

В. І. Роман, канд. техн. наук; А. С. Левченко

ВПЛИВ РЕЖИМУ РУХУ ПОТОКУ ТА ШОРСТКОСТІ ТРУБОПРОВОДУ НА ПОХИБКУ ХОРДОВИХ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ВИТРАТОМІРІВ

Стаття присвячена дослідженню впливу режиму руху потоку та шорсткості внутрішньої поверхні стінки вимірювального трубопроводу (ВТ) на похибку (δ) багатоканальних хордових ультразвукових витратомірів (УЗВ) для задач їх автоматизованого проектування. Проведені в роботі дослідження та розрахунки виконані на основі параболічного (описує ламінарний режим руху) та степеневого (описує турбулентний режим руху) закону розподілу швидкості потоку. Для моделювання впливу шорсткості внутрішньої поверхні стінки ВТ застосовано степеневий закон розподілу, в якому степінь (експонента Нікурадзе) визначається через модифіковане рівняння Колбрука-Уайта розроблене колективом авторів Calogirou, Bockhoven та Henkes в 2001 році. За результатами проведених досліджень встановлено, що за ламінарного режиму руху потоку, похибка δ (за умов відсутності спотворень профілю швидкості) не залежить ані від числа Рейнольдса (Re), ані від величини шорсткості внутрішньої поверхні стінки ВТ, ані від кількості хордових акустичних каналів (N) УЗВ – її значення менше $\pm 0,3$ %, що відповідає вимогам ISO17089-1 до ефектів, які виникають в реальних умовах експлуатації. За турбулентного режиму руху потоку та відсутності шорсткості внутрішньої поверхні стінки ВТ, похибка δ залежить від числа Re – її значення додатньо зростає при зменшенні Re , проте, при УЗВ з $N \geq 4$, цим впливом можна знехтувати, адже $\delta = \pm 0,3$ % (при УЗВ з $N \leq 3$ цей вплив можна зменшити підбором оптимального методу розрахунку відстаней розташування та вагових коефіцієнтів акустичних каналів на базі числових методів інтегрування, як от OWICS). За турбулентного режиму руху потоку та наявності шорсткості внутрішньої поверхні стінки ВТ, похибка δ буде мати ту саму поведінку, що і при відсутності шорсткості; тобто, шорсткість внутрішньої поверхні стінки ВТ суттєво не впливає на похибку вимірювання витрати багатоканальних хордових УЗВ, особливо на ВТ великих діаметрів. Як результат, УЗВ з $N \geq 4$ є ідеальним варіантом для вимірювання витрати та кількості плинних енергоносіїв з високими вимогами до точності, нівелюючим цим вплив режиму руху потоку та шорсткості внутрішньої поверхні стінки ВТ.

Ключові слова: режим руху потоку, шорсткість, похибка вимірювання витрати, хордовий ультразвуковий витратомір, степеневий закон розподілу, коефіцієнт поправки на профіль потоку.

Актуальність дослідження

Те, що багатоканальні хордові ультразвукові витратоміри (УЗВ) (в деяких наукових роботах можна зустріти як ультразвукові лічильники [1]) все частіше використовуються для комерційного обліку природного газу, є доконаним фактом. Сучасний рівень їх технічного розвитку такий, що дозволяє конкурувати з альтернативними (традиційними) методами обліку, як от турбінні лічильники або витратоміри змінного перепаду тиску [1].

Як відомо [2, 3], при практичному використанні УЗВ в складі вузла (станції) комерційного обліку газу, необхідним є оцінювання похибки вимірювання витрати (об'єму). Адже навіть у випадку високоточного вимірювання УЗВ (± 1 % масової витрати), продемонстровані при тестуванні, систематичні складові похибки можуть з часом накопичуватися до значних показників [2]. Більше того, реальні умови експлуатації можуть відрізнятися від тих, в яких УЗВ був калібрований перед введенням в експлуатацію: наявні спотворення структури профілю швидкості потоку (особливо асиметрія), після місцевих опорів; зміна шорсткості внутрішньої поверхні стінки вимірювального трубопроводу (ВТ) та інші фактори. Тому, періодичний контроль або моделювання факторів впливу на похибку УЗВ (з метою врахування або ігнорування в подальшому) для задач їх автоматизованого проектування, є актуальною задачею сьогодення.

В роботі [4] теоретично досліджено вплив режиму руху потоку та шорсткості внутрішньої поверхні стінки ВТ на похибку одноканальних діаметральних УЗВ. На відміну від

діаметральних УЗВ, вплив цих факторів на похибку багатоканальних хордових УЗВ не є таким очевидним, що викликано варіативністю конструкції їх акустичних каналів (АК): кількість, схема просторового розташування (хордова, Δ -схема), метод розрахунку вагових коефіцієнтів (постійних або змінних). Зважаючи на це, в цій роботі поставлено за мету виконати теоретичні дослідження впливу режиму руху потоку та шорсткості внутрішньої поверхні стінки ВТ на похибку багатоканальних хордових УЗВ із врахуванням варіативності конструктивних особливостей їх АК. Результатом роботи стане завершення двотактного (діаметральні та хордові) етапу розробки алгоритмів розрахунку впливу ефектів встановлення УЗВ та інтеграція їх до комп'ютерної програми для автоматизованого проектування витратомірів ультразвукового типу.

