

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2022-48-02>

УДК 681.121.89.082.4

Роман Віталій Іванович, доцент, к.т.н.

<https://orcid.org/0000-0002-8546-6752>

Матіко Федір Дмитрович, професор, д.т.н.

<https://orcid.org/0000-0001-6569-2587>

Ялінський Дмитро Ярославович, магістр

Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ДОДАТКОВИХ СКЛАДОВИХ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ВИТРАТОМІРІВ МЕТОДАМИ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ ГІДРОДИНАМІКИ

Роман В.І., Матіко Ф.Д., Ялінський Д.Я. Дослідження додаткових складових похибки вимірювання витрати ультразвукових витратомірів методами обчислювальної гідродинаміки. На базі методів обчислювальної гідродинаміки розроблено методику дослідження додаткових складових похибки вимірювання витрати ультразвукових витратомірів. Застосовуючи розроблену методику, проведено дослідження трьох складових похибки вимірювання витрати ультразвукових витратомірів й запропоновано рекомендації щодо їх усунення.

Ключові слова: ультразвуковий витратомір, похибка вимірювання, обчислювальна гідродинаміка, місцевий опір, спотворення структури потоку, шорсткість поверхні, калібрування.

Roman V., Matiko F., Yalinsky D. Investigation of additional components of flow rate measurement error of ultrasonic flowmeters by methods of computational fluid dynamics. On the basis of computational fluid dynamics, the method of investigation of additional components of flow rate measurement error of ultrasonic flowmeters is developed. Applying the developed method, the study of three components of flow rate measurement error of ultrasonic flowmeters and recommendations for their elimination are proposed.

Keywords: ultrasonic flowmeter, measurement error, computational fluid dynamics, local fittings, distortion of flow structure, surface roughness, calibration.

Проблематика питання. Точність, з якою відбувається вимірювання витрати та кількості дороговартісних плинних енергоносіїв (таких як природний газ), має важливе значення для всієї промисловості України, зокрема в умовах війни. При постійному удорожчанні та дефіциті цінних енергоносіїв на вітчизняному та світовому ринках, застосування високоточних засобів обліку стає запорукою стабільності існування як споживачів газу, так і генеруючих компаній. Це зумовлює постійний розвиток засобів вимірювання витрати та кількості газу, зокрема методів вимірювання, які працюють із застосуванням ультразвуку.

Як свідчать наукові та технічні джерела, застосування ультразвукових витратомірів (УЗВ) має ряд переваг [1-3]: 1) мінімальний контакт елементів УЗВ з газом, що збільшує довговічність приладу та стабільність гідродинамічної структури потоку; 2) діапазон вимірювання, що майже не залежить від діаметра трубопроводу (якщо не робити прив'язку до корпусу УЗВ та фланців); 3) можливість застосування як для чистих так і для забруднених потоків та інші. Попри переваги, науковців та розробників УЗВ вперше чергу цікавлять їх недоліки, які вони можуть спробувати усунути. Основний недолік УЗВ – це його висока чутливість до відхилень умов потоку під час експлуатації від умов його калібрування (особливо лабораторного) [1-3]. Тобто при встановленні відкаліброваного УЗВ по місцю експлуатації, з'являються додаткові складові похибки вимірювання витрати, зумовлені специфікою робочих умов та ефектів монтажу, які відрізняються від умов по місцю калібрування. Інколи їх ще називають зовнішніми факторами впливу, які не стосуються самого УЗВ, але відносяться до умов, де він працює [3]: 1) вплив спотворень гідродинамічної структури потоку на вході УЗВ; 2) вплив нашарувань на внутрішній поверхні стінок вимірювального трубопроводу (ВТ) на вході УЗВ; 3) вплив зміни типу вимірювального середовища (перехід з повітря на природний газ).

Мета роботи. Зважаючи на описану проблематику, авторами поставлено за мету дослідити додаткові складові похибки вимірювання витрати двоканальних хордових УЗВ із використанням методів обчислювальної гідродинаміки (CFD-моделювання). Отримані результати дозволять розробити рекомендації щодо правильної експлуатації УЗВ в умовах згаданих вище зовнішніх факторів впливу.

Аналіз публікацій. Дослідження похибок вимірювання витрати УЗВ присвячено безліч наукових праць [1-2], деякі результати із яких формують теоретичний зміст основного міжнародного стандарту в галузі ультразвукової витратометрії ISO 17089-1 [3]. У сучасних

дослідницьких роботах, науковці враховують бурхливий розвиток комп'ютерних технологій, і, відповідно, часто застосовують для дослідження похибок вимірювання витрати методи CFD-моделювання [4-6]. У поєднанні із результатами експериментальних досліджень, результати такого моделювання дозволяють розробляти досконалі комп'ютерні моделі (в парі з 3D-макетами) ділянок вимірювального трубопроводу (ВТ) з УЗВ. Наявність таких моделей дає можливість досліджувати конфігурації ВТ, конструкцію УЗВ та різноманітні умови, не охоплені у повній мірі експериментальними дослідженнями.

