуковими датчиками

Якщо ультразвуковий промінь у рідині знаходиться під кутом θ до осі труби, то об'ємна витрата Q пов'язана з різницею в часі $\Delta T = T_{12} - T_{21}$ за формулою:

$$Q = \frac{k\pi \cdot 2Rc_l \cdot \Delta T}{16\cos\theta}, \quad (1)$$

де c_l – швидкість звуку в рідині; R – внутрішній діаметр труби; k – поправочний коефіцієнт, який визначається за формулою:

$$k = \frac{U_{сеп}}{U_l}, \quad (2)$$

де $U_{сеп}$ – фактична середня швидкість у трубі;

U_l – середня швидкість, виміряна вздовж ультразвукового променя.

Якщо клин, на якому встановлені перетворювачі, виготовлений з матеріалу, для якого швидкість звуку дорівнює c_w та має кут α до осі труби, тоді рівняння (1) можна переписати так:

$$Q = \frac{k\pi c_l \cdot c_w \cdot 2R \sqrt{1 - \left(\frac{c_l \sin \alpha}{c_w}\right)^2} \cdot \Delta T}{16 \sin \alpha}. \quad (3)$$

Вимірюючи різницю часу проходження ΔT , разом зі знанням факторів, специфічних для вимірювання, а саме внутрішнього діаметра труби та швидкості звуку рідини, введених користувачем (або виміряних в режимі реального часу), та внутрішньо збережених змінних, таких як поправочний коефіцієнт k , кут клину та швидкість звуку в клині, можна забезпечити вимірювання об'ємної витрати рідини.

Для отримання точного результату слід здійснити точне вимірювання необхідної відстані між перетворювачами T_1 та T_2 . З простих геометричних міркувань ця відстань, s , у випадку одноканального вимірювача має бути:

$$s = 2s_w + 2s_p + 2s_l, \quad (4)$$

де s_w – відстань через клин, s_p – відстань через трубу, s_l – відстань через рідину.

Враховуючи вище зазначене, формула (4) прийме вигляд:

$$s = 2h \tan \alpha + 2t \frac{\frac{c_p \sin \alpha}{c_w}}{\sqrt{1 - \left(\frac{c_p \sin \alpha}{c_w}\right)^2}} + 4R \frac{\frac{c_l \sin \alpha}{c_w}}{\sqrt{1 - \left(\frac{c_l \sin \alpha}{c_w}\right)^2}}. \quad (5)$$

Коректну відстань між перетворювачами можна отримати, надавши витратоміру товщину стінки труби t та її внутрішній діаметр $D=2R$, а також швидкість звуку в матеріалі стінки труби c_p та швидкість звуку в рідині c_l . Ці дані можна використовувати разом із внутрішньо збереженими значеннями, щоб вказати користувачеві необхідне розділення накладних датчиків.

Метрологічні властивості для вимірювачів об'ємної витрати

При оцінці метрологічних властивостей витратоміра враховуються три показники. Це відсоткова похибка визначення об'ємної витрати або накопиченого об'єму, повторюваність вимірювання та відтворюваність вимірювання. При використанні цих термінів важливо, щоб вони відповідали стандартному використанню. Нижче наведено стандартні визначення цих трьох термінів.

Відсоткова похибка вимірювання об'ємної витрати визначається за формулою:

$$\delta = \frac{V - V_e}{V_e} \cdot 100\%, \quad (6)$$

де V – об'єм рідини, що пройшов за даними випробовуваного витратоміра протягом випробування; V_e – зареєстрований еталонний об'єм, що пройшов за той самий час.

Повторюваність вимірювання – це міра здатності забезпечувати повторювані вимірювання за однакових умов. Це міра випадкової невизначеності вимірювання, σ , яка визначається як:

$$\sigma = 2.83mS_E; \quad S_E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2}{n-1}}, \quad (7)$$

де E_i – похибка i -го результату в рамках серії випробувань; $\bar{E}$ – середня похибка всіх результатів в серії випробувань; n – кількість результатів в серії випробувань; m – коефіцієнт масштабування, який дозволяє проводити порівняння повторюваності між серіями випробувань, що мають різну тривалість, шляхом нормалізації всіх повторюваностей до стандартної тривалості запуску випробувань:

$$m = \sqrt{\frac{T_{\text{тест ср}}}{T_{\text{ст}}}}, \quad (8)$$

де $T_{\text{тест ср}}$ – це середня тривалість випробування в певному наборі випробувань;
 $T_{\text{ст}}$ – час, до якого має бути нормалізована невизначеність.