Аналіз публікацій за темою дослідження

Згідно посібника з розрахунку невизначеності ультразвукових комерційних газових вимірювальних станцій [2], вплив шорсткості внутрішньої поверхні стінки ВТ є складовою невизначеності вимірювання витрати УЗВ, зумовлених роботою в реальних умовах експлуатації (так звані умови *fieldoperation*). При цьому, термін невизначеність (*uncertainty*) в цьому контексті характеризує ширину діапазону, в якому може знаходитись істинне значення вимірюваної величини як результат вимірювання через різні фактори: точність інструментів, методи вимірювання, умови експерименту тощо. Також в посібнику [2] сказано, що шорсткість внутрішньої поверхні стінки ВТ має систематичний тип ефективності, відноситься до методу інтеграції (ефектів встановлення) – впливає на профіль швидкості потоку, а отже і кінцевий результат інтегрування швидкостей потоку одним із числових методів [2, 3] та діє на УЗВ у такі два способи: 1) як початкова шорсткість внутрішньої стінки ВТ, що може бути проігнорована, якщо УЗВ буде відкалібровано за витратою разом із секцією ВТ вище за течією для використання в польових умовах (що є відносно поширеною практикою); 2) як шорсткість внутрішньої поверхні стінки ВТ, що змінюється з часом (через корозію, зношення, утворень ямок) – усувається через періодичні контролю та удосконалення конструкції та методів інтегрування на етапі проектування УЗВ.

Згідно основного міжнародного стандарту в галузі ультразвукової витратометрії ISO 17089, який в багато чому містить доробок авторів посібника [2], шорсткість внутрішньої поверхні стінки ВТ теж проявляється для хордових УЗВ через вплив на профіль швидкості потоку (інтегрування швидкостей потоку), проте, має відмінності в залежності від варіативності конструкції їх АК. Проте, не зважаючи на конструкцію АК хордових багатоканальних УЗВ (тип вимірювальної схеми), необхідно дотримуватись таких рекомендацій: а) для нових УЗВ що проектуються, слід застосовувати різні підходи, що активно протистоятимуть зміні шорсткості внутрішньої поверхні їх стінок [3]; б) для наявних УЗВ, необхідно періодично контролювати наявність відкладення на внутрішній поверхні стінки ВТ (через специфіку умов транспортування газу, пошкодження та старіння) [3]; в) для УЗВ, що проходять перекалібрування в польових умовах, слід дотримуватись особливих умов щодо транспортування, тим самим запобігаючи механічній зміні шорсткості або забрудненню внутрішньої поверхні стінки ВТ [3].

Як результат огляду літературних джерел, можна сказати наступне:

1. Робота хордових УЗВ для комерційного обліку газу регламентується офіційними міжнародними стандартами [3] та різного роду посібниками, в тому числі і щодо врахування впливу шорсткості внутрішньої поверхні стінки ВТ [2].

2. Дослідженню складових невизначеності вимірювання витрати хордових УЗВ, зумовлених шорсткістю внутрішньої поверхні стінки ВТ, присвячують багато наукових праць, зокрема [5 – 7]. Зазвичай, вони стосуються удосконалення моделей (рівнянь), які дозволяють врахувати шорсткість при розрахунку метрологічних характеристик УЗВ.

Попри це, ефекти встановлення УЗВ (разом із шорсткістю) досі є предметом активних досліджень і тестувань, і вважаються одним із найскладніших внесків у загальну похибку,

особливо коли йдеться про відстежуваність (*traceability*) [2]. Тому, прийнято використовувати лише орієнтовну величину цієї похибки (або невизначеності). Як приклад, стандарт [3] рекомендує використовувати межі $\pm 0,3$ % для оцінки допустимості ефектів встановлення – зміни умов встановлення УЗВ під час калібрування і під час використання в реальних умовах експлуатації. Ці межі будуть використані і нами в цій роботі для оцінки впливу режиму руху потоку та шорсткості внутрішньої поверхні стінки ВТ на похибку багатоканальних хордових УЗВ із врахуванням варіативності схем їх АК.

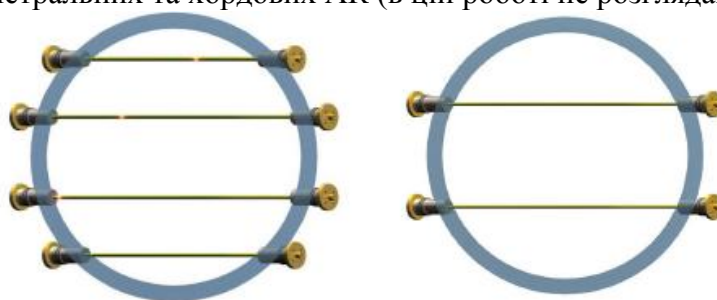
Мета дослідження

Зважаючи на актуальність та результати аналізу публікацій за темою дослідження, вплив режиму руху потоку та шорсткості внутрішньої поверхні стінки ВТ на похибку хордових УЗВ є важливими факторами, як під час їх експлуатації, так і під час проектування нових витратомірів цього типу. А отже, вони повинні бути доступними для використання під час автоматизованого (комп'ютерного) проектування УЗВ. Слідуючи цьому висновку, в цій статті поставлено за мету дослідити вплив режиму руху потоку та шорсткості внутрішньої поверхні стінки ВТ на похибку вимірювання витрати та коефіцієнт поправки на профіль потоку багатоканальних хордових УЗВ із врахуванням варіативності конструкції їх АК.

Виклад основного матеріалу дослідження

Варіативність конструкції АК хордових УЗВ регламентована стандартом [3]. Згідно нього, в залежності від схеми АК, багатоканальні хордові УЗВ бувають трьох типів (рис.1):

- а) УЗВ з розташуванням довільної кількості АК на відстанях відносно осі ВТ, що відмінні від нуля та половини радіуса (такі схеми розташування АК називають *off-diameter*) [3];
- б) УЗВ з розташуванням двох АК на відстані відносно осі ВТ, що рівна половині радіуса ВТ (такі схеми розташування АК називають *equalradial*) [3];
- в) комбінація діаметральних та хордових АК (в цій роботі не розглядаються).