Проаналізувавши наявні наукові праці за проблематикою статті, можна з впевненістю сказати, що достатньо дослідженим є тільки вплив спотворення гідродинамічної структури потоку на вході УЗВ на похибку вимірювання витрати. За результатами цих досліджень встановлено, що УЗВ потребують встановлення прямолінійних ділянок ВТ достатньої довжини між ними і місцевими опорами (МО), особливо тими, що створюють асиметричні спотворення (МО виду «90° коліно»). Якою саме має бути відстань між УЗВ і МО – потрібно визначати індивідуально [3] для кожного МО та відповідної конструкції УЗВ. Вплив інших зовнішніх факторів досліджено не так добре. Зокрема, мало досліджено додаткову похибку зумовлену забрудненням внутрішньої поверхні ВТ, а також похибку, що виникає внаслідок застосування УЗВ для вимірювання витрати середовища, відмінного від середовища калібрування. Проте, відомо, що похибка, зумовлена нашаруванням на внутрішній поверхні стінок ВТ, залежить від коефіцієнта гідравлічного опору, числа Рейнольдса та значень відносної шорсткості [7]. Натомість, похибка, зумовлена зміною типу вимірювального середовища, може бути незначною, якщо дотримуватись принципу подібності (однакових значень числа Рейнольдса) [8]. Як змінюватиметься похибка УЗВ, за наявності комбінації цих зовнішніх факторів впливу, в інших роботах не досліджено.

Викладення основного матеріалу. Рівняння об'ємної витрати (q_v) багатоканального хордового УЗВ, за швидкісним принципом вимірювання витрати, можна записати наступним чином [2, 9]:

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

Щоб рівняння (1) остаточно залежало тільки від значень швидкостей потоку $v(i)$ вимірних вздовж акустичних каналів (АК) УЗВ кількістю N та конструктивних характеристик витратоміра (діаметр секції УЗВ або ВТ – D або радіус $R = D/2$), необхідно знати значення координат розташування $x(i)$ та вагових коефіцієнтів АК УЗВ $w(i)$.

Згідно [3], вагові коефіцієнти АК УЗВ можуть бути постійними або змінними. При цьому постійні визначаються на підставі відомих числових методів інтегрування (ЧМІ) (до прикладу, метод Гауса, Гауса-Якобі, Гауса-Чебишева [9]), а змінні – за вимірними параметрами потоку (наприклад, швидкість потоку) [3]. В даній роботі досліджено похибку вимірювання витрати двоканального хордового УЗВ, для якого рівняння (1) матиме такий вигляд:

$$q_v = \frac{\pi D^2}{4} \frac{(v_1 + v_2)}{2}. \quad (2)$$

Рівняння (2) отримане для УЗВ з хордовим розміщенням АК на відстані $R/2$ від осі ВТ, а сумарне значення швидкості потоку отримуємо знаходженням середнього арифметичного двох швидкостей (v_1 та v_2). Це викликано наступними міркуваннями:

- у цій роботі нас цікавлять в першу чергу закономірності зміни значень і знаку тих похибок, які не залежать від обраного рівняння розрахунку об'ємної витрати;

- незважаючи на обраний ЧМІ, кількість АК та схему їх просторового розташування (діаметральна, хордова чи дельта-схема), в реальних УЗВ до формули (1) або (2) вводять калібрувальний коефіцієнт (k_{cal}) для внесення поправок на різні відхилення, що виникли в результаті виробничих допусків та невідповідності прийнятих припущень [3] умовам застосування витратоміра.

Тобто рівняння (2) модифікують до такого вигляду:

$$q_v = k_{cal} \frac{\pi D^2}{4} \frac{(v_1 + v_2)}{2}. \quad (3)$$

Правила та допуски щодо впровадження змін (виправлень) та лінеаризації за допомогою калібрувального коефіцієнта описані у підрозділах 5,8 та 6.3.3 стандарту ISO 17089-1 [3].

Відповідно до рівняння (3), похибка вимірювання витрати УЗВ залежить від окремих похибок у всіх його складових. Існує чотири основні джерела похибок [3]:

- 1) похибка калібрувального коефіцієнта k_{cal} ;
- 2) похибка в геометрії корпусу УЗВ;
- 3) похибка визначення вагових коефіцієнтів;

4) похибка вимірювання часу та різниці часу проходження ультразвукових коливань за та проти потоку.

