

В. І. Роман, канд. техн. наук

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

Стаття присвячена дослідженню впливу режиму руху потоку та шорсткості внутрішньої поверхні стінки вимірювального трубопроводу (ВТ) на похибку одноканальних діаметральних ультразвукових витратомірів (УЗВ) для задач їх автоматизованого проектування. Виконавши аналіз наявних законів розподілу швидкості потоку в поперечному перерізі ВТ, було обрано поширений в подібних наукових задачах степеневий закон, на базі якого виконано подальші комп'ютерні моделювання. Так, при роботі діаметральних УЗВ в ламінарному режимі руху потоку, його похибка вимірювання швидкості ніяк не залежить від шорсткості внутрішньої поверхні стінки ВТ та конкретного значення числа Рейнольдса (Re) – коефіцієнт поправки на профіль потоку (k_v), який зазвичай потребує діаметральний УЗВ для приведення вимірної швидкості потоку до усередненої швидкості по перерізу ВТ, на всьому діапазоні ламінарного режиму ($Re < 2300$) рівний 0,75. Під час роботи діаметрального УЗВ в турбулентному режимі руху потоку ($Re > 4000$), похибка вимірювання швидкості УЗВ залежить від числа Рейнольдса та шорсткості: а) для гладкої труби, похибка знаходиться в діапазоні 4...9 % і зменшується при зростанні числа Рейнольдса – для врахування цього ефекту, в роботі запропоновано дві формули для визначення експоненти степеневого закону $n = f(Re)$, яка входить до універсального рівняння розрахунку коефіцієнта $k_v = f(n)$ діаметрального УЗВ; б) для негладкої труби, похибка вимірювання швидкості УЗВ зростає (на додаток до її природи на гладкій трубі) зі збільшенням значення абсолютної шорсткості (e), проте, цей ефект сповільнюється зі збільшенням діаметра ВТ (D) – для врахування цього ефекту, в роботі запропоновано три інші формули для визначення експоненти степеневого закону $n = f(Re, e, D)$, які окрім числа Рейнольдса враховують абсолютну шорсткість внутрішньої поверхні стінки ВТ та його діаметр. Всі п'ять відібраних формул для визначення експоненти степеневого закону розподілу запропоновано інтегрувати до раніше розробленої комп'ютерної програми AutoDesignUSM для автоматизованого проектування УЗВ, що дозволить враховувати на етапі розробки нових конструкцій витратомірів, вплив на їх похибку режиму руху потоку та шорсткості внутрішньої поверхні стінки ВТ.

Ключові слова: режим руху потоку, шорсткість, похибка вимірювання, діаметральний ультразвуковий витратомір, степеневий закон розподілу, автоматизоване проектування, коефіцієнт поправки, профіль потоку.

Актуальність дослідження

Завдяки високій точності та надійності вимірювань, ультразвукові витратоміри (УЗВ) набули широкого застосування в різних галузях промисловості. Точність будь яких витратомірів, зокрема і діаметральних УЗВ, залежить від різних факторів [1, 2], які впливають з умов їх експлуатації та конструкції. Перед введенням в експлуатацію всі УЗВ згідно основного міжнародного стандарту по ультразвуковій витратометрії ISO17089, повинні пройти калібрування в спеціалізованих лабораторіях або по місцю експлуатації за робочих умов потоку. При цьому, калібрування по місцю рекомендовано проводити якщо [1, 2]: цього вимагають вимоги національного законодавства; існують високі вимоги до точності; УЗВ застосовується для комерційних цілей, і не відноситься до 1 та 2 класу. Проте, під час застосування УЗВ для вимірювання витрати високовартісних енергоносіїв, до прикладу в газотранспортній системі чи енергетиці, можуть виникати труднощі їх калібрування по місцю роботи – це важко або технічно неможливо реалізувати. В такому випадку, виникає актуальна потреба встановити залежність показів УЗВ від різних зовнішніх факторів, зокрема, від

режиму руху потоку та шорсткості внутрішньої поверхні стінки вимірювального трубопроводу (ВТ). Така залежність буде корисна не тільки для робочого витратоміра як калібрувальна крива, а й важливе джерело даних під час проєктування нових та науковому дослідженні наявних конструкцій УЗВ всіх типів [3, 4].

Аналіз публікацій за темою дослідження

Дослідженню природи та впливу режиму руху потоку та шорсткості внутрішньої поверхні стінки ВТ на динаміку вимірювального потоку, присвячено багато наукових праць, які зокрема висвітлені в книзі Шліхтінга [5] або Бенедикта [6], чи до прикладу, в монографії українських науковців [7]. Що стосується вивчення впливу шорсткості на покази УЗВ, то тут проведено чимало наукових досліджень [8 – 10], найважливіші результати та практичні рекомендації з яких сконцентровані в двох частинах стандарту ISO 17089 [1, 2].

