

УДК 681.121.89.082.4

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ПОТОКУ ЗА ДОПОМОГОЮ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ІЗ ДІАМЕТРАЛЬНИМ АКУСТИЧНИМ КАНАЛОМ

© Роман Віталій, Матіко Федір, 2013

Національний університет «Львівська політехніка», кафедра автоматизації теплових та хімічних процесів,
вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна

*Викладено результати моделювання впливу спотворень профілю швидкості потоку на похибку
одноканального ультразвукового перетворювача витрати із діаметральним розміщенням
акустичного каналу.*

*Изложены результаты моделирования влияния искажений профиля скорости потока на погрешность
одноканального ультразвукового преобразователя расхода с диаметрально размещением
акустического канала.*

*The paper presents the results of modeling of flow profile distortions on the accuracy of single channel ultrasonic flow
transducer with diametrically placing acoustic channel.*

Вступ. Одним із сучасних методів вимірювання витрати та кількості газу (зокрема і природного), що протікає через трубопровід круглої форми, є ультразвуковий метод. Завдяки своїм перевагам метод широко впроваджується у багатьох галузях промисловості, зокрема і в галузі транспортування та розподілу природного газу [6].

Перетворювачі витрати на базі ультразвукового методу в процесі роботи використовують різні способи поширення і обробки ультразвукового імпульсу і, внаслідок цього, мають різноманітні конструктивні виконання. Серед відомих сьогодні ультразвукових перетворювачів витрати (УЗПВ) існують конструкції із діаметральними акустичними каналами встановленими під певним кутом до осі трубопроводу [1]. Незважаючи на це, всі УЗПВ тією чи іншою мірою зазнають дії різноманітних факторів, що впливають на їх метрологічні характеристики. Серед цих факторів виділяють два класи: внутрішні (переважно залежать від самого УЗПВ) та зовнішні (які залежать від газового середовища) [3, 4]. Кожен з цих класів налічує багато факторів, які в тій чи іншій інсталяції чи методі, що реалізується в УЗПВ, намагаються зменшити або зовсім ліквідувати.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Вплив різноманітних факторів на метрологічні характеристики УЗПВ досліджено у багатьох наукових працях. Зокрема, щодо досліджень впливу спотво-

реного профілю швидкості потоку (як одного із факторів) на похибку УЗПВ, у роботі [5] наведено приклади програмних засобів «Kalibra» (розробник Ruhrgas AG, Німеччина) та «GARUSO» (Норвегія), за допомогою яких виконують прогнозування похибки УЗПВ під час вимірювання швидкості газових потоків зі спотвореним внаслідок дії місцевих опорів профілем швидкості. Названі програми дають змогу сформувати рекомендації щодо збільшення кількості та виду вимірювальних променів (діаметральні або хордові) для конкретного УЗПВ. Також дослідження впливу цього фактора проводять у багатьох програмних засобах, що реалізують методи обчислювальної гідродинаміки (CFD – Computational Fluid Dynamics), а саме програмні пакети ANSYS Fluent, SolidWork (FloWorks), Comsol Multiphysics, Flow Vision, Matlab (PDE Toolbox, FEMLAB) та інші.

Теоретичну базу цього напряму заклали такі науковці, як Achim Hilgenstock (спеціаліст Ruhrgas AG) та Thomas Huwener (University of Essen) – одні з розробників програмного засобу «Kalibra», Lawrence C. Lynnworth (провідний інженер Panametrics), Jeker Delsing, Joel Clancy, Mario Kupnik, Per Lunde, Kjell-Elvind Froysa, П.П. Кремльовський, В.І. Філатов [1, 5, 8, 9] та багато інших, у роботах яких викладено фундаментальні засади ультразвукової витратометрії та принципи конструювання УЗПВ.

Для побудови УЗПВ розроблено та впроваджено ряд конструкцій, у яких поширення ультразвукових

імпульсів відбувається у діагональних площинах (площина, що завжди проходить через вісь трубопроводу). Своєю чергою, сам ультразвуковий імпульс випромінюється в газовий потік під певним кутом до осі вимірювального трубопроводу. Тому актуальним є завдання дослідження впливу спотворень кінематичної структури потоку на результат вимірювання швидкості газового потоку за допомогою УЗПВ із діаметральним акустичним каналом, встановленим під певним кутом до осі трубопроводу, як показано на рис.1.

Мета роботи – дослідити вплив спотворення профілю швидкості потоку на похибку УЗПВ та розробити рекомендації для удосконалення їх конструкції, щоб зменшити додаткову похибку внаслідок спотворення профілю швидкості потоку.