Відтворюваність вимірювання пов'язана зі ступенем, до якого вимірювання може бути відтворене, якщо змінити умови вимірювання.

Особливе значення у випадку з накладними ультразвуковими датчиками витратоміра має ступінь відтворюваності його показань в умовах розтискання та повторного затискання. Відтворюваність вимірювань можна потім визначити, вимірявши різницю між середніми похибками у двох наборах випробувань, один з яких проведено до розтискання та повторного затискання, а інший – після, тобто

$$\text{Відтворюваність} = \bar{E}_1 - \bar{E}_2, \quad (9)$$

де $\bar{E}_1$ – середня похибка початкових випробувань;
 $\bar{E}_2$ – середня похибка випробування, проведеного після розтискання та повторного затискання.

Якщо доступно більше двох наборів випробувань, можна виразити відтворюваність як функцію стандартного відхилення похибок у всьому діапазоні випробувань. У цьому випадку відтворюваність буде визначена як:

$$\text{Відтворюваність} = 2.83 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{E}_i - \bar{E})^2}{n-1}}, \quad (10)$$

де $\bar{E}_i$ – середня похибка, отримана в i -й серії випробувань на відтворюваність; $\bar{E}$ – середня похибка для серії випробувань на відтворюваність; n – кількість серій випробувань, проведених для оцінки відтворюваності.

Відтворюваність зазвичай виражається як функція швидкості потоку.

Ймовірна невизначеність, повторюваність та відтворюваність за ідеального потоку рідини в трубі та робочих умов

Накладні ультразвукові витратоміри, ймовірно, будуть використовуватися в дуже широкому діапазоні розмірів труб та рідин, і оскільки загальні метрологічні властивості, досяжні в польових умовах, залежать від ретельності, з якою оператори готують трубопроводи та монтують перетворювачі, а також відсутності можливості забезпечити простежуване калібрування накладних вимірювачів у польових умовах, важко отримати показники невизначеності, повторюваності та відтворюваності таких витратомірів саме на об'єктах їхнього використання.

Значення, які виробники наводять для точності накладних ультразвукових перетворювачів витрати, коливаються від $\pm 1\%$ до $\pm 5\%$ від показань, причому ця властивість знаходиться в обмеженому діапазоні витрат, який зазвичай визначається швидкістю потоку. При нижчих швидкостях потоку метрологічні показники зазвичай визначаються як фіксована невизначеність, виражена через швидкість, що може коливатися від $\pm 0,01$ м/с до $\pm 0,03$ м/с залежно від розміру труби та конкретного виробника. На додаток до цих специфікацій точності, виробники часто вказують те, що називається каліброваною точністю. Під цим мається на увазі точність, якої можна досягти в ситуаціях, коли витратомір калібрується на місці за допомогою інших засобів або коли накладні перетворювачі використовуються як частина каліброваної витратомірної ділянки. Типові значення точності за цих умов коливаються від $\pm 0,5\%$ до $\pm 2\%$ від показань, залежно від виробника та розміру труби. Повторюваність, зазначена виробниками, зазвичай знаходиться в діапазоні від $\pm 0,15\%$ до $\pm 0,5\%$ від показань.

Відгуки користувачів про показники, досягнуті в польових умовах, свідчать про те, що в різних умовах вимірювання (параметри труб та властивості рідин) характеристики, надані виробниками, не завжди можуть бути досяжними, хоча існує мало вагомих доказів, на яких можна було б ґрунтувати такі судження.

Ці рекомендації пропонують, щоб калібрування, проведені в лабораторних умовах, бралися за основу для оцінки ймовірних показників, яких можна досягти в польових умовах, до робочих умов. Результати, отримані в польових умовах, навряд чи будуть кращими за показники, досягнуті в лабораторії за умов повністю розвиненого потоку та за умови надзвичайної обережності при монтажі та розташуванні перетворювачів. Результати, отримані за неідеальних умов потоку, при поганому монтажі перетворювачів та неправильній відстані між ними, ймовірно, збільшать похибку вимірювання.