За результатами проведеного аналізу ISO 17089 щодо впливу шорсткості внутрішньої поверхні стінки ВТ на похибку УЗВ, в роботі виокремлено основні аспекти такого впливу:

1. Розрахунок коефіцієнта поправки на профіль потоку (k_v), через який визначається вплив режиму руху потоку на покази УЗВ. Для діаметральних [п. 4.4.3.3, 2] УЗВ, коефіцієнт k_v є актуальним тільки за умови осесиметричності потоку (відсутність спотворень) та повної його розвиненості. Коефіцієнт k_v є функцією числа Рейнольдса (Re), шорсткості внутрішньої поверхні стінки ВТ та конфігурації АК (у випадку недіаметральних, хордових УЗВ). Застосування коефіцієнта k_v для конкретного УЗВ визначається виробником; якщо така корекція присутня, її ефективність зазвичай залежить від даних про в'язкість вимірювальної речовини, оскільки на основі них можна розрахувати число Re , а отже, застосувати залежність $k_v = f(Re)$. Якщо профіль потоку спотворений, коефіцієнт k_v для повністю розвиненого потоку більше не застосовується [2].

2. Вплив на гідродинамічну похибку за рахунок зміни площі поперечного перерізу ВТ. Для нових спроектованих УЗВ, внутрішні поверхні мають бути сконструйовані так, щоб протистояти змінам внутрішньої площі поперечного перерізу та шорсткості настільки, щоб точність витратоміра не була порушена [п. 5.2.1, 1]. Для наявних УЗВ, відкладення на внутрішній поверхні стінки ВТ через нормальні умови транспортування газу (конденсат або сліди масла, змішані з окалиною, брудом або піском), можуть вплинути на точність; такі самі наслідки можуть виникнути через іржавіння необроблених внутрішніх поверхонь або пошкоджене внутрішнє покриття. Тому, внутрішню поверхню та шорсткість стінки необхідно контролювати на наявність змін за допомогою діагностики УЗВ, а також оптичних (візуальних) методів [п.5.9.3.6, 1] та [п.5.16.5, 2]. Для УЗВ, що проходять перекалібрування в польових умовах, слід дотримуватися особливих умов щодо транспортування витратоміра, щоб запобігти зміні шорсткості внутрішньої поверхні стінки або її забрудненню [п. 7.6.4.1, 1].

Мета дослідження

Зважаючи на актуальність дослідження та результати аналізу публікацій за темою дослідження, вплив режиму руху потоку та шорсткості внутрішньої поверхні стінки ВТ на похибку УЗВ є важливими факторами, як під час експлуатації, так і під час проєктування нових витратомірів. А отже, вони повинні бути доступними для використання в розробленій раніше комп'ютерній програмі *AutoDesignUSM* [3] для автоматизованого проєктування УЗВ. Згідно цього висновку, **в цій статті поставлено за мету:**

а) детально дослідити вплив режиму руху потоку та шорсткості внутрішньої поверхні стінки ВТ на покази діаметральних УЗВ;

б) встановити, які відомі аналітичні залежності доцільно використовувати під час автоматизованого проєктування діаметральних УЗВ для визначення впливу на їх похибку режиму руху потоку та шорсткості внутрішньої поверхні стінки ВТ.

Виклад основного матеріалу дослідження

Шорсткість поверхні є важливим показником у технічній характеристиці виробу та точності його виготовлення, що впливає на експлуатаційні властивості деталей і вузлів машин. З точки зору вимірювання витрати, шорсткість, це виступи на внутрішній поверхні стінки ВТ, які впливають на втрати напору по довжині при турбулентному режимі потоку.

Згідно державного стандарту ДСТУ ISO 4287:2012, шорсткість поверхні можна оцінювати за шістьма параметрами, з яких для характеристики шорсткості внутрішньої поверхні стінки ВТ в цій роботі було обрано середню висоту виступів, яку ще називають абсолютною шорсткістю. Поряд з нею, часто застосовують відносну шорсткість – відношення абсолютної шорсткості до діаметра (радіуса) ВТ. Слід наголосити, що виступи шорсткості розподіляються на поверхні внутрішніх стінок ВТ рівномірно або нерівномірно, а також можуть мати різну форму й розміри. Для ВТ промислового асортименту, через технологічну недосконалість їх виготовлення, шорсткість розподілена нерівномірно. Проте у випадках штучної шорсткості (до прикладу, у дослідях Нікурадзе), шорсткість рівномірна за висотою.

Як відомо, вплив режиму руху потоку (або розподіл швидкості потоку) на покази одноканального діаметрального УЗВ прийнято оцінювати через коефіцієнт поправки на профіль швидкості потоку k_v [1, 2]:

$$k_v = \frac{U_s}{U_{USM}}, \quad (1)$$

де U_s – усереднена швидкість потоку по всій площі поперечного перерізу ВТ; U_{USM} – усереднена швидкість потоку вздовж діаметрального АК УЗВ. Слід зауважити, що формула (1) справедлива тільки для діаметральних УЗВ.