а) схема *off-diameter* б) схема *equalradial*

Рис. 1. Розташування хордових АК УЗВ

В залежності від схеми АК, формули для визначення усередненої швидкості потоку хордового УЗВ (u_{USM}) будуть мати наступний вигляд:

- а) при схемі АК *off-diameter*:

$$u_{USM} = k_v \sum_{i=1}^N u_h(i) k_h(i), \quad (1)$$

- б) при схемі *equalradial*:

$$u_{USM} = k_v \left(\frac{\sum_{i=1}^N u_h(i)}{N} \right), \quad (2)$$

де N – кількість хордових АК УЗВ; u_h – усереднена швидкість потоку вздовж i -го хордового

АК УЗВ; k_h – ваговий коефіцієнт хордового АК УЗВ, що в свою чергу залежить від R , відстані, на якій розташовано хордовий АК (x) та ваги (w). Два останні показники можна визначити за допомогою математичного апарату числових методів інтегрування (ЧМІ) [3].

В цій роботі оцінювання впливу режиму руху потоку та шорсткості внутрішньої поверхні стінки ВТ виконано за двома критеріями, перший – *коефіцієнт корекції на профіль швидкості потоку* (k_v), другий критерій – *відносна похибка вимірювання (розрахунку) об'ємної витрати* (δ). Розглянемо формули для розрахунку цих критеріїв.

Коефіцієнт k_v , як було сказано в [4], приводить виміряне значення швидкості потоку УЗВ до теоретично-необхідного значення швидкості потоку, усередненої по площі поперечного перерізу ВТ u_S (фізично виміряти цю швидкість неможливо). Саме тому, коефіцієнт k_v присутній у формулах (1 – 2), і буде справедливим для обох наведених вище схем АК тільки за однієї умови – потік має бути осесиметричним та повністю розвиненим [3].

Для хордових УЗВ, на відміну від діаметральних [4, 8], формули для теоретичного (емпірично-виведеного) коефіцієнта k_v не існує. Це викликано варіативністю можливих схем АК багатоканальних хордових УЗВ. Проте, його можна розрахувати за формулою (3) маючи значення конструктивних параметрів УЗВ:

$$k_v = \frac{u_S}{u_{USM}}, \quad (3)$$

де u_S – швидкість потоку, значення якої можна розрахувати за формулою (4), якщо відомо рівняння закону розподілу швидкості (U_R) [4]:

$$u_S = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R U_R 2\pi r dr. \quad (4)$$

Оскільки схема АК *equalradial* є частковим випадком схеми *off-diameter*, в подальшому для моделювання використано тільки останню схему. Щоб отримати формулу для визначення швидкості u_{USM} за схемою АК *off-diameter*, у формулу (1) необхідно додати рівняння для визначення u_h та U_R [8]. В результаті, отримаємо таку формулу виду:

$$u_{USM} = \sum_{i=1}^N \left[\left(\frac{1}{\sqrt{R^2 - x(i)^2}} \int_{x(i)}^R \frac{r}{\sqrt{r^2 - x(i)^2}} U_R dr \right) k_h(i) \right]. \quad (5)$$

Останнє, що необхідно додати до формули (5), це рівняння для розрахунку коефіцієнта k_h . В результаті, отримаємо формулу виду [8]:

$$u_{USM} = \sum_{i=1}^N \left[\left(\frac{1}{\sqrt{R^2 - x(i)^2}} \int_{x(i)}^R \frac{r}{\sqrt{r^2 - x(i)^2}} U_R dr \right) \left(\frac{2w(i)\sqrt{R^2 - x(i)^2}}{\pi R} \right) \right]. \quad (6)$$

Як результат, формула (6) дозволяє визначити усереднену швидкість потоку УЗВ шляхом зваженого сумування всіх швидкостей, що були отримані інтегруванням закону розподілу по хордах, які розташовані на відстані x відносно осі ВТ.

Формула (6) працює в парі із ЧМІ, де w – це вага методу, а x – його абсциса. В цій роботі нами досліджено три поширені ЧМІ в галузі ультразвукової витратометрії – метод Гауса-Якобі, OWICS (модифікований метод Гауса-Якобі) та метод Гарріса-Еванса. Значення w та x названих ЧМІ отримано з математичного довідника [9] та наукових праць [10, 11].

Для отримання кінцевої формули для розрахунку коефіцієнта k_v , підставимо до формул (4) та (6) рівняння закону розподілу швидкості потоку:

1) для ламінарного режиму руху потоку ($Re < 2300$), це буде *параболічний закон* ($1 - r^2$):

$$k_v = \frac{\frac{1}{\pi R^2} \int_0^R 2\pi r(1-r^2) dr}{\sum_{i=1}^N \left[\left(\frac{1}{\sqrt{R^2 - x(i)^2}} \int_{x(i)}^R \frac{r(1-r^2)}{\sqrt{r^2 - x(i)^2}} dr \right) \left(\frac{2w(i)\sqrt{R^2 - x(i)^2}}{\pi R} \right) \right]}, \quad (7)$$

де r – це радіальна координата. Як показали досліди Нікурадзе [12, 13], при ламінарному режимі руху потоку, незалежно від значення шорсткості внутрішньої поверхні стінки ВТ, гідравлічний опір не буде змінюватися. Іншими словами, закон розподілу залежить тільки від радіальної координати, що і можна побачити з формули (7);

2) для турбулентного режиму руху ($Re > 40000$), це буде *степеневий закон* $(1-r)^{1/n}$:

$$k_v = \frac{\frac{1}{\pi R^2} \int_0^R 2\pi r(1-r)^{\frac{1}{n}} dr}{\sum_{i=1}^N \left[\left(\frac{1}{\sqrt{R^2 - x(i)^2}} \int_{x(i)}^R \frac{r(1-r)^{\frac{1}{n}}}{\sqrt{r^2 - x(i)^2}} dr \right) \left(\frac{2w(i)\sqrt{R^2 - x(i)^2}}{\pi R} \right) \right]}, \quad (8)$$