Після калібрування та регулювання, похибки у витраті, що відображатиметься УЗВ, спричинені наведеними вище чотирма факторами, компенсуються шляхом множення правої сторони формули (3) на калібрувальний коефіцієнт. Єдина залишкова невизначеність по місцю калібрування – невизначеність калібрувального коефіцієнта. Як було зазначено раніше, при встановленні УЗВ по місцю експлуатації з'являються додаткові складові похибки вимірювання витрати, зумовлені специфікою робочих умов та ефектів монтажу по місцю роботи, які відрізняються від умов по місцю калібрування:

1) додаткова складова похибки вимірювання об'ємної витрати УЗВ зумовлена спотворенням структури потоку (як джерело спотворень виступають типові місцеві опори) – $\delta_{D(CSP)}$;

2) додаткова складова похибки вимірювання об'ємної витрати УЗВ зумовлена відмінністю середовища вимірювання від середовища калібрування (перехід з повітря на метан) – $\delta_{D(BCB)}$;

3) додаткова складова похибки вимірювання об'ємної витрати УЗВ зумовлена відмінністю стану внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу від стану під час калібрування (наявність шорсткості внутрішніх стінок ВТ або корпусу УЗВ) – $\delta_{D(CBP)}$.

З метою дослідження зазначених складових похибки вимірювання витрати багатоканальних хордових УЗВ та розробки рекомендацій щодо їх зменшення (або повного усунення), авторами розроблено відповідну методику із застосуванням комп'ютерних методів обчислювальної гідродинаміки (Computational fluid dynamics, CFD-моделювання). Опишемо етапи цієї методики:

1. Вибір конструкції УЗВ (кількість та схема розташування АК, методи сумування швидкостей потоку вздовж АК – середнє арифметичне або ЧМІ).

2. Побудова 3D-макету обраної конструкції УЗВ (включає ділянки ВТ до і після витратоміра, засоби вимірювання тиску та температури) у САПР-середовищі, яке має пакет для CFD-моделювання. В даній роботі використано САПР SolidWorks з CFD-пакетом Flow Simulations [10].

3. Калібрування УЗВ. Комп'ютерне CFD-моделювання дозволяє визначити швидкість потоку вздовж траєкторії руху звукових коливань (довжина АК) 3D-макету УЗВ за результатами числового розв'язку рівняння Нав'є-Стокса (методом скінчених об'ємів) [10]. При цьому, в кожній точці розрахункової сітки, можуть виникати неточності відтворення методами CFD-моделювання ефектів турбулентності потоку та похибки дискретизації розрахункової сітки. З метою усунення вказаних неточностей, як і для УЗВ при реальному калібруванні, авторами запропоновано визначати k_{cal} в рівнянні (3) за результатами комп'ютерного «калібрування». Значення k_{cal} пропонується визначати за такою формулою [2-3]:

$$k_{cal} = \frac{q_{m.et}}{q_m}, \quad (4)$$

де $q_{m.et}$ – еталонна масова витрати газу, яке задається на вході 3D-макету як один із початкових параметрів для CFD-моделювання, q_m – масова витрата УЗВ за результатами CFD-моделювання, формулу якої отримують з рівняння (3): $q_m = q_v \cdot \rho$, де ρ – це усереднене значення густини потоку в поперечному перерізі ВТ (середина 3D-корпусу) УЗВ. Швидкості потоку v_1 та v_2 з рівняння (3) також є усередненими значеннями швидкості потоку вздовж АК 3D-макету УЗВ після CFD-моделювання.

Слід зазначити, що еталонне значення витрати $q_{m.et}$ може бути вибране наступним чином:

1) з діапазону вимірювання для конкретної моделі та типорозміру УЗВ за умови моделювання відомої конструкції УЗВ;

2) приймається рівним показам еталонного витратоміра, застосованого під час експерименту (якщо порівнюється реальні дані з результатами CFD-моделювання).

Важливо наголосити, що калібрування УЗВ відбувається:

- для умов відсутності спотворень структури потоку – перед та після 3D-макету УЗВ встановлені тільки прямолінійні ділянки ВТ;

- для параметрів потоку (тип середовища, витрата, тиск, температура, шорсткість внутрішніх стінок ВТ), які будуть обрані для дослідження зазначених складових похибки вимірювання витрати УЗВ.