Для циліндричної труби з круглим поперечним перерізом, для аналітичного обчислення k_v , необхідно знати закон розподілу швидкостей в поперечному перерізі труби радіусом R (в подальшому буде вжито скорочений термін «закон розподілу» та позначення U_R) [5 – 7]. Зважаючи на це, формула для розрахунку швидкості U_s матиме такий вигляд [8 – 11]:

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

В свою чергу, формула для розрахунку швидкості U_{USM} для діаметральних одноканальних УЗВ має такий вигляд [8 – 11]:

$$U_{USM} = \frac{1}{R} \int_0^R U_R dr. \quad (3)$$

Закон розподілу U_R залежить від багатьох факторів, як от в'язкість та густина речовини, середня швидкість потоку, розмір ВТ, стан внутрішньої поверхні стінки ВТ (її шорсткість), рівень турбулентності та інші [5 – 7].

Зважаючи на тематику цієї статті, виокремимо основні фактори, які впливають на те, яким буде закон розподілу неспотвореного потоку – режим руху потоку (ламінальний, турбулентний) та стан внутрішньої поверхні стінки ВТ (гладка, шорстка). В цій роботі не розглядається перехідний режим руху потоку, що обмежений таким приблизним діапазоном числа Рейнольдса $2300 < Re < 4000$.

Розглянемо згадані фактори детальніше:

1. Ламінарний режим руху потоку для ВТ з гладкою внутрішньою поверхнею стінки.

Для гладкої поверхні при ламінарному режимі ($Re < 2300$), поширеним є *параболічний закон розподілу*, формула якого має такий вигляд [5 – 7]:

$$U_R = 1 - r^2, \quad (4)$$

де r – відстань від центру труби (радіальна координата). Для цієї формули швидкість потоку є

відносною (або нормалізованою), тобто максимальне її значення в центрі труби рівне 1.

2. Ламінарний режим руху потоку для ВТ з шорсткою внутрішньою поверхнею стінки.

Згідно Шліхтінга [5], ефект шорсткості внутрішньої поверхні стінок ВТ в ламінарному потоці має такий самий вплив, як і для гладкої труби. Зважаючи на вище сказане, підставимо формулу (4) в (1 – 3), і отримаємо значення $k_v = 0,75$. Тобто, за ламінарного режиму при гладкій чи шорсткій трубі, значення k_v для діаметральних УЗВ завжди рівне 0,75.

3. Турбулентний режим руху потоку для ВТ з гладкою внутрішньою поверхнею стінки.

Для гладкої поверхні внутрішньої стінки ВТ при турбулентному режимі ($Re > 4000$), поширеним є *степеневий закон (power law) розподілу*, формула якого має такий вигляд [5 – 7]:

$$U_R = u_{\max} \left(\frac{1-r}{R} \right)^{1/n}, \tag{5}$$

де u_{\max} – максимальна осьова швидкість в центрі труби (в цій статті $u_{\max} = 1$); $1/n$ – турбулентний показник степеня, в якому експонента Нікурадзе n , очевидно, є функцією числа Re [5 – 7].

Маючи значення n , формулу (1) можна записати в такому універсальному вигляді [8 – 11]:

$$k_v = \frac{2n}{(2n+1)}. \tag{6}$$

Нікурадзе провів дуже ретельні заміри опору й розподілу швидкостей для гладких труб у широкому діапазоні чисел Рейнольдса: $4 \cdot 10^3 \leq Re \leq 3,2 \cdot 10^6$. Для найменшого з чисел $Re = 4 \cdot 10^3$ в експериментах Нікурадзе показник степеня в (5) дорівнює $n = 6$, для $Re = 110 \cdot 10^3$ експонента $n = 7$, а для найбільшого з чисел $Re = 324 \cdot 10^4 n = 10$ [7]. В книгах по витратометрії та гідродинаміці, а також наукових статтях, можна знайти розроблені науковцями аналітичні залежності $n = f(Re)$ для різних діапазонів числа Re [12] та їх експериментальне тестування [12, 13].

На базі даних численних експериментальних досліджень степеневому закону розподілу (5), науковцями розроблено різні напівемпіричні залежності $k_v = f(Re)$ [3, 8, 11 – 13].

За даними експериментальних досліджень, взятих з праці [12], встановлено, що застосування трьох різних формул для визначення n :

$$\begin{cases} n = 2,1 \lg(Re) - 1,9 \rightarrow 5 \cdot 10^5 < Re < 10^7 \\ n = 7 \rightarrow 10^4 < Re < 2 \cdot 10^4 \end{cases}, \tag{7.1}$$

$$n = 1,66 \lg(Re), \tag{7.2}$$

$$\begin{cases} n = 3,299 + 0,326 \ln(Re) \rightarrow Re < 4 \cdot 10^5 \\ n = 5,537 + 5,498 \cdot 10^6 \ln^5(Re) \rightarrow Re > 4 \cdot 10^5 \end{cases}, \tag{7.3}$$

де (7.1), (7.2), (7.3), істотно не вплинуло на похибку визначення коефіцієнта k_v за формулою (6), показуючи максимальну відносну похибки менше $\pm 1\%$ [12].