де n – це експонента Нікурадзе, яку можна розрахувати за такими формулами:

а) для гладкої труби [4, 8, 12]:

$$n = 11,269 - 3,019 \lg(Re) + 0,432 \lg^2(Re), \quad (9)$$

б) для шорсткої труби [4, 7]:

$$n = 2,065 - 1,884 \lg \left(\frac{2e}{D} + \frac{18,7n}{Re} \right), \quad (10)$$

де e – абсолютна шорсткість (в роботі 0 та 0,22 мм); D – внутрішній діаметр ВТ (в роботі 50 мм). Повертаючись до дослідів Нікурадзе [12, 13], ним було встановлено, що при турбулентному режимі руху потоку (зі значним збільшенням числа Re), товщина граничного шару профілю потоку зменшується, і він вже не покриває виступи шорсткості, які входять у ядро потоку, викликаючи завихрення та зрив струменів (тим самим, впливаючи на гідравлічний опір). Іншими словами, для сильно турбулентних потоків число Re не матиме значний вплив на коефіцієнт гідравлічного опору потоку, на відміну від значення шорсткості внутрішньої поверхні стінки ВТ [12, 13]. Для пошуку n з (10), слід розв'язати це рівняння методом послідовного наближення, до прикладу, за алгоритмом Левенберга-Марквардта (в MATLAB його реалізує функція *fsolve*).

Формула для визначення похибки δ матиме в цій роботі такий вигляд [2]:

$$\delta = 100 \frac{(u_{USM} - u_s)}{u_s}, \quad (11)$$

де у формули для розрахунку u_{USM} (6) та u_s (4) підставляємо рівняння параболічного або степеневому закону розподілу, в залежності від досліджуваного режиму руху потоку.

Результати розрахунків

Використовуючи формули (7) та (11), відповідно для параболічного закону розподілу, нами отримано графіки залежностей $k_v = f(N)$ та $\delta = f(N)$ (рис. 2) для трьох обраних ЧМІ. Як видно з рис. 2, тільки один ЧМІ, а саме OWICS при $N = 2$ перевищив рекомендовані стандартом [3] межі в $\pm 0,3$ % ($\delta = 0,5711$ %). Отже, збільшення кількості АК УЗВ в ламінарному режимі руху потоку призводить до того, що застосування коефіцієнта k_v стає необов'язковим. Також з рис. 2 можна зробити ще один висновок – для УЗВ з кількістю АК

$N \geq 3$, вибір ЧМІ не відіграє значної ролі (принаймні, серед трьох обраних методів), хоча ЧМІ Гауса-Якобі та Гарріса-Еванса показують строге зменшення значень похибки хордових УЗВ δ від $\pm 0,006\%$ вже при $N = 2$.

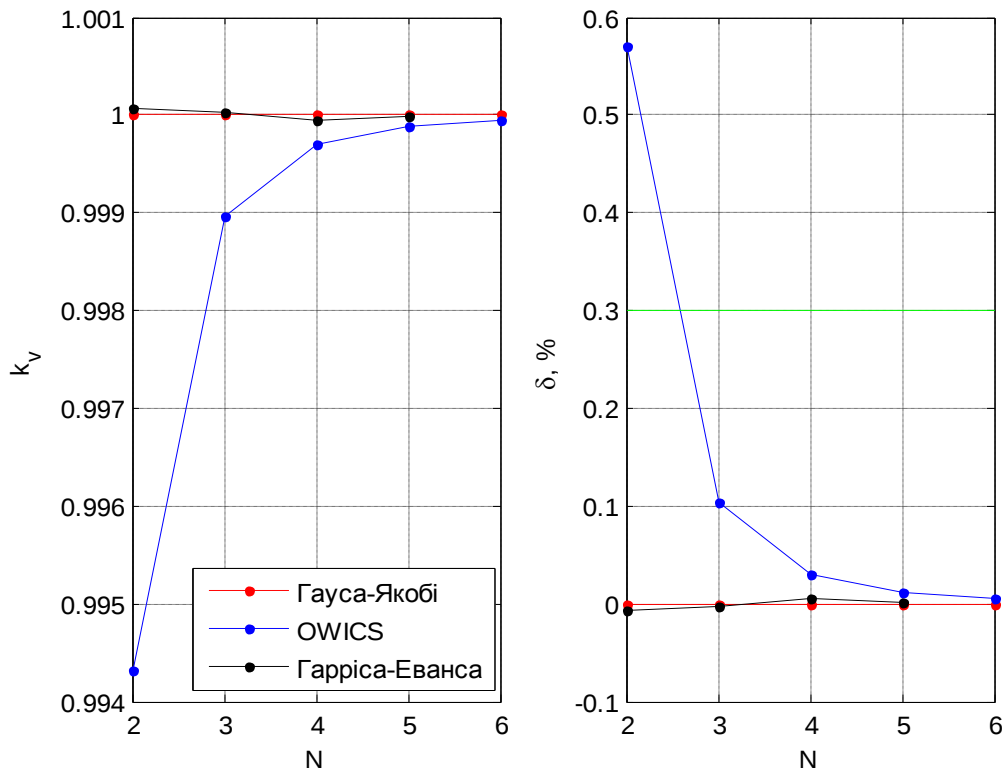


Рис. 2. Залежності $k_v = f(N)$ та $\delta = f(N)$ при ламінарному режимі руху потоку