4. Дослідження складових похибки вимірювання витрати УЗВ. Для цього відбувається «монтаж» на вході 3D-макету УЗВ 3D-макету одного із типових МО на певній мінімальній відстані $l = 0 \dots 100D$ (відносна відстань між входом УЗВ і виходом МО). Під час моделювання фіксується конкретна відстань. Опісля відбувається CFD-моделювання (див.рис.2,б), і отримання масивів даних (швидкість потоку вздовж АК УЗВ) для аналізу додаткових складових похибки вимірювання об'ємної витрати УЗВ. Отримані масиви даних обробляємо з використанням формул (3-4) та рівняння відносної похибки [2]:

$$\delta_d = \frac{k_{cal}q_m - q_{m.et}}{q_{m.et}} 100. \quad (5)$$

5. Аналіз отриманих результатів і розробка рекомендацій.

Дослідження УЗВ виконано за розробленою методикою для поданих нижче значень параметрів налаштування. За результатами досліджень отримано такі результати.

1. Калібрування УЗВ: довжина прямолінійної ділянки ВТ 3D-макету для калібрування УЗВ рівна 11 м; статичний тиск рівний 101 325 Па; температура потоку рівна 293,2 К (20 С°); шорсткість внутрішньої поверхні ВТ рівна 0 мкм (мікрон); повітря, як тип середовища калібрування; структура профілю потоку на вході 3D-макету повністю розвинена та неспотворена; використано k - ϵ моделі турбулентності [10]; еталонні масові витрати (низька та висока) взяті з діапазону реального двоканального УЗВ газу, що становлять відповідно $q_{m(low)} = 0,0013$ кг/с та $q_{m(high)} = 0,2175$ кг/с. Для вказаних значень характеристик УЗВ та параметрів моделювання отримано наступні калібрувальні коефіцієнти: $k_{cal(low)} = 1,1408$ та $k_{cal(high)} = 1,0395$.

2. Дослідження додаткової складової похибки вимірювання об'ємної витрати УЗВ, зумовленої спотворенням структури потоку. Як джерело спотворень обрано два поширені типові МО:

- МО1 «90° коліно» (див.рис.1,а);
- МО2 «два коліна в різних площинах ($l \leq 5D$)».

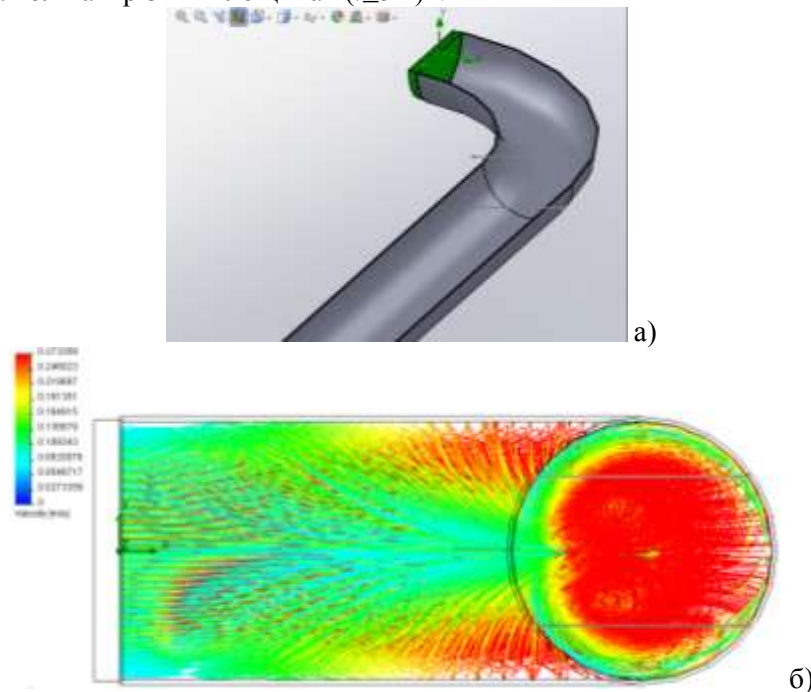
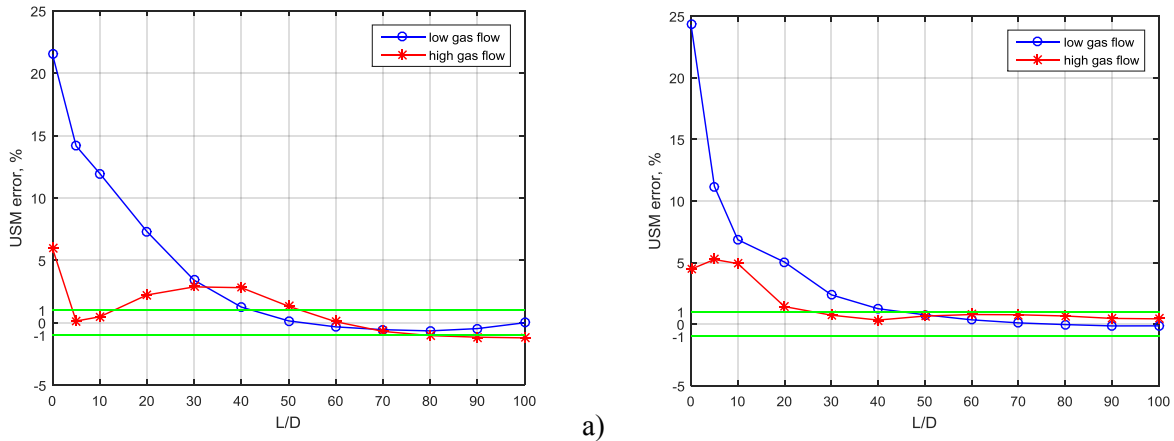