В цій роботі для дослідження впливу на похибку УЗВ режиму руху потоку (через число Re) обрано дві аналітичні залежності $n = f(Re)$ для гладкої труби:

– формула з роботи [14]:

$$n = \frac{1}{0,2525 - 0,0229 \lg(Re)}; \tag{8}$$

– формула зі статті [11]:

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

Іншим законом розподілу, яким можна описати турбулентний режим руху для гладкої поверхні внутрішньої стінки ВТ, є так званий *закон стінки (law of the wall)* або *логарифмічний закон стінки* [5 – 7]. В праці українських вчених [15], згадується подібний підхід, коли базуючись на теорії пограничного шару, розроблено уточнену модель закону розподілу швидкості турбулентного потоку апроксимацією відомих експериментальних даних. Згідно цієї моделі, в поперечному перетині потоку виділяють три зони: пристіночний в'язкий прошарок, буферний проміжний прошарок і зону розвинутої турбулентної течії. Зміна швидкості потоку вздовж радіальної координати в кожній із зон описується своєю функціональною залежністю. На основі цієї удосконаленої моделі закону розподілу, авторами розроблено та апробовано власну формулу для залежності $k_v = f(Re)$ [15]. Єдина незручність, яка виникає при застосуванні залежності запропонованої авторами в статті [15] – необхідно знайти додатковий параметр шляхом розв'язування відповідного рівняння методом послідовного наближення.

4. Турбулентний режим руху потоку для ВТ з шорсткою внутрішньою поверхнею стінки.

Досліджуючи втрати потоку при наявності тертя в трубі, Прандтль та Нікурадзе встановили, що коефіцієнт гідравлічного тертя (опору) (λ) залежить від числа Re та відносної шорсткості стінки ВТ до його діаметра або радіуса [5 – 7]. Тривалий час для визначення λ користувались номограмами, які були одержані на підставі експериментальних досліджень. Навіть сьогодні, номограми є найбільш точним механізмом визначення значення λ . Номограму для визначення λ для сталевих труб залежно від відносної шорсткості та числа Re в науковій літературі називають діаграмою *Moody* [16].

Попри це, користуватись номограмами не є зручно під час застосування комп'ютерної техніки (під час розрахунків), а тому, науковцями було розроблено ряд залежностей, які рекомендовані для гідравлічних розрахунків ВТ.

Одне з найбільш прийнятих залежностей є рівняння *Colbrook-White* за умов турбулентного режиму в зоні змішаного тертя в такому [16, 17]:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{e}{3,7D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} \right), \quad (10)$$

або такому вигляді [8, 9]:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1,74 - 2 \lg \left(\frac{2e}{D} + \frac{18,7}{Re \sqrt{\lambda}} \right), \quad (11)$$

де e – абсолютна (еквівалентна) шорсткість внутрішньої поверхні стінки ВТ, в метричних одиницях; $D = 2R$ – діаметр ВТ.

Для гідравлічно гладких труб вплив відносної шорсткості e/D значно менший, а тому залежності (10 – 11) набувають такого [16, 17]:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} \right), \quad (12)$$

або такого вигляду [8, 9]:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1,74 - 2 \lg \left(\frac{18,7}{Re \sqrt{\lambda}} \right). \quad (13)$$

Відповідно, для зони квадратичного тертя (опір руху речовини обумовлений переважно турбулентними ефектами, а не в'язкими силами) вплив числа Re суттєво зменшується, тому залежності (10 – 11) набувають такого [16, 17]:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{e}{3,7D} \right), \quad (14)$$

або такого вигляду [8, 9]:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1,74 - 2 \lg \left(\frac{2e}{D} \right). \quad (15)$$

В 1956 році американською організацією *Bureau of Mines* було запропоноване модифіковане рівняння *Colbrook-White*. В цьому рівнянні значення коефіцієнта λ дещо більше від немодифікованого рівняння. Розробники аргументували збільшення емпіричних коефіцієнтів рівняння тим, що внаслідок збільшення втрат тиску встановлюється більш усталені значення параметрів потоку газу [16].