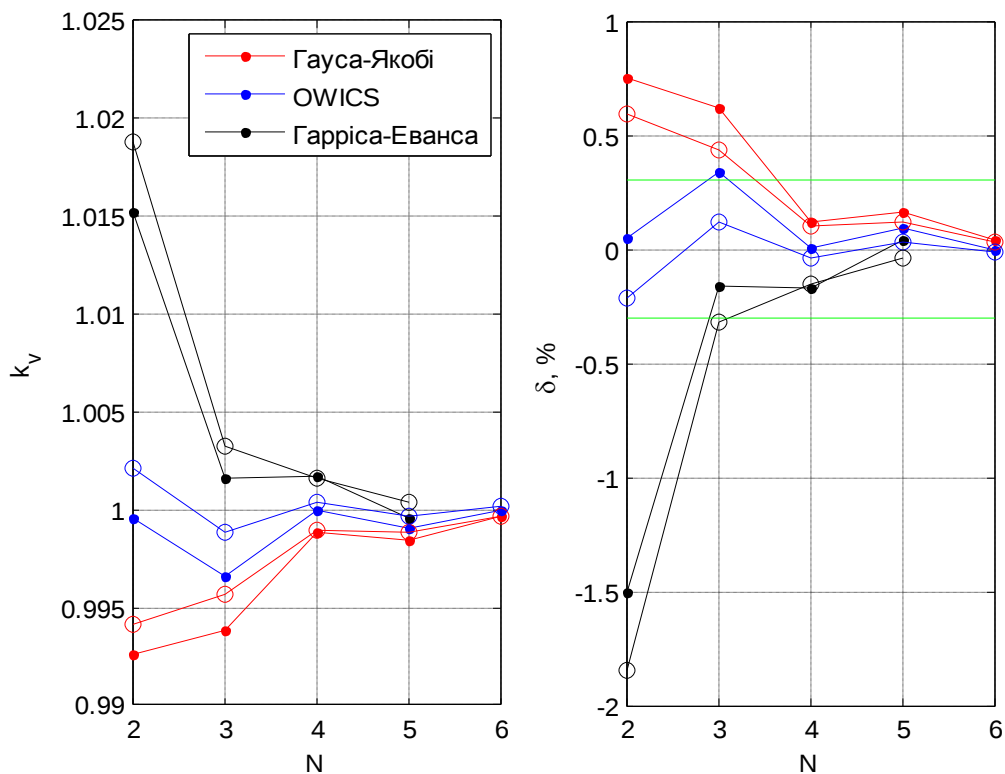


Рис. 3. Залежності $k_v = f(N)$ та $\delta = f(N)$ при турбулентному режимі руху потоку та гладкій трубці:
 • – $Re(min) = 4 \cdot 10^3$; ○ – $Re(max) = 3,24 \cdot 10^6$

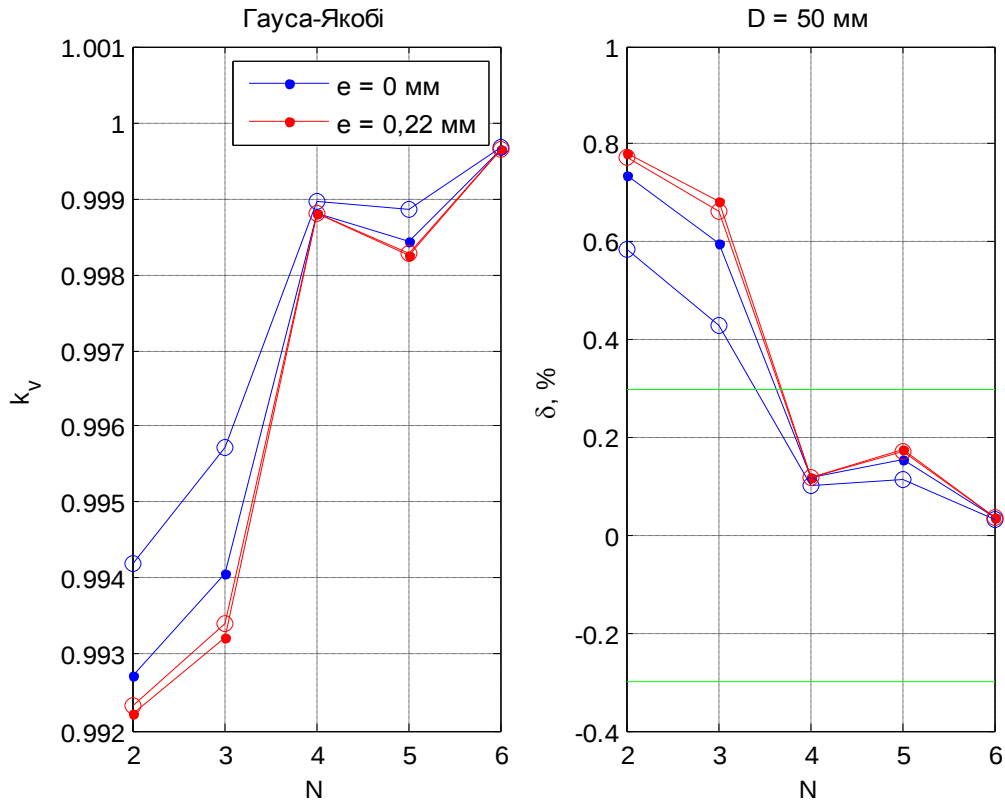


Рис. 4. Залежності $k_v = f(N)$ та $\delta = f(N)$ при турбулентному режимі руху потоку та шорсткій трубі:
 • – $\text{Re}(\min) = 4 \cdot 10^3$; $\circ$ – $\text{Re}(\max) = 3,24 \cdot 10^6$