Ці калібрування проводилися для різних матеріалів та розмірів труб, хоча більшість загальнодоступних калібрувань проводилися для труб діаметром понад 50 мм. Ці результати загалом пока-

зують, що точність у межах $\pm 5\%$ від показань можна отримати для швидкостей понад 1 м/с для різних розмірів та матеріалів труб. Типова повторюваність, яку можна отримати, становить $\pm 1\%$ від показань, а відтворюваність за умов розтиску та повторного затиску $\pm 2\%$ від показань.

У деяких випадках, таких як оцінка продуктивності атомної електростанції [10] з використанням вторинного контуру охолодження, значно краща продуктивність була досягнута завдяки наданню повномасштабної моделі трубопроводу та її використанню для калібрування накладного витратоміра на випробувальному стенді. Цей підхід можна застосовувати там, де економічні витрати виправдані, і де можна очікувати, що матеріал, розміри та умови трубопроводу будуть точно відомі. За цих умов і коли калібрування на місці виконується з найбільшою ретельністю, заявлена точність краща за $\pm 1\%$ від показань, ймовірно, виправдана.

Інсталяційні ефекти для ультразвукового методу вимірювання з накладними датчиками

Як бачимо, якщо є повномасштабна модель ділянки для встановлення витратоміра, можна сподіватися на покращення результату вимірювання завдяки чисельному прогнозуванню багатьох складно передбачуваних ефектів, де серед

інших на першому місці стоять гідродинамічні, викликані різноманітними збуреннями потоків. Такі збурення дуже сильно впливають на коректне завдання поправочного коефіцієнту.

Зменшення впливу збурених потоків

Похибка поправочного коефіцієнта є найбільшою складовою похибки ультразвукових витратомірів і може сягати 5-10 % і навіть більше, особливо в нижній частині діапазону вимірювання [11]. Це зумовлено тим, що досить проблематично розмежувати діапазони застосовності тієї чи іншої моделі турбулентності для правильного представлення профілю швидкості та інших параметрів потоку для метрологічних цілей. Тому для опису розподілу швидкості (і, отже, гідродинамічного коефіцієнта) використовується кілька напівемпіричних формул, які лише наближено описують процеси, що відбуваються. Асиметрія вимірювального потоку також суттєво впливає на значення гідродинамічного коефіцієнта.

Один із методів, який часто пропонується для покращення вимірювань в умовах збуреного потоку, полягає в проведенні вимірювань у перпендикулярних площинах, та отриманні середнього значення двох вимірювань або вимірювань взагалі в декількох площинах (рис. 3).

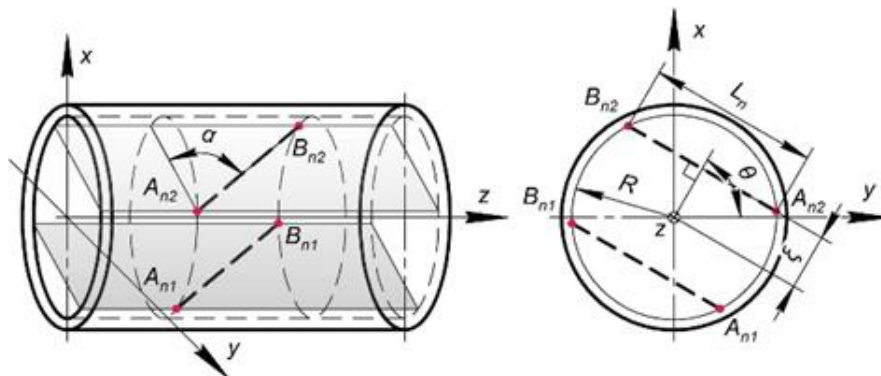


Рис. 3. Схема розмітки витратовимірювальної ділянки для розташування ультразвукових датчиків

Для оцінки поправочного коефіцієнта за умови деформованого осьового профілю і використання декількох вимірювальних площин слід врахувати багато параметрів [11]:

$$k = \frac{\bar{u}_z(r, \theta)}{\bar{u}_z(\xi_n, \theta')} = \frac{\frac{2}{R^2} \int_0^R \int_0^{2\pi} u_z(r, \theta) d\theta r dr}{\frac{1}{\sqrt{R^2 - \xi_n^2}} \int_{\xi_n}^R \frac{r}{\sqrt{r^2 - \xi_n^2}} u_z(r, \theta') dr}, \quad (11)$$

де $\theta' = \text{const}$ – кут орієнтації вимірювальної площини;

R – радіус поперечного перерізу;

ξ_n – відстань від осі труби;

$\bar{u}_z(r, \theta) = \frac{2}{R^2} \int_0^R \int_0^{2\pi} u_z(r, \theta) d\theta r dr$ – швидкість потоку, осереднена по перерізу вимірювальної ділянки.