Модифіковане рівняння *Colbrook-White* має такий вигляд [16]:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{e}{3,7D} + \frac{2,825}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} \right). \quad (16)$$

В 2001 році *Calogirou* та інші [10], вивчивши вплив зміни шорсткості внутрішньої поверхні стінки ВТ на УЗВ газу, щоб краще відповідати експериментальним даним, видозмінили формулу (11) до такого вигляду:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2,065 - 1,884 \lg \left(\frac{2e}{D} + \frac{18,7}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} \right). \quad (17)$$

Дослідження Нуннера показали, що показник степеня n залежить від коефіцієнта опору й виражається наближеною формулою виду [7, 8]:

$$\frac{1}{n} = \sqrt{\lambda}. \quad (18)$$

Враховуючи формулу (18), рівняння *Colbrook-White* та *Calogirou* можна записати зручним способом для застосування в парі зі степеневим законом розподілу [8], враховуючи при цьому шорсткість внутрішньої поверхні стінки ВТ через значення абсолютної шорсткості e .

1. Звичайне рівняння *Colbrook-White*:

$$n = -2 \lg \left(\frac{e}{3,7D} + \frac{2,51n}{\text{Re}} \right), \quad (19)$$

або:

$$n = 1,74 - 2 \lg \left(\frac{2e}{D} + \frac{18,7n}{\text{Re}} \right). \quad (20)$$

2. Модифіковане рівняння *Colbrook-White*:

$$n = -2 \lg \left(\frac{e}{3,7D} + \frac{2,825n}{\text{Re}} \right). \quad (21)$$

3. Рівняння *Calogirou*:

$$n = 2,065 - 1,884 \lg \left(\frac{2e}{D} + \frac{18,7n}{\text{Re}} \right). \quad (22)$$

Для знаходження n з рівняння (19 – 22) слід розв'язувати їх методом послідовного наближення, як от із використанням алгоритму Левенберга-Марквардта в *MATLAB* (функція *fsolve*). Саме ці формули запропоновано використовувати в комп'ютерній програмі *AutoDesignUSM* під час вирішення задач проектування УЗВ із врахуванням шорсткості

внутрішньої поверхні стінки ВТ.

Для оцінки впливу режиму руху потоку та шорсткості внутрішньої поверхні стінки ВТ, використано відносну похибку вимірювання швидкості УЗВ за формулою виду [18]:

$$\delta = 100 \frac{(U_{USM} - U_S)}{U_S}. \quad (23)$$

На рис. 1 показано результати розрахунку похибки УЗВ δ та коефіцієнта k_v як функції числа Рейнольдса для гладкої труби із використанням формул (8 – 9) та формул, отриманих із врахуванням коефіцієнта гідравлічного тертя (19), (21 – 22), в яких відносна шорсткість рівна нулю.

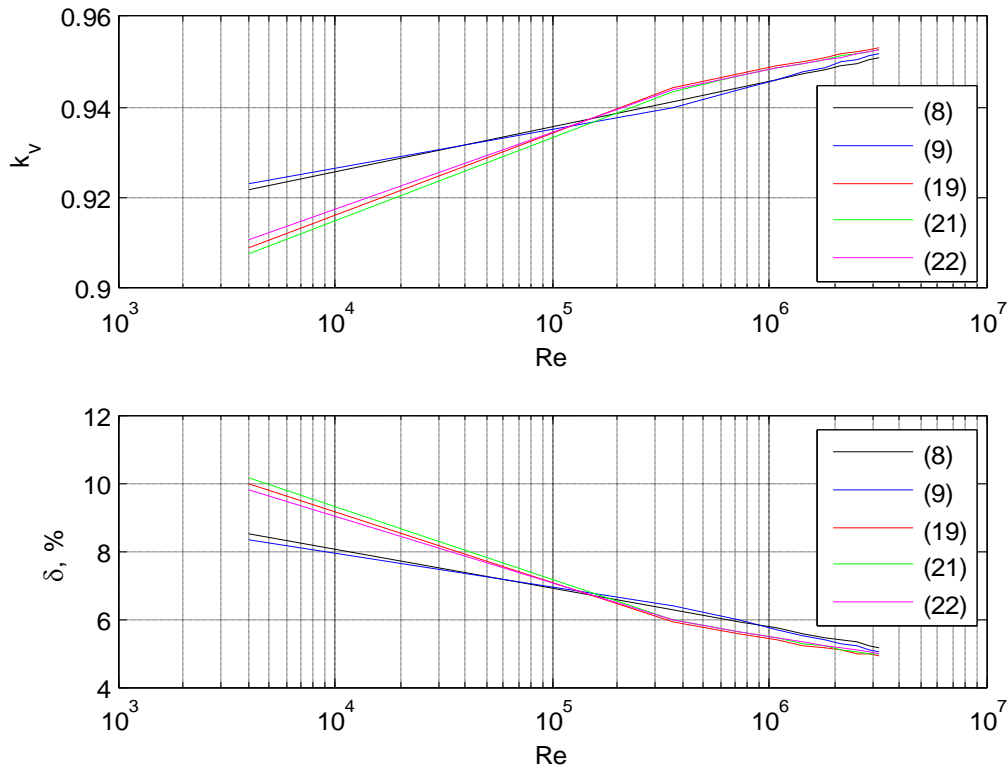


Рис. 1. Графіки залежностей $k_v = f(Re)$ та $\delta = f(Re)$ для ВТ без шорсткості

Як видно з результатів розрахунку, наведених на рис. 1, значення похибки УЗВ δ знаходяться в діапазоні 4...10 %, що є суттєвим недоліком, і однозначно потребує застосування коефіцієнта k_v . Проте, як можна побачити, значення похибки δ зменшується за збільшення значення Re (збільшення швидкості потоку), що в свою чергу вимагає особливої уваги до роботи діаметральних УЗВ при роботі на малих витратах.