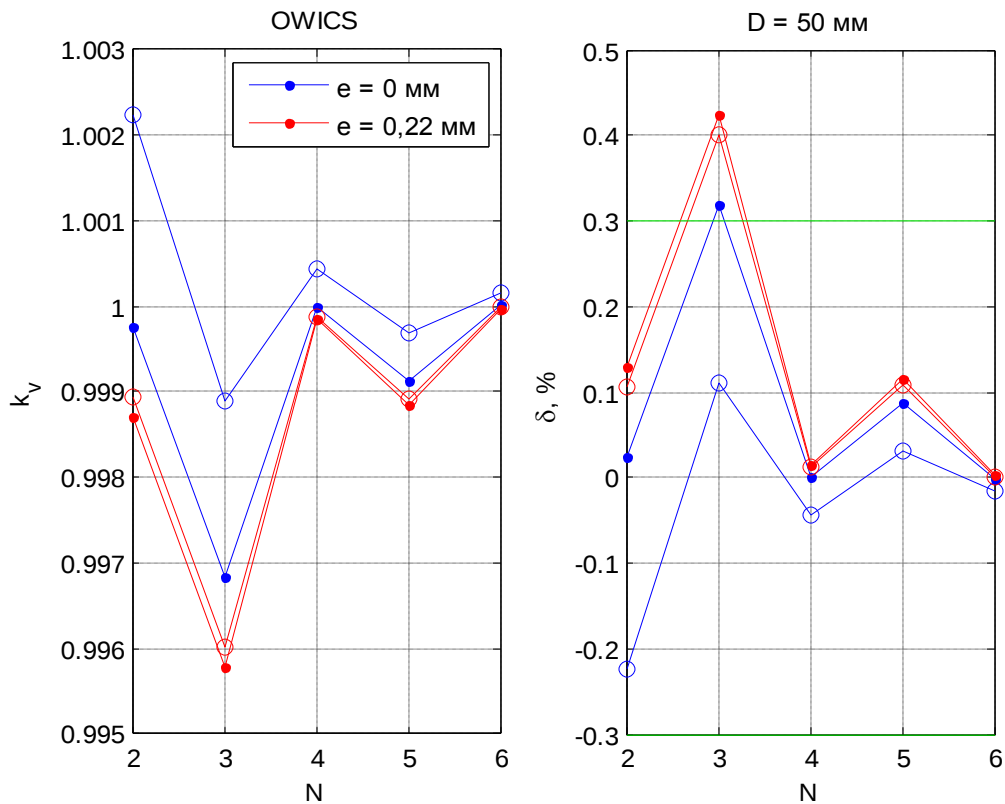


Рис. 5. Залежності $k_v = f(N)$ та $\delta = f(N)$ при турбулентному режимі руху потоку та шорсткій трубі:
 • – $\text{Re}(\min) = 4 \cdot 10^3$; $\circ$ – $\text{Re}(\max) = 3,24 \cdot 10^6$

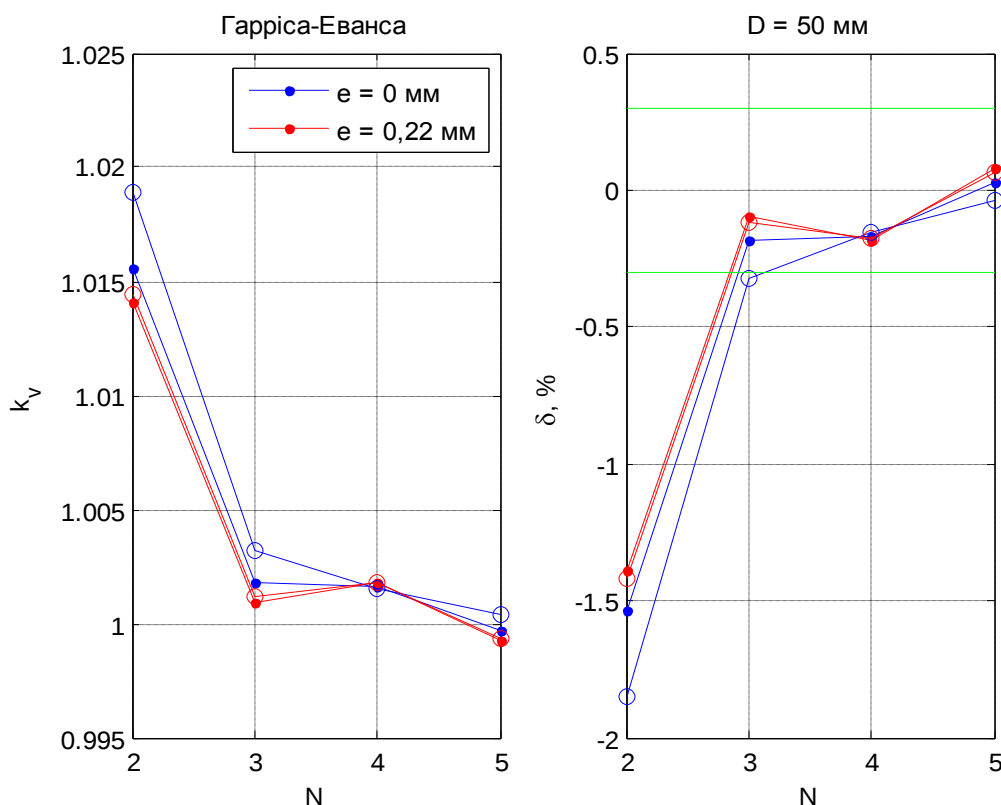


Рис. 6. Залежності $k_v = f(N)$ та $\delta = f(N)$ при турбулентному режимі руху потоку та шорсткій трубі:
 • – $Re(\min) = 4 \cdot 10^3$; ○ – $Re(\max) = 3,24 \cdot 10^6$

Як видно з рис. 3, за турбулентного режиму руху потоку та відсутності шорсткості внутрішньої поверхні стінки ВТ, для двоканальних УЗВ досягти рекомендованих стандартом ISO 17089-1 [3] меж в $\pm 0,3$ % без застосування коефіцієнта k_v не вдається, окрім ЧМІ OWICS. В свою чергу, цього вдається досягти для всіх УЗВ (всі ЧМІ) з $N \geq 4$ на всьому діапазоні числа Рейнольдса $Re = 4 \cdot 10^3 \dots 3,24 \cdot 10^6$. У випадку $N = 3$, вибір ЧМІ впливатиме на покази УЗВ в залежності від того, за якого саме режиму руху відбувається вимірювання, проте це не стосується ЧМІ Гауса-Якобі.