Рис.1. 3D-макет МО1 «90° коліно» в САПР SolidWorks:
а) вигляд; б) результат CFD-моделювання (швидкісні лінії потоку)



б)

Рис.2. Залежність похибки $\delta_{D(CSP)}$ від відстані УЗВ до МО1 (а) та МО2 (б)

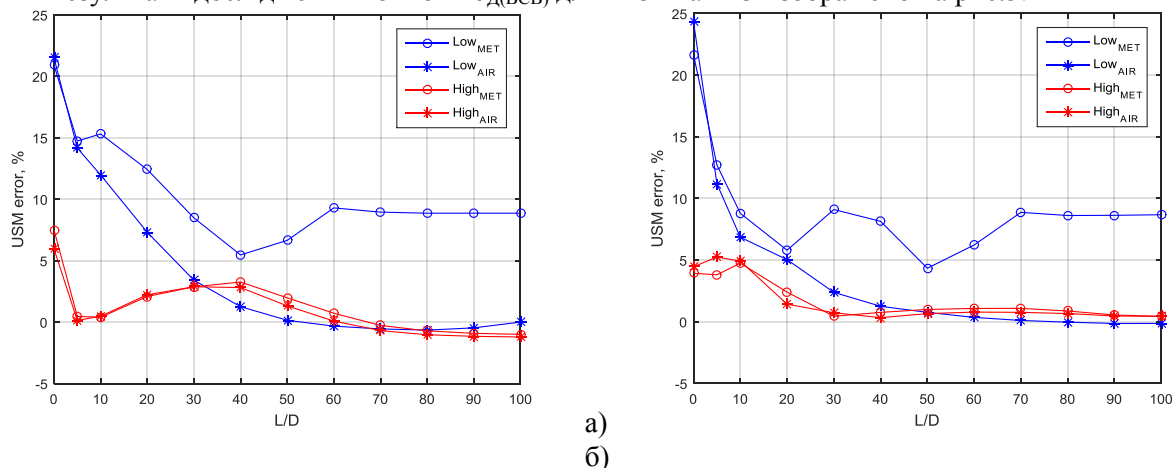
Провівши аналіз ринку двоканальних УЗВ газу, встановлено, що їх максимальні похибки не перевищують $\pm 2\%$. Тому в роботі було прийнято рішення прийняти допустимі межі $\delta_{D(CSP)} = \pm 1\%$ (що зображено зеленими лініями на рис.2). Це означає, що як тільки графік $\delta_{D(CSP)}$ перетинатиме ці межі, ми фіксуватимемо значення відстані l_{min} на якій потрібно встановлювати УЗВ після МО. Така відстань дозволить говорити, що похибка $\delta_{D(CSP)}$ не впливає на результат вимірювання УЗВ. Результат визначення мінімальних відстаней для розглянутих МО наведено в табл.1.

Таблиця 1. Мінімальні відстані для монтажу УЗВ після МО

№	l_{min}		Рекомендована
	$q_{m(low)} = 0,0013 \text{ кг/с}$	$q_{m(high)} = 0,2175 \text{ кг/с}$	
МО1	42D	52D	52D
МО2	45D	25D	45D

3. Дослідження додаткової складової похибки вимірювання об'ємної витрати УЗВ, зумовленої відмінністю середовища вимірювання від середовища калібрування. В даному дослідженні нами змінено тип плинного середовища з повітря на метан. Дослідження УЗВ що вимірює витрату метану також виконано за методикою поданою вище.

Результати дослідження похибки $\delta_{D(BCB)}$ для МО1 та МО2 зображено на рис.3.