Вираз (11) допомагає максимально точно врахувати профіль потоку та включити різні розподіли швидкості ще на етапі первинних прорахунків. Завдяки цьому переваги використання теоретичних профілів очевидні, оскільки вони описують експериментальні потоки. Це дозволяє оцінити вплив спотворення профілю осьової швидкості на показання ультразвукових витратомірів без застосування натурних експериментів. Крім того, швидкість у будь-якій точці можна розрахувати без використання методів інтерполяції.

Вплив спотворення профілю осьової швидкості на результати вимірювань для застосованих ультразвукових вимірювачів можна оцінити за допомогою теоретичного асиметричного профілю швидкості потоку в круглій трубі. Для представлення моделі турбулентного потоку було задіяно функції, запропоновані Саламі [12].

Функції, що демонструють асиметрію потоку, описуються тригонометричними або радіальними залежностями [12 – 14]:

$$u = (1-r)^{\frac{1}{n}} + m'r(1-r)^{\frac{1}{k}} \cdot f(\theta);$$

$$u = 1 + zr \sin(\theta) \text{ for } r \leq b, \quad 0 \leq b \leq 1, \quad (12)$$

де $f(\theta)$ – певна визначена функція параметра θ ;
 b, n, k, m', z – константи для певного профілю швидкості; θ – кутове положення від точки спо-

стереження до осі трубопроводу; r – радіальна відстань від центру трубопроводу до точки спостереження.

Константи та функції ступеня впливу для рівняння (12) були отримані в [15]. Було виявлено, що цю функцію не так складно інтегрувати.

На рис. 4 показано приклад моделювання одного з профілів швидкості для певного типу збурень у трубопроводі, який є подібним до того, що утворюється нижче за течією від вигина тої чи іншої просторової конфігурації [14].

Теоретичні профілі швидкостей, запропоновані Саламі, лише нагадують експериментально отримані профілі потоку [16]. Тому ці залежності можна використовувати здебільшого для наближення реальних розподілів швидкостей.

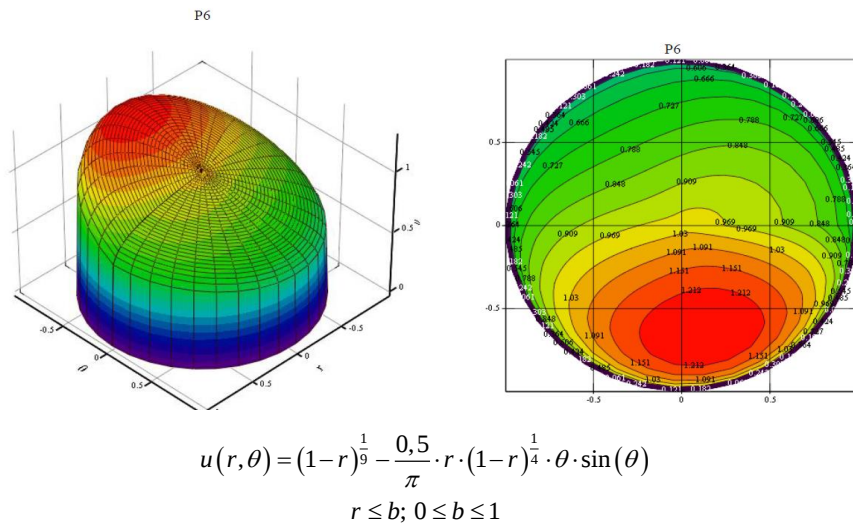


Рис. 4. Профіль швидкості потоку з одним піком (код Саламі P6)

Для оцінки впливу кута орієнтації хорди θ' за допомогою залежності (11) та розподілу швидкостей побудуємо графік залежностей $k=f(\theta')$ для таких значень θ' : 0, $\pi/2$, π , $3\pi/2$, 2π :