На рис. 4 – 6 зображено графіки залежностей $k_v = f(N)$ та $\delta = f(N)$ за турбулентного режиму руху потоку при різних значеннях шорсткості внутрішньої поверхні стінки ВТ: рис. 4 – для УЗВ за ЧМІ Гауса-Якобі, рис. 5 – для УЗВ за ЧМІ OWICS та рис. 6 – для УЗВ за ЧМІ Гарріса-Еванса. При цьому, результати наведені для найменшого ($Re = 40 \cdot 10^3$) та найбільшого значення числа Рейнольдса ($Re = 3,24 \cdot 10^6$) – діапазон дії степеневого закону розподілу згідно праць [12, 13]. За результатами аналізу цих даних, можна зробити такі висновки:

а) коефіцієнт k_v стабільно прямує до 1 зі збільшенням кількістю АК УЗВ (для всіх ЧМІ); при цьому, різниця між кривими (синя – гладка труба та червона – труба за відносної шорсткості 0,22) існує, але вона є мінімальною і залежить від кількості АК; найгірша ситуація для $N = 2$ при високих значеннях числа Re (0,002 абсолютні одиниці для ЧМІ Гауса-Якобі, 0,0032 абсолютні одиниці для ЧМІ OWICS, 0,003 абсолютні одиниці для ЧМІ Гарріса-Еванса); зі зменшенням числа Re та збільшенням числа АК, цей ефект стає ще меншим; отже, суттєвого впливу шорсткості внутрішньої поверхні стінки ВТ на значення k_v багатоканальних хордових УЗВ (для всіх ЧМІ, особливо при великій кількості АК) не робить – отже, ним можна знехтувати;

б) похибка δ стабільно прямує до 0 (чи до меж в $\pm 0,3$ %) зі збільшенням кількістю АК УЗВ (для всіх ЧМІ), а вплив шорсткості внутрішньої поверхні стінки ВТ проявляється найбільше

за максимального значення $Re = 3,24 \cdot 10^6$ таким чином: при $N = 6$, максимальна відмінність між значеннями похибки δ для гладкої та шорсткої внутрішньої поверхнею стінки ВТ складає – для УЗВ за ЧМІ Гауса-Якобі $\sim 0,0016 \%$, для УЗВ за ЧМІ OWICS $\sim 0,016 \%$; при $N = 5$, максимальна відмінність між значеннями похибки δ для гладкої та шорсткої внутрішньої поверхнею стінки ВТ складає – для УЗВ за ЧМІ Гауса-Якобі $\sim 0,056 \%$, для УЗВ за ЧМІ OWICS $\sim 0,07 \%$, і для УЗВ за ЧМІ Гарріса-Еванса $\sim 0,1 \%$; при $N = 4$, максимальна відмінність між значеннями похибки δ для гладкої та шорсткої внутрішньої поверхнею стінки ВТ складає – для УЗВ за ЧМІ Гауса-Якобі $\sim 0,016 \%$, для УЗВ за ЧМІ OWICS $\sim 0,05 \%$, і для УЗВ за ЧМІ Гарріса-Еванса $\sim 0,02 \%$; при $N = 3$, максимальна відмінність між значеннями похибки δ для гладкої та шорсткої внутрішньої поверхнею стінки ВТ складає – для УЗВ за ЧМІ Гауса-Якобі $\sim 0,23 \%$, для УЗВ за ЧМІ OWICS $\sim 0,29 \%$, і для УЗВ за ЧМІ Гарріса-Еванса $\sim 0,2 \%$; при $N = 2$, максимальна відмінність між значеннями похибки δ для гладкої та шорсткої внутрішньої поверхнею стінки ВТ складає – для УЗВ за ЧМІ Гауса-Якобі $\sim 0,19 \%$, для УЗВ за ЧМІ OWICS $\sim 0,32 \%$, і для УЗВ за ЧМІ Гарріса-Еванса $\sim 0,43 \%$; не важко помітити, що ця зміна відчутна тільки для $N \leq 3$, коли значення δ зростає при збільшенні шорсткості (ЧМІ OWICS та Гауса-Якобі);

в) як результат, для ВТ із шорсткістю внутрішньої поверхні стінки ВТ і високими вимогами до точності вимірювань, необхідно обирати багатоканальні хордові УЗВ із оптимальною кількістю АК в $N \geq 4$ (для нівелювання впливу цього ефекту встановлення).

Висновки та перспективи подальших досліджень

За результатами проведених досліджень впливу режиму руху потоку та шорсткості внутрішньої поверхні стінки ВТ на похибку хордових УЗВ, сформовано наступні висновки:

1) за ламінарного режиму руху потоку (параболічний закон розподілу) похибка вимірювання витрати (за умов відсутності спотворень профілю швидкості) не залежить ані від числа Re , ані від величини шорсткості внутрішньої поверхні стінки ВТ, ані від кількості хордових АК УЗВ (її значення менше $\pm 0,3 \%$); проте, у випадку застосування ЧМІ OWICS, кількість АК все ж буде впливати, але тільки при $N = 2$ – значення похибки δ майже у два рази перевищує допустимі межі в $\pm 0,3 \%$ ($\delta = \sim 0,5711 \%$);