Слід зауважити, що значення k_v для обраних формул найкраще співпадають за високих значень числа Рейнольдса ($Re = 3,24 \cdot 10^6$) – розмах становить 0,0024 (максимальне відносне відхилення склало $\sim 0,26$ %). За малих значень числа Рейнольдса ($Re = 4 \cdot 10^3$), значення коефіцієнта k_v гірше співпадають – розмах становить 0,0153 (максимальне відносне відхилення склало $\sim 1,66$ %). Зважаючи на те, що формули (19), (21 – 22) за своєю природою вимагають додаткового процесорного часу (реалізація одного із методів послідовного наближення для знаходження n), пропонується в комп'ютерній програмі *AutoDesignUSM* застосовувати для розрахунку коефіцієнта k_v формулу (6) в парі із рівнянням (8) або (9), за умови відсутності шорсткості на внутрішній поверхні стінки ВТ. Для цих формул розмах становить 0,0014 (максимальне відносне відхилення склало $\sim 0,15$ %) для $Re = 4 \cdot 10^3$ та 0,0012 ($\sim 0,13$ %) для $Re = 3,24 \cdot 10^6$ відповідно.

В цій роботі для проведення розрахунків коефіцієнта k_v та похибки δ з врахуванням шорсткості внутрішньої поверхні стінки ВТ обрано формулу (22) та два значення діаметра ВТ – 100 та 200 мм. Значення абсолютної шорсткості внутрішньої поверхні стінки обрано як для суцільно-протягнутих сталевих ВТ [18] в такому вигляді:

$e_1 = 0,02$ мм – нові, які не були в експлуатації;

$e_2 = 0,12$ мм – газопроводи після одного року експлуатації;

$e_3 = 0,22$ мм – газопроводи після декількох років експлуатації.

Як видно з результатів розрахунку, наведених на рис. 2 та рис. 3, значення похибки δ зростають зі збільшенням значення абсолютної шорсткості. Проте, цей ефект зменшується при збільшенні діаметра ВТ – з 7,7 % (0,22 мм) для $D = 100$ мм до 7,1 % (0,22 мм) для $D = 200$ мм. Важливим також є значення Re , адже за малих чисел Рейнольдса вплив шорсткості проявляється значно менше, ніж при їх великому значенні. Це доводить той факт, що за ламінарного режиму руху потоку, вплив шорсткості зникає.