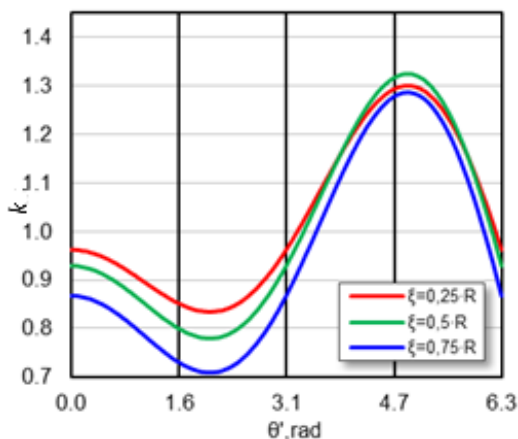


Рис. 5. Оцінка поправочного коефіцієнта для профілю швидкості потоку з одним піком (код Саламі P6)

Розрахований гідродинамічний коефіцієнт чутливості для різних орієнтацій пар ультразвукових перетворювачів дає нам можливість правильно вибрати їх розташування для забезпечення високої точності вимірювань. Також ми формуємо базу даних для різних асиметричних профілів потоку, щоб отримати найкращі результати навіть з конфігурацією однієї діаметральної хорди з чітким розумінням її кута нахилу та відстані від центру труби.

Типові діапазони розмірів труб, матеріалів труб, матеріалів футерування та товщини стінки, до яких може бути застосована технологія [17]

Накладні ультразвукові витратоміри повинні працювати з трубами різного розміру, матеріалу, товщини стінок та футерування. Деякі виробники стверджують, що їхні прилади можуть працювати з трубами певного розміру, матеріалом труб, товщиною стінок та футеровкою, але не всі виробни-

ки зможуть забезпечити вимірювальну систему, яка працюватиме з усім діапазоном перелічених параметрів.

Виробники стверджують, що труба повинна бути звукопровідною, хоча досвід користувачів показує, що деякі прилади можуть працювати з певними трубами, інші – ні. Наведений нижче коментар слід сприймати як орієнтовний, а не обов'язково як остаточний, і він визначає матеріали труб, де найчастіше виникають проблеми. Закупорки або пори в чавуні можуть послаблювати ультразвук. Бетонні та цементні труби можуть спричинити проблеми, але часто, якщо труба пов-

ністю просочена, вимірювачі можуть працювати краще. Є дані, що з нержавіючою сталлю та склопластиком деякі прилади мають труднощі у досягненні належної передачі сигналу. Для деяких виробників матеріал труби, розмір труби та матеріал підкладки можуть обмежувати конкретний режим роботи витратоміра.

Хоча виробники зазвичай не вказують діапазон товщини стінок труб, з якими працюватимуть їхні витратоміри, принаймні один виробник визначає максимальну товщину стінки труби, і є докази того, що в трубах малого діаметра з товстими стінками можуть бути значні похибки.

Таблиця 1. Типові діапазони розмірів труб, матеріалів труб, матеріалів футерування та товщини стінки, до яких може бути застосована неінвазивна ультразвукова технологія (дані взяті з рекламних проспектів, що є у вільному доступі)

Розміри труб, при яких виробники заявили про роботу накладних витратомірів	від 8 мм до 6000 мм
Матеріали труб, для яких виробники використовували накладні ультразвукові датчики	Чавун, вуглецева сталь, неіржавіюча сталь, мідь, алюміній, хастеллой, азбест, бетон, скло, LDPE, HDPE, PP, PVC, PTFE, PVDF, ABS, FPR, акрил.
Максимальна товщина стінки труби для роботи накладних ультразвукових датчиків	Більшість виробників не заявляють верхню межу, хоча один виробник встановлює її на рівні 25 мм.
Матеріали підкладки та зовнішні покриття, з якими виробники стверджують, що можуть використовувати накладні ультразвукові датчики	Дьоготь, епоксидна смола, розчин, гума

Було виявлено кілька проблемних областей з покриттями та футеруванням труб. Накладні ультразвукові датчики успішно працюватимуть лише там, де матеріал покриття/футерування з'єднаний з матеріалом труби таким чином, що між двома матеріалами немає повітряних зазорів, оскільки повітряні зазори перешкоджатимуть успішній передачі ультразвуку.

Якщо вимірювач має бути закріплений на матеріалі покриття, то товщина покриття повинна бути точно відомою, щоб можна було правильно визначити зовнішній діаметр труби. Якщо труба має футерування, то його товщина повинна бути точно відомою. Потрібні коректні швидкості звуку для хвилі, яка передається через матеріали покриття/футерування.