а)
б)

Рис.3. Залежність похибки $\delta_{D(BCB)}$ від відстані УЗВ до МО1 (а) та МО2 (б)

Як видно з рис.3, ефекти похибки $\delta_{D(BCB)}$ на МО1 повторюються і на МО2 – зміна середовища значно впливає на значення похибки тільки при низькій витраті. Ймовірно, це зумовлено зміною значення числа Рейнольдса для іншого середовища. Для удосконалення процесу вимірювання витрати УЗВ при зміні типу вимірювального середовища, авторами рекомендовано обов'язкове повторне калібрування витратоміра на вимірювальному середовищі при низьких витратах.

4. Дослідження додаткової складової похибки вимірювання об'ємної витрати УЗВ зумовленої відмінністю стану внутрішньої поверхні ВТ від стану під час калібрування. В даному
© Роман В.І., Матіко Ф.Д, Ялінський Д.Я.

випадку йде мова про наявність ненульової шорсткості внутрішніх стінок ВТ або корпусу УЗВ. Для наочності, авторами обрано три значення шорсткості, які відповідають стану поверхні стінки ВТ у реальних умовах експлуатації (див.табл.2).

Таблиця 2. Значення еквівалентної шорсткості

Вид труб і матеріал	Стан поверхні стінки ВТ і умови експлуатації	$R_{ш}$, мкм
Сталеві труби	Із незначним нальотом іржі	150
	Іржава	250
	Покрита накипом	1250

Змінюючи тільки шорсткість внутрішньої стінки ВТ, всі решта етапів методики залишаються незмінними, і є аналогічні попереднім дослідженням на повітрі. Результати досліджень впливу шорсткості на результат вимірювання витрати УЗВ представлено на рис.4.

Аналізуючи результати, представлені на рис.4, можна стверджувати, що при мінімальній витраті, вплив шорсткості на похибку $\delta_{д(СВП)}$ є мінімальним, і зменшується зі збільшенням відстані між МО і УЗВ. При максимальній витраті, похибка $\delta_{д(СВП)}$ суттєво залежить від шорсткості внутрішніх стінок ВТ. Після 20D (рис.4,б) чим більша шорсткість, тим похибка $\delta_{д(СВП)}$ стає меншою, що пояснюється гальмівним ефектом все більш шорсткої стінки ВТ на спотворений потік [7]. Що цікаво, до 10D цей ефект протилежний. А на проміжку 10-20D виникає своєрідна перехідна зона.

В певній мірі поведінка похибки $\delta_{д(СВП)}$ при високій витраті на МО1 повторюється і на МО2 (рис.4,г). Проте тут перехідна зона значно ширша (25-55D) і має інший характер – деякі результати в ній перевищують результати на гладкій трубі. Результати поза перехідною зоною, можна пояснити складнішою структурою потоку, яка виникає після складнішого за природою МО. Потіку після МО2 за будь-якої шорсткості треба більше часу щоб «заспокоїтись», аніж після простішого МО1.