2) за турбулентного режиму руху потоку (степеневий закон розподілу) та відсутності шорсткості внутрішньої поверхні стінки ВТ, похибка вимірювання витрати (за умов відсутності спотворень профілю швидкості) залежить від числа Re – її значення додатньо зростає при зменшенні числа Re , проте, при УЗВ з $N \geq 4$, цим впливом можна знехтувати, адже $\delta \leq \pm 0,3 \%$; при УЗВ з $N \leq 3$, вплив режиму руху можна зменшувати вибором оптимального розташування та вагових коефіцієнтів АК (до прикладу, за ЧМІ OWICS);

3) за турбулентного режиму руху потоку (степеневий закон розподілу) та наявності шорсткості внутрішньої поверхні стінки ВТ (модифіковане рівняння Колбрука-Уайта), похибка вимірювання витрати (за умов відсутності спотворень профілю швидкості) буде мати ту саму поведінку, що і при відсутності шорсткості, тобто, шорсткість внутрішньої поверхні стінки ВТ суттєво не впливає на похибку вимірювання витрати багатоканальних хордових УЗВ, особливо на ВТ великих діаметрів ($D > 50$ мм);

4) для вимірювання витрати та кількості плинних енергоносіїв з високими вимогами до точності, рекомендуємо обирати багатоканальні хордові УЗВ із кількістю АК $N \geq 4$, нівелюючи цим вплив режиму руху потоку та шорсткості внутрішньої поверхні стінки ВТ.

Як перспектива подальших досліджень є розробка алгоритмів розрахунку впливу ефектів встановлення УЗВ та інтеграція їх до комп'ютерної програми *AutoDesignUSM* для автоматизованого проєктування витратомірів ультразвукового типу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Білінський Й. Й., Стеценко А. А. Огляд сучасних тенденцій розвитку ультразвукових лічильників. *Наукові праці ВНТУ*. 2024. №4. URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/757>.

2. Lunde P., Frøysa K-E. Ultrasonic fiscal oil metering stations: handbook of uncertainty calculations. Oslo : Norwegian Society of Oil and Gas Measurement (NFOGM), 2001. 273 p. URL: <https://nfogm.no/wp-content/uploads/2014/04/Handbook-USM-fiscal-gas-metering-stations.pdf>.
3. ISO 17089-1:2019. Measurement of fluid flow in closed conduits – Ultrasonic meters for gas. Part 1: Meters for custody transfer and allocation measurement. – Replaces ISO 17089-1:2010 ; effective from 2019-08-01. Official edition. Geneva : International Organization for Standardization, 2019. 114 p.
4. Роман В. І. Вплив режиму руху потоку та шорсткості трубопроводу на похибку діаметральних ультразвукових витратомірів. *Наукові праці ВНТУ*. 2024. № 4. URL: <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2024-4-29-39>.
5. Zanker K. The effects of reynolds number, wall roughness, and profile asymmetry on single-and multipath ultrasonic meters. *XVII International North Sea Flow Measurement Workshop*, Oslo, 25-28 October 1999. P. 1-14. URL: <https://nfogm.no/wp-content/uploads/2019/02/1999-10-The-Effects-of-Reynolds-Number-Wall-Roughness-and-Profile-Asymmetry-on-Single-and-Multi-Path-USM-Zanker-Daniel.pdf>.
6. Orlando A. F., Ferreira A. L., Pinheiro J. A. Influence of Pipe Roughness on the Performance of Ultrasonic Meters for Flow Rate Measurement. *International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE-2011)*, Denver, November 11-17, 2011. URL: <https://doi.org/10.1115/IMECE2011-65210>.
7. Calogirou A., Boekhoven J., Henkes R. A. W. M. Effect of wall roughness changes on ultrasonic gas flowmeters. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2001. Vol. 12. P. 219–229. URL: [https://doi.org/10.1016/S0955-5986\(01\)00014-0](https://doi.org/10.1016/S0955-5986(01)00014-0).
8. Gryshanova I., Rak A., Korobko I. The investigation of the correction factor for ultrasonic flow meters. *Measurement*. 2023. Vol. 219. URL: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113326>.
9. Abramovitz M., Stegun I.. Handbook of mathematical function with formulas, graphs, and mathematical tables. New York : NBS, 1964. 1046 p. URL: <https://physicsgg.me/wp-content/uploads/2019/11/handbook-of-mathematical-functions-by-m.-abramowitz-i.-stegun.pdf>.
10. Tresch T., Gruber P., Staubli T. Comparison of integration methods for multipath acoustic discharge measurements. *VI International Conference on International Group for Hydraulic Efficiency Measurement (IGHM)*, Portland, July 30 – August 1 2006. URL: <https://www.ighem.org/Paper2006/d6.pdf>.
11. Pannel C. N., Evans C. N., Jackson D. A. A new integration technique for flowmeters with chordal paths. *Flow Measurement Instrumentation*. 1990. Vol. 1. P. 216–224. URL: [https://doi.org/10.1016/0955-5986\(90\)90016-Z](https://doi.org/10.1016/0955-5986(90)90016-Z).
12. Кулик М. С., Мовчан В. Т., Шквар Є. О. Математичні моделі пристінної турбулентності. Київ : НАУ, 2012. 356 с.
13. Schlichting H., Gersten K. Boundary Layer Theory. Berlin : Springer, 2017. 814 p. URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-662-52919-5.pdf>.

Стаття надійшла до редакції 16.01.2025.

Стаття пройшла рецензування 23.01.2025.

Роман Віталій Іванович – канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації та комп’ютерно-інтегрованих технологій, e-mail: vitalii.i.roman@lpnu.ua.

Левченко Андрій Сергійович – магістрант кафедри автоматизації та комп’ютерно-інтегрованих технологій, e-mail: andrii.levchenko.mnavm.2023@lpnu.ua.

Національний університет «Львівська політехніка».