Якщо є більше одного футерувального матеріалу, футерувальний матеріал та покриття труби, або футерувальний матеріал разом із покриттям, яке утворилося протягом певного періоду часу, то враховуйте всі ці фактори з точки зору розрахунку

внутрішнього діаметра труби за зовнішнім діаметром та розділення перетворювачів.

Деякі виробники не дозволяють окремо отримувати дані з футерувальних матеріалів, і в цьому випадку необхідно ввести товщину, що відповідає сумі товщини стінки та товщини футерування, разом зі швидкістю звуку, яка представляє середньозважене значення швидкості звуку в двох матеріалах, виходячи з їх відносної товщини.

Виробники, які враховують футерувальні матеріали та покриття, дозволяють користувачеві вводити більше одного футерувального матеріалу або покриття. Якщо це неможливо, користувачеві необхідно ввести відповідну товщину та швидкість звуку, що враховує загальну товщину та середню швидкість звуку.

Вплив шорсткості.

Шорсткість внутрішньої стінки труби, ймовірно, спричиняє два набори проблем. Повністю розвинений профіль у трубі залежить від шорсткості стінки труби.

Оскільки це впливає на профіль швидкості, то й відповідно на поправочний коефіцієнт k , необхідний для корекції вимірної швидкості вздовж акустичного шляху до середньої швидкості поперечного перерізу труби.

Окрім впливу на профіль, внутрішня шорсткість труби також може спричинити значне розсіювання ультразвукового сигналу. Ступінь розсіювання пов'язаний з абсолютним рівнем шорсткості порівняно з довжиною хвилі використовуваного ультразвуку. Таким чином, він пов'язаний зі співвідношенням λ/ν , де λ – довжина хвилі ультразвуку в матеріалі стінки труби, а ν – шорсткість. Оскільки λ обернено пропорційна частоті збудження витратоміра – типова довжина хвилі в металевій трубі на частоті 1 МГц становить 6 мм, тоді як на частоті 500 кГц довжина хвилі становить 12 мм. Тому, як загальне правило, чим шорсткіша внутрішня поверхня трубопроводу, тим нижчою має бути частота роботи витратоміра. Шорсткіша конструкція трубопроводу також обмежить кількість віддзеркалень від стінки, які можна використовувати. Якщо витратомір не працює з трьома віддзеркаленнями, то слід спробувати два, а якщо два не працюють, то слід спробувати однопрохідну конфігурацію без віддзеркалень. Шорсткість стінки труби також може впливати на оцінку внутрішнього діаметра труби на основі вимірювань зовнішнього діаметра та товщини стінки труби.

Ультразвукові властивості трубопроводів

Для правильного розподілу перетворювачів необхідно знати як товщину стінки труби, так і швидкість звуку в матеріалі. Виробники мають таблиці швидкостей звуку в різних матеріалах. Природа ультразвукової хвилі, яка передається через трубу, може бути поздовжньою хвилею, зсувною хвилею або хвилею Лемба. Тому особливо важливо ввести правильну швидкість звуку в матеріалі стінки під час налаштування вимірювача.

Рідинні ефекти

Вплив швидкості звуку на характеристики вимірювача

Для накладних перетворювачів швидкості звуку користувач повинен ввести швидкість звуку у вимірювач на етапі ініціалізації як частину процедури встановлення правильної відстані між двома перетворювачами. Згодом, залежно від конструкції витратоміра, ця швидкість звуку буде використана у визначальному рівнянні витратоміра, або ж нова швидкість звуку буде оцінена на основі вимірювань часу проходження. Останнє дозволяє компенсувати коливання, які можуть виникати внаслідок зміни температури рідини. Правильне розташування перетворювачів та правильна швидкість звуку важливі для правильної роботи витратоміра.

Вплив бульбашок повітря та твердих речовин на роботу лічильника

Вплив бульбашок повітря полягає в розсіюванні ультразвуку, а також у впливі на швидкість звуку в рідині, впливаючи на її стисливість. Це призводить до ослаблення сигналу та погіршення співвідношення сигнал/шум у витратомірі. Ступінь розсіювання та ослаблення залежить від розміру, кількості та розподілу бульбашок повітря. Виробники вказують типові рівні захопленого повітря, з якими їхній вимірювач продовжуватиме працювати, зазвичай менше 10 %, хоча, як правило, без будь-яких уточнень розміру бульбашок. Вплив твердого матеріалу полягає в розсіюванні ультразвуку. Низька щільність твердих речовин з діаметром частинок менше $\lambda_1/8$, де λ_1 – довжина хвилі ультразвуку в рідині, ймовірно, матиме незначний вплив на вимірювач.