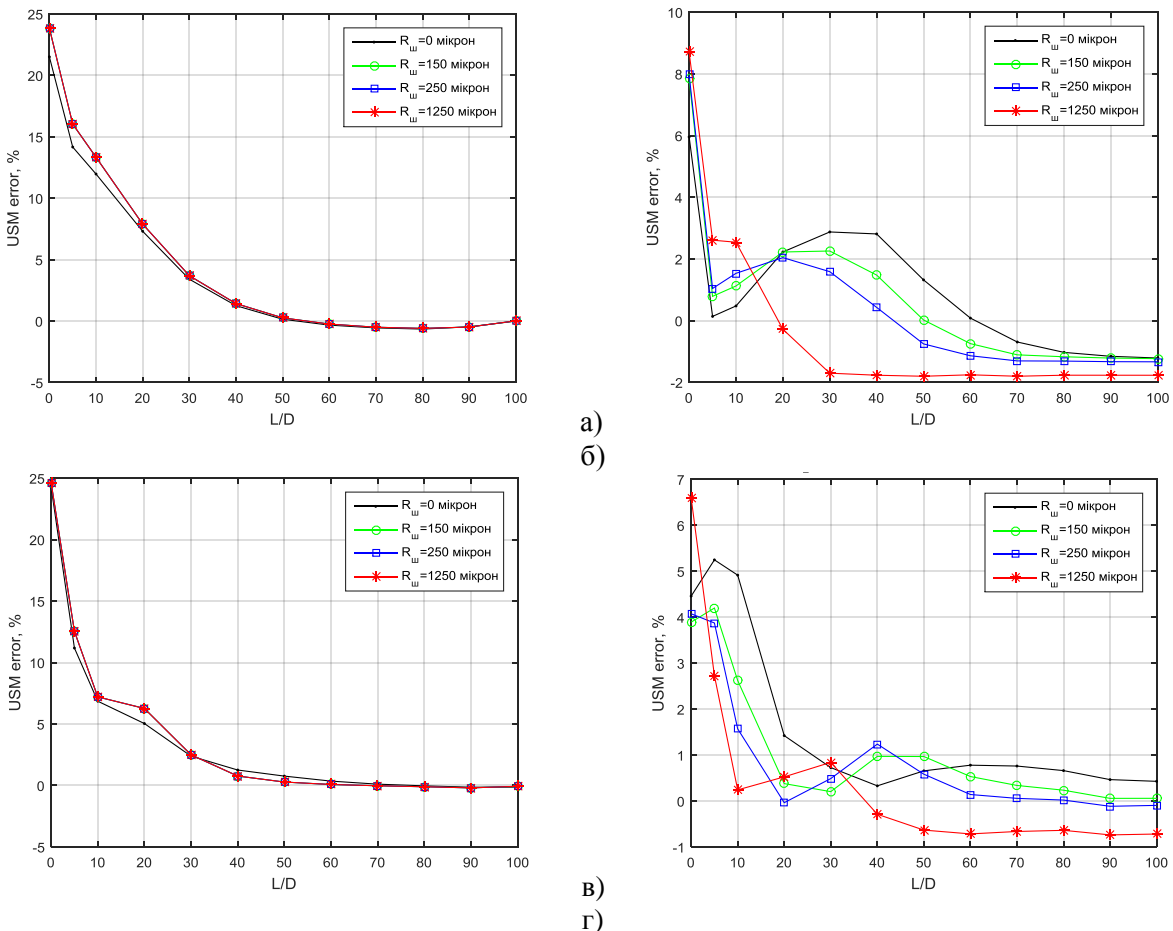


Рис.4. Графік похибок $\delta_{д(СВП)}$ для МО1 і МО2 при низькій (а, в) та високій (б, г) витратах

Для зменшення похибки вимірювання витрати при зміні шорсткості внутрішньої поверхні ВТ, авторами рекомендовано проводити періодичну механічну очистку стану трубопроводу. Якщо цього не робити, рекомендується проводити додаткове калібрування УЗВ із врахуванням шорсткості внутрішньої стінки ВТ тільки в тому випадку, коли витратомір працюватиме на високих швидкостях згідно своїх паспортних даних.

Отримані результати, частково викладені у магістерській кваліфікаційній роботі Ялінського Д.Я. [11], науковим керівником якого був Роман В.І.

Висновки та перспективи подальшого дослідження. У статті запропоновано методику дослідження додаткових складових похибки вимірювання витрати УЗВ із застосуванням комп'ютерних методів обчислювальної гідродинаміки (CFD-моделювання). Використовуючи розроблену методику, авторами проведено ряд досліджень, результати яких можна виразити наступним чином:

1) для усунення додаткової складової похибки вимірювання витрати УЗВ, зумовленої спотворенням структури потоку, рекомендується знаходити необхідну довжину прямолінійної ділянки ВТ між УЗВ та конкретним типом МО із обов'язковим урахуванням кількості АК витратоміра;

2) для усунення додаткової складової похибки вимірювання витрати УЗВ, зумовленої відмінністю середовища вимірювання від середовища калібрування, рекомендується виконувати калібрування УЗВ на вимірюваному середовищі;

3) для усунення додаткової складової похибки вимірювання витрати УЗВ, зумовленої відмінністю стану внутрішньої поверхні ВТ від стану під час калібрування, рекомендується проводити додаткове калібрування УЗВ із врахуванням шорсткості внутрішньої стінки ВТ тільки в тому випадку, коли витратомір працюватиме на високих швидкостях.

Застосування методики дозволяє досліджувати не тільки існуючі УЗВ, а й проводити комп'ютерну симуляцію впливу таких умов експлуатації, які або складно відтворити в лабораторних умовах, або які ще тільки проектується. Поєднання отриманих за такою методикою даних з результатами експериментальних досліджень УЗВ, дозволяє розробляти чіткі рекомендації (для впровадження у нормативні документи) щодо зменшення похибки вимірювання витрати у різних технологічних умовах.