Для досягнення цієї мети в роботі виконано такі завдання:

1. За допомогою CAD (Computer Aided Design) / CEA (Computer Aided Engineering) – програми SolidWorks та її додаток FloWorks виконано моделювання потоку газу через ділянку вимірювального трубопроводу з місцевим опором (МО) “90° коліно”, на якій встановлено УЗПВ із діаметральним акустичним каналом.

2. На основі отриманих за допомогою SolidWorks результатів моделювання досліджено зміни профілю швидкості потоку після МО “90° коліно” вздовж вимірювальної ділянки трубопроводу.

3. Визначено оптимальний кут акустичного каналу відносно площини, в якій міститься 90° коліно, що забезпечує мінімальну похибку вимірювання швидкості потоку.

4. За результатами моделювання розроблено рекомендації щодо мінімізації впливу спотворення потоку на точність вимірювання швидкості за допомогою однопроменевого УЗПВ.

Виклад матеріалу. В практиці обліку природного газу та інших енергоносіїв застосовують [4, 10] УЗПВ із діаметральним акустичним каналом. Схематичне зображення конструкції таких УЗПВ наведено на рис. 1.

Серед конструкцій УЗПВ із діаметральним акустичним каналом виділяють такі:

1. Одноканальні УЗПВ (рис. 1, а) без відбивання акустичного променя, до складу яких входять два електроакустичні перетворювачі (ЕАП), що поперемінно реалізують функцію випромінювання акустичного імпульсу та його приймання.

2. Одноканальні УЗПВ (рис.1, б) з відбиванням акустичного променя від стінки УЗПВ або трубопроводу (відбивання може бути як одиничне, так і багаторазове).

3. Багатоканальні УЗПВ без відбивання акустичних променів.

4. Багатоканальні УЗПВ з відбиванням акустичних променів.

Для всіх цих конструкцій УЗПВ спотворення профілю швидкості потоку, які виникають після МО, тією чи іншою мірою впливають на точність вимірювання швидкості потоку і, відповідно, витрати.

Прямим способом усунення спотворення профілю швидкості потоку перед витратоміром є збільшення довжини прямолінійної ділянки перед УЗПВ. Цей спосіб потребує дослідження структури потоку після різних типів МО та визначення необхідних довжин прямолінійних ділянок. Інший спосіб полягає у застосуванні засобів підготовки потоку, встановлених перед УЗПВ. Проте в реальних умовах не завжди є можливість цю відстань збільшити або встановити пристрій підготовки потоку. Тоді виникає завдання удосконалення конструкції УЗПВ, щоб зменшити вплив спотворень потоку на результати вимірювання.

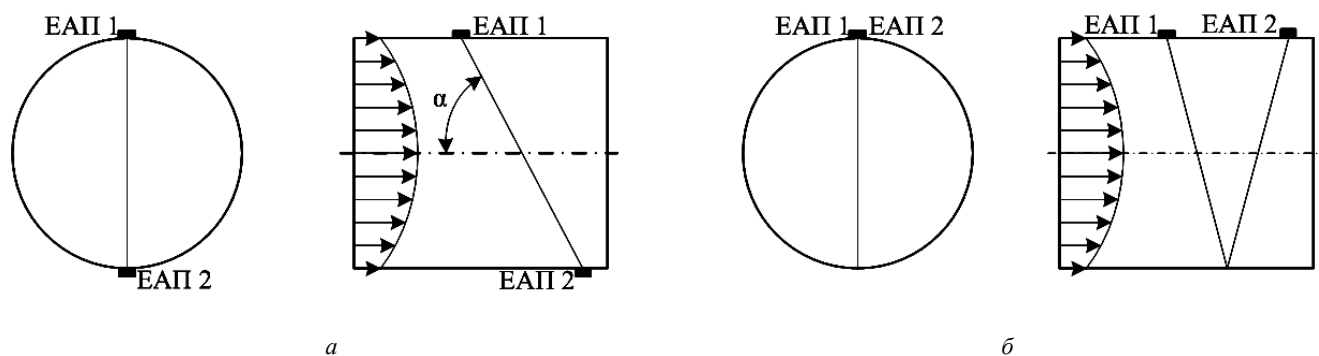


Рис. 1. Спрощена схема УЗПВ із діаметральним акустичним каналом:

а – одноканальний УЗПВ без відбивання променя; б – одноканальний УЗПВ із відбиванням променя

У цій роботі досліджено УЗПВ з одиничним діаметральним акустичним каналом, який для вимірювання швидкості газового потоку реалізує ультразвуковий різницевий часоімпульсний метод [2] без відбивання акустичного імпульсу та з наявністю двох ЕАП (рис. 1, а). Серед пропонованих на ринку УЗПВ ця конструкція реалізована у таких типах:

1. FLOWSIC 300R (виробник SICK MAIHAK) призначений для технологічного та комерційного обліку попутного нафтового, факельного, природного газів там, де точність, працездатність, довговічність і надійність має величезне значення.