Висновки

Ця стаття містить вичерпний набір рекомендацій щодо застосування ультразвукових витратомірів час-імпульсного типу з накладними датчиками для широкого спектру промислових потоків в трубах великих діаметрів. Ці рекомендації були розроблені на основі власного досвіду і досвіду виробників приладів, що реалізують ультразвуковий метод вимірювання. Вони представляють найкращу практику застосування цієї технології до вимірювання рідини, здебільшого води. У рекомендаціях визначено вплив монтажу, параметрів трубопроводів, властивостей рідин та експлуатації на ультразвукові витратоміри з накладними датчиками, а також вплив, який може бути специфічним для конкретних умов використання.

Значний внесок у помилку накладних витратомірів роблять труднощі у визначенні точних розмірів труби. При цьому слід враховувати такі фактори, як шорсткість стінок трубопроводу, яка варіюється від місця до місця кріплення датчиків, овальність трубопроводів та ін. Крім того, неправильно введений матеріал труби також вносить велику частку в сумарну похибку вимірювань.

Отримані результати дають чітке розуміння доцільного розміщення ультразвукових витратомірів на трубопроводі за умов максимальної точності та мінімального впливу на вимірюване середовище. Це дозволяє ефективно застосовувати вимірювачі незалежно від вимог до обов'язкових прямих ділянок трубопроводу до та після вимірювачів.

Аналітичні дослідження поправочного коефіцієнта забезпечують формування бази даних його значень у різних випадках спотворення профілю потоку.

У сукупності теоретичні оцінки та результати числового моделювання дають нам можливість значно підвищити точність ультразвукових витратомірів для практичного застосування.

Рекомендації, наведені в статті, мають на меті покращення використання накладних ультразвукових перетворювачів витрати. Зі збільшенням досвіду їхнього використання та проведенням подальших калібрувань у ширшому діапазоні умов, ймовірно, краще розуміння роботи таких пристроїв сприятиме кращій діагностиці, і, як наслідок, з'являться накладні ультразвукові витратоміри з покращеними метрологічними властивостями, а уточнений ультразвуковий метод даватиме кращі результати вимірювання на об'єктах будь-якої складності.