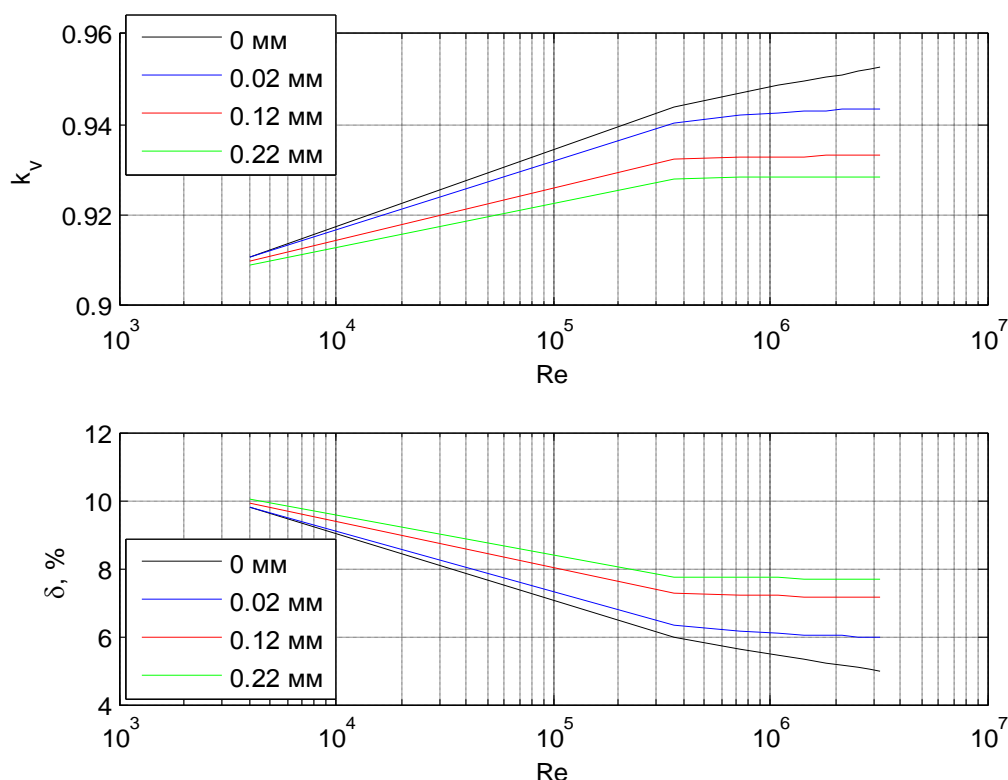


Рис. 2. Графіки залежностей $k_v = f(Re)$ та $\delta = f(Re)$ за рівнянням *Calogirou* (22) для ВТ з діаметром 100 мм та різним значенням абсолютної шорсткості

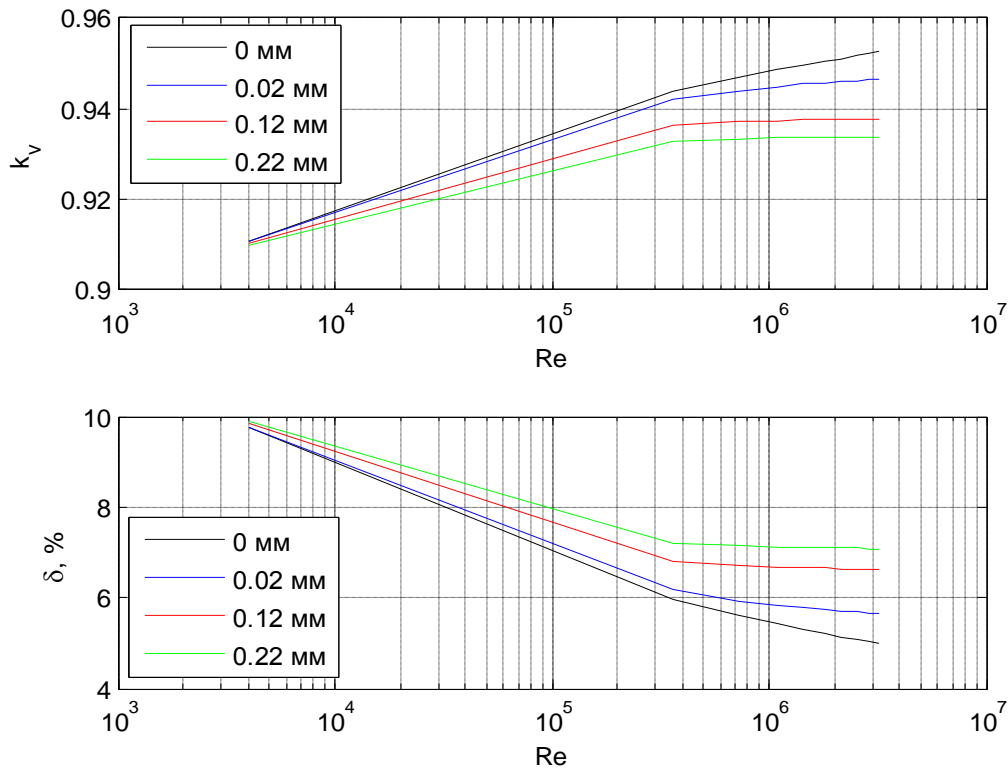


Рис. 3. Графіки залежностей $k_v = f(Re)$ та $\delta = f(Re)$ за рівнянням *Calogirou* (22) для ВТ з діаметром 200 мм та різним значенням абсолютної шорсткості

Висновки та перспективи подальших досліджень

Відповідно до мети роботи, на базі огляду наукової літератури та проведених комп'ютерних розрахунків, детально досліджено вплив режиму руху потоку та шорсткості внутрішньої поверхні стінки ВТ на похибку діаметрального УЗВ з метою їх автоматизованого проектування. Як кінцевий результат роботи, зроблено такі висновки:

1. За ламінарного режиму руху потоку похибка діаметрального УЗВ буде постійною як при гладкій так і шорсткій трубі. Значення коефіцієнта поправки на профіль потоку k_v є константою, і рівне 0,75. Цей факт потребує введення коректив до алгоритмів роботи комп'ютерній програмі *AutoDesignUSM*, розробленої на попередньому етапі досліджень по цій тематиці.

2. За турбулентного режиму руху потоку для теоретичної оцінки зазначених в меті роботи впливів, рекомендується застосовувати степеневий закон розподілу швидкості потоку у парі із відповідним рівнянням для визначення його експоненти n (експонента Нікурадзе) як функції числа Рейнольдса та інших факторів впливу:

– для гладкої внутрішньої поверхні стінки ВТ рекомендовано використовувати як залежність $n = f(Re)$ формули (8 – 9), завдяки простоті їх реалізації в алгоритмі роботи комп'ютерній програмі *AutoDesignUSM*;

– для шорсткої внутрішньої поверхні стінки ВТ рекомендовано використовувати як залежність $n = f(Re, e, D)$ формули (19, 21 – 22), передбачивши для користувача в алгоритмі роботи комп'ютерній програмі *AutoDesignUSM* вибір цих рівнянь за власним бажанням.