2. FGM160 (виробник Fluenta AS) (Норвегія) спеціально розроблений для вимірювання витрати попутного нафтового газу, факельного газу і відхідних димових газів у великих газопроводах у разі значних коливань витрат і тисків.

3. PanaFlow конструкція «С» (виробник GE Panametrics) призначений для вимірювання витрати скраплених природних газів, стиснутих природних газів, паливних газів, газоподібних вуглеводнів.

Для моделювання процесу протікання газу у вимірювальному трубопроводі застосовано програмний пакет для обчислювальної гідродинаміки SolidWorks (FloWorks). Для числового розв'язання задач SolidWork застосовує метод кінцевих об'ємів і нестационарне рівняння Нав'є–Стокса, усереднене за Рейнольдсом (прийняте скорочення RANS), і теплопередачі. Усереднення за Рейнольдсом рівнянь Нав'є–Стокса означає, що для моделювання використовуються усереднені за малим масштабом часу впливи турбулентності на параметри потоку, а великомасштабні часові зміни усереднених за малим масштабом часу складових газодинамічних параметрів потоку (тиску, швидкості, температури) враховуються введенням відповідних похідних за часом. Дискретизація рівнянь виконується в консервативній формі, часткові похідні апроксимуються за допомогою різницевих схем із похибкою, порядок якої дорівнює квадрату кроку дискретизації моделі, похідні за часом – за неявною схемою Ейлера першого порядку [7].

У середовищі SolidWorks побудували твердотілу модель ділянки вимірювального трубопроводу, на якій встановлено УЗПВ. Для опису граничних умов у моделі вимірювального трубопроводу на його вході та виході встановлено допоміжні тіла (“заглушки”), які описують вміст вхідного та вихідного потоків. Поверхні “заглушок” обмежують розрахункову сітку. Під

час моделювання програмою встановлюється напрям потоку, перпендикулярний до цих поверхонь.

Моделювання вимірювального трубопроводу виконано для умови твердої непроникної адіабатичної стінки трубопроводу (умова Wall на стінках труби). На вхідній поверхні (вхідна заглушка) задано значення вхідної масової витрати (гранична умова Inlet Mass Flow) із задаванням температури потоку і параметрів турбулізації. На вихідній поверхні (вихідна заглушка) задано вихідний статичний тиск (гранична умова Static Pressure).

Вигляд модельованої ділянки вимірювального трубопроводу та її основні конструктивні параметри показано на рис. 2.

У зображеній моделі вимірювального трубопроводу УЗПВ розглядається як секція вимірювального трубопроводу завдовжки L . По довжині цієї секції розглядаємо сім перерізів, у кожному з яких моделюється розподіл швидкості по всьому перерізу. Початковий переріз відповідає входу в УЗПВ, а сьомий переріз відповідає виходу з УЗПВ (див. рис. 3). Кожен із сімох перерізів має певне розташування відносно осі Z , це розташування характеризується числом або координатою на осі OZ . Різниця між координатою сьомого перерізу і першого – це довжина вимірювальної секції УЗПВ, яка позначена на рис. 3 літерою L . За результатами аналізу конструкції серійних УЗПВ прийнято для моделювання значення $L = 1,8D$.

Після завантаження даних із сімох масивів, які містять значення швидкості в кожній точці перерізів, у програмному середовищі Matlab обчислюють усереднену швидкість потоку, яку вимірює одиничний діаметральний акустичний промінь, що пронизує всі сім перерізів. Усереднена швидкість потоку по довжині променя УЗПВ розраховується на основі значень, що знаходять у кожному із семи перерізів. Значення усередненої по акустичному каналу УЗПВ швидкості потоку V , обчислені для різних відстаней секції УЗПВ від МО “90° коліно”, наведені у таблиці.

Для кожного із отриманих значень швидкості V обчислено абсолютну похибку вимірювання Δ

$$\Delta = V - V_{\text{стаб}}, \quad (1)$$

де V – швидкість потоку, усереднена по довжині променя УЗПВ; $V_{\text{стаб}}$ – швидкість потоку, усереднена по довжині променя такого самого просторового розміщення, що й у секції УЗПВ, розміщеного на відстані $110D$ після МО “90° коліно”, тобто на відстані, достатній для відновлення структури потоку.