Література

- [1] D.W. Spitzer, & R.A. Furness, "New Aspects of Flow Measurement Errors in Large-diameter Pipes", *Journal of the American Water Works Association*, vol. 100, no. 7, pp. 54-59, July 2008. DOI: 10.1002/j.1551-8833.2008.tb09675.x
- [2] ДСТУ EN ISO 4064-1:2019 (EN ISO 4064-1:2017, IDT; ISO 4064-1:2014, IDT) Лічильники холодної питної води та гарячої води. Частина 1. Метрологічні та технічні вимоги.
- [3] R.A. Furness, & S.P. Phatnani, "Theoretical and Experimental Studies in Large Diameter Water Pipelines", in *Aquatech Asian Water Conf.*, New Delhi, India, 2003.
- [4] R.A. Furness, "Theoretical Studies in Water Pipelines", Report RAF/1013/0905, September 2005 (client confidential). JDF and Associates, Tisbury, Gloucestershire, United Kingdom, 2005.
- [5] Dane H., Wilsack R., "Upstream pipe wall roughness influence on ultrasonic flow measurement", in *AGA Operations Conference*, Cleveland, 1999.
- [6] R. C. Baker, "Turbine flow meters: II. Theoretical and experimental published information", *Flow Meas. Instrum.*, 4(3), pp. 123–144, 1993.
- [7] I. Gryshanova, The improved ultrasonic flow measuring method, in: *Proc. of the ASME Fluids Engineering Division Summer Conference (FEDSM 2008)*, 2009, pp. 337–340. DOI: 10.1115/FEDSM2008-55225
- [8] I. Gryshanova, "A computational investigation of flow meters", in *Proc. of 15th International Flow Measurement Conference (FLOMEKO 2010)*, pp. 888–895, 2010. DOI:10.21014/tc9-2022.120
- [9] I. Gryshanova, I. Korobko, "How to improve accuracy of existing ultrasonic water meters", in *Proc. of Fluids Engineering Division FEDSM (American Society of Mechanical Engineers)*, vol. 2, 2021. DOI: 10.1115/FEDSM2021-63247
- [10] J. C. Jung, and P. H. Seong, "Estimation of the Flow Profile Correction Factor of a Transit-Time Ultrasonic Flow Meter for the Feedwater Flow Measurement in a Nuclear Power Plant," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 52, 2005.
- [11] I. Gryshanova, A. Rak, I. Korobko, "The investigation of the correction factor for ultrasonic flow meters", *Measurement*, vol. 219, 113326, 2023. DOI: 10.1016/j.measurement.2023.113326.
- [12] L. A. Salami, "Application of a computer to asymmetric flow measurement in circular pipes", *Trans. Inst. Meas. Control*, 6, pp. 197–206, 1984.
- [13] B. Horner, and F. Mesch. An induction flowmeter insensitive to asymmetric flow profiles. In M. S. Beck, editor, *Process tomography 1995*, 6–8 April 1995, Bergen, Norway, pp. 321–330, Manchester, 1995. UMIST.
- [14] P. I. Moore, G. J. Brown, and B. P. Stimpson, "Modelling of transit time ultrasonic flowmeters in theoretical asymmetric flow", in *Proc. of FLOMEKO (Salvador, 2000)*, 2000.
- [15] L. A. Salami, "Velocity Area Methods for asymmetric profiles" University of Southampton Interim Report V, 1972.
- [16] L. A. Salami, "Errors in the velocity-area method of measuring asymmetric flows in circular pipes", University of Southampton Interim Report I, 1971.
- [17] M. L. Sanderson, and H. Yeung, "Guidelines for the use of ultrasonic non-invasive metering technique", *Flow Meas. Instrum.*, vol. 13, no. 4, pp. 125-142, Aug. 2002. DOI: 10.1016/S0955-5986(02)00043-2

UDC 681.121

Iryna Gryshanova

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine
FEATURES OF ULTRASOUND METHOD APPLICATION FOR WATER FLOW MEASUREMENT IN LARGE DIAMETER PIPES

Due to the constant increase in tariffs for resources, in particular water, the problem of their savings has become even more relevant than before. But what savings can there be without accurate accounting? Precise flow measurement, especially in large-diameter pipes, is a very important task, since even small errors lead to the omission of significant volumes of fluid passing through such pipes. The question arises, which measurement method is better suited for such objects.

The larger the diameter, the more significant the unforeseen losses associated with low measurement accuracy. In this regard, there is an increase in the need for high-quality flow measurement devices specifically for large diameters, alt-

though the market for such flow meters is very limited. Basing on the acceptable metrological indicators, only electromagnetic and ultrasonic devices are suitable. Their errors usually do not exceed a few percent. However, electromagnetic devices are basically not produced for diameters greater than 300-400 mm due to the significant complication of the design and the increase in the metal content of the devices. Other most commonly used methods have also been analyzed in terms of their advantages and disadvantages. Today, there is a trend in the world when the ultrasonic technology leads the way for the rest of the flow measurement technologies. There are obviously few studies of the measurement features in this area, although there are quite a few specific issues here, and they were considered in this work.

The author of the article attempts to assess the factors affecting the measurement process, in particular, installation, local disturbances, hydrodynamic effects, which are likely to affect the metrological characteristics of metering devices. The impact of the noted factors is quantified, the best application of these devices is determined, and estimates of the total uncertainty that can be achieved using the best methods are provided. The basis is the ultrasonic non-invasive method.

When using non-invasive ultrasound technologies, there are three potential technologies that can be applied. Based on these, ultrasonic time-of-flight flowmeters, Doppler ultrasonic flowmeters, and cross-correlation ultrasonic flowmeters are distinguished. The topic of this article is limited to the use of time—of-flight devices, since they are likely to allow the implementation of a measurement method with the widest range of applications, the highest accuracy, and the lowest uncertainty.

The work is based on many years of practical experience using ultrasonic flowmeters under various operating conditions, understanding of the technology, as well as publicly available data.

Keywords: ultrasonic method, flow rate, measurement error, large diameter pipe.

*Надійшла до редакції
10 жовтня 2025 року*

*Рецензовано
15 листопада 2025 року*



© 2025 Copyright for this paper by its authors.
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).