Список бібліографічного опису

1. American Gas Association. (2007). *AGA Transmission Measurement Committee Report No.9: Measurement of gas by multipath ultrasonic meters (2nd ed.)*. Washington, DC: AGA.
2. The European Gas Research Group. (2000). *GERG Technical Monograph No.11: Project on Ultrasonic Gas Flow Meters, Phase II*. Brussels, Belgium: GERG.
3. International Organization for Standardization. (2010). *ISO 17089-1: Measurement of fluid flow in closed conduits - Ultrasonic meters for gas. Part 1: Meters for custody transfer and allocation measurement*. Geneva, Switzerland: ISO.
4. Chen, W., Wu, J., and Li, C. (2021). The Investigation on the Flow Distortion Effect of Header to Guarantee the Measurement Accuracy of the Ultrasonic Gas Flowmeter. *Appl. Sci.*, 11, 36-56. <https://doi.org/10.3390/app11083656>.
5. Mousavi, S.F., Hashemabadi, S.H., and Jamalic, J. (2020). Calculation of geometric flow profile correction factor for ultrasonic flow meter using semi-3D simulation technique. *Ultrasonics*, 106, 106-165. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2020.106165>
6. Ruppel, C., and Peters, F. (2004). Effects of upstream installations on the reading of an ultrasonic flowmeter. *Flow Measurement and Instrumentation*, 15, 167-177. <https://doi:10.1016/j.flowmeasinst.2003.12.004>
7. Лобачев, П.В., та Мясников, В.И. (1980). Влияние шероховатости подводящих трубопроводов на показания ультразвуковых расходомеров. *Измерительная техника*, 12, 53-54.
8. Андріюшин, М.П., Чернищенко, О.М., та Едель, А.В. (2015). Особливості застосування газодинамічної теорії подібності в процесі калібрування та перевірки лічильників природного газу. *Нафтогазова галузь України*, 6, 33-36.
9. Tresch, T., Gruber, P., & Staubli, T. (2006, July 30 – August 1). *Comparison of integration methods for multipath acoustic discharge measurements*. Paper presented at the Proceedings of the 6th International Conference on IGHEM, Portland Oregon, USA.
10. Matsson, J. (2010). *An introduction to SolidWorks Flow Simulation 2010*. Mission, Kansas : SDC Publications. – 297 pages.
11. Ялінський Д.Я., Роман В.І. (керівник). (2022). Дослідження метрологічних характеристик двоканального ультразвукового витратоміра методами обчислювальної гідродинаміки. Магістерська кваліфікаційна робота. Національний університет «Львівська політехніка», Львів. – 52 с.

References

1. American Gas Association. (2007). *AGA Transmission Measurement Committee Report No.9: Measurement of gas by multipath ultrasonic meters (2nd ed.)*. Washington, DC: AGA.
2. The European Gas Research Group. (2000). *GERG Technical Monograph No.11: Project on Ultrasonic Gas Flow*

Meters, Phase II. Brussels, Belgium: GERG.

3. International Organization for Standardization. (2010). *ISO 17089-1: Measurement of fluid flow in closed conduits - Ultrasonic meters for gas. Part 1: Meters for custody transfer and allocation measurement.* Geneva, Switzerland: ISO.
4. Chen, W., Wu, J., and Li, C. (2021). The Investigation on the Flow Distortion Effect of Header to Guarantee the Measurement Accuracy of the Ultrasonic Gas Flowmeter. *Appl. Sci.*, 11, 36-56. <https://doi.org/10.3390/app11083656>.
5. Mousavi, S.F., Hashemabadi, S.H., and Jamalic, J. (2020). Calculation of geometric flow profile correction factor for ultrasonic flow meter using semi-3D simulation technique. *Ultrasonics*, 106, 106-165. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2020.106165>
6. Ruppel, C., and Peters, F. (2004). Effects of upstream installations on the reading of an ultrasonic flowmeter. *Flow Measurement and Instrumentation*, 15, 167-177. <https://doi:10.1016/j.flowmeasinst.2003.12.004>
7. Lobachev, P.V., and Myasnikov, V.I. (1980). The impact of roughness of the supply pipelines on the indications of ultrasound flow meters. *Measuring technique*, 12, 53-54.
8. Andriyshyn, MP, Chernyshenko, OM, and Edel, A.V. (2015). Features of the use of gas-dynamic theory of similarity in the process of calibration and verification of natural gas meters. *Oil and gas industry of Ukraine*, 6, 33-36.
9. Tresch, T., Gruber, P., & Staubli, T. (2006, July 30 – August 1). *Comparison of integration methods for multipath acoustic discharge measurements.* Paper presented at the Proceedings of the 6th International Conference on IGHEM, Portland Oregon, USA. doi: <http://www.ighem.org>.
10. Matsson, J. (2010). *An introduction to SolidWorks Flow Simulation 2010.* Mission, Kansas : SDC Publications. – 297 pages.
11. Yalinsky D.Ya., Roman V.I. (head). (2022). Investigation of metrological characteristics of dual-channel ultrasonic flowmeter by computational fluid dynamics methods. Master's qualification work. Lviv Polytechnic National University, Lviv. – 52 p.