3. За турбулентного режиму руху потоку похибка діаметрального УЗВ буде відрізнятися в залежності від значення шорсткості внутрішньої поверхні стінки ВТ та числа Рейнольдса:

– для нульової шорсткості (гладка труба), похибка вимірювання швидкості УЗВ буде зменшуватись зі збільшенням числа Рейнольдса, а значення коефіцієнта k_v прямуватиме до 1;

– для ненульової шорсткості, похибка вимірювання швидкості УЗВ буде мати подібний характер як для гладкої труби, проте збільшуватиметься, якщо значення шорсткості зростатиме за сталого діаметру; цей ефект зменшується, якщо значення діаметра ВТ збільшується вже за сталого значення абсолютної шорсткості.

Як перспектива подальших досліджень за тематикою роботи, що дозволить комп'ютерній програмі *AutoDesignUSM* для автоматизованого проектування УЗВ стати ще ефективнішою, виділено подальші етапи:

- 1) впровадження запропонованих залежностей до алгоритмів роботи програми;
- 2) розробка графічного інтерфейсу програми з можливістю виводу графіків.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. 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.
2. ISO 17089-2:2012. Measurement of fluid flow in closed conduits – Ultrasonic meters for gas. Part 2: Meters for industrial applications. [Effective from 2012-10-01]. Official edition. Geneva : International Organization for Standardization, 2012. 38 p.
3. Роман В. І., Матіко Ф. Д., Лючок В. О. Комп'ютерна програма для автоматизованого проектування діаметральних ультразвукових витратомірів. *Наукові праці ВНТУ*. 2024. №2. URL: <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2024-2-54-63>.
4. Роман В. І., Лючок В. О. Комп'ютерна програма для проектування багатоканальних ультразвукових витратомірів. *Науковий журнал «Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво»*. 2023. № 52. С. 24 – 31. URL: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-52-03>.
5. Boundary Layer Theory (9th edition) / ed. by H. Schlichting and K. Gersten. Berlin : Springer, 2017. 805 p.
6. Fundamentals of pipe flow / by Robert P. Benedict. Jogn Wiley & Sons, 1980. 531 p.
7. Кулик М. С., Мовчан В. Т., Шквар Є. О. Математичні моделі пристінної турбулентності. – К. : НАУ, 2012. 356 с.
8. Klaus J. Zanker. 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. *Norwegian Society for Oil and Gas Measurement*. Oslo, 1999. P. 117 – 129. URL: <https://nfgm.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>.
9. 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. American Society of Mechanical Engineers. – New York, 2011. P. 757 – 765. URL: <https://doi.org/10.1115/IMECE2011-65210>.
10. 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).
11. 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>.
12. Examining Transit-Time Ultrasonic Flowmeter Inaccuracies during Changing Gas Velocity Profiles / P. Piechota et al. *Processes*. 2023. Vol. 11. URL: <https://doi.org/10.3390/pr11051367>.
13. Zhang H., Guo C., Lin J. Effects of Velocity Profiles on Measuring Accuracy of Transit-Time Ultrasonic Flowmeter. *Appl. Sci*. 2019. Vol. 9. URL: <https://doi.org/10.3390/app9081648>.
14. Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook. Spatial, Mechanical, Thermal, and Radiation Measurement (2nd edition) / ed. by John G. Webster and Halit Eren. – CRC Press, 2014. – 1640 p.
15. Проблеми метрологічного забезпечення вимірювання витрат рідин з використанням акустичного методу / В. І. Коновалов та ін. *Методи та прилади контролю якості*. 2004. № 12. С. 75 – 76. URL: <http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/1273>.
16. Сусак О. М., Касперович В. К., Андрійшин М. П. Трубопровідний транспорт газу: підруч. [для студ. вищ. навч. закл.]. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2013. 345 с.
17. Colebrook C. Turbulent Flow in Pipes, with Particular Reference to the Transition Region between the Smooth and Rough Pipe Laws. *Journal of the Institution of Civil Engineers*. 1939. Vol. 11. P. 133 – 156. – URL: <https://doi.org/10.1680/ijoti.1939.13150>.
18. Пістун Є. П., Лесовой Л. В. Нормування витратомірів змінного перепаду тиску. Львів : Видавництво ЗАТ «Інститут енергоаудиту та обліку енергоносіїв», 2006. 576 с.

Стаття надійшла до редакції 08.10.2024.

Стаття пройшла рецензування 18.10.2024.

Роман Віталій Іванович – канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, e-mail: vitalii.i.roman@lpnu.ua.
Національний університет «Львівська політехніка».