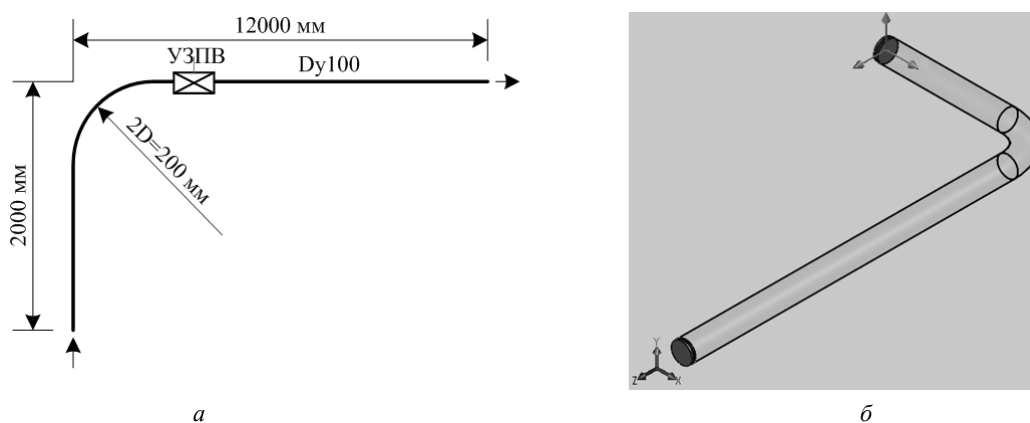


Рис. 2. Ділянка вимірювального трубопроводу для моделювання спотворення структури потоку в програмі SolidWorks (FloWorks): а – розрахункова схема; б – вигляд твердотілої моделі

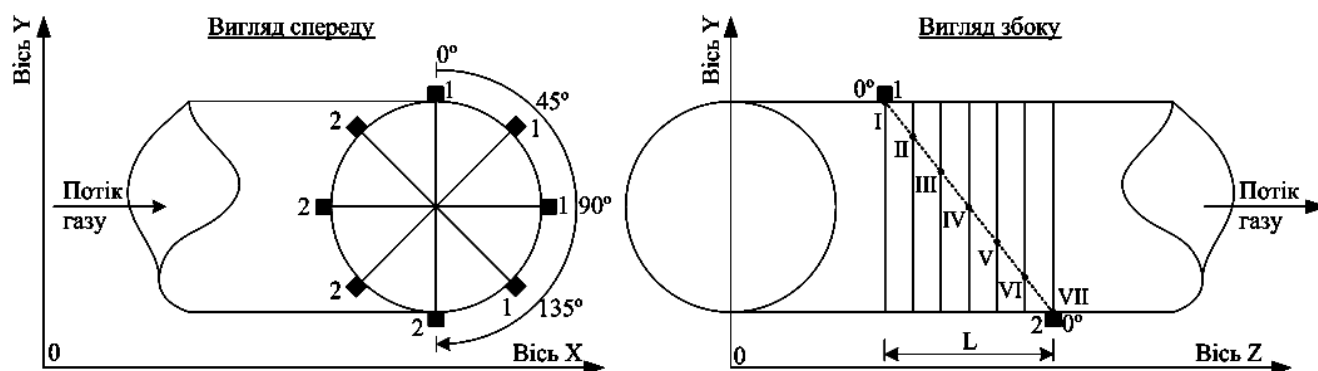


Рис. 3. Схема розміщення ЕАП під час моделювання одноканального УЗПВ: 1, 2 – ЕАП; L – довжина вимірювальної секції УЗПВ; I, II, III, IV, V, VI, VII – номери перерізів для моделювання УЗПВ

Результати моделювання усередненої вздовж акустичного променя швидкості потоку для одноканального УЗПВ

кут	L, м	5D	10D	15D	20D	30D	40D	50D	60D	100D
0	V, м/с	39,8250	39,9315	40,6511	40,6927	41,3407	41,4641	41,7493	42,1341	43,3016
	Δ , м/с	-3,4781	-3,3716	-2,6520	-2,6104	-1,9624	-1,8390	-1,5538	-1,1690	-0,0015
	δ , %	-8,0321	-7,7861	-6,1244	-6,0283	-4,5319	-4,2469	-3,5883	-2,6997	-0,0036
45	V, м/с	41,3463	42,7938	42,0941	43,1684	43,4778	43,0156	43,1493	43,2802	43,2800
	Δ , м/с	-2,0527	-0,6052	-1,3049	-0,2306	0,0788	-0,3834	-0,2497	-0,1188	-0,1190
	δ , %	-4,7298	-1,3945	-3,0067	-0,5313	0,1815	-0,8834	-0,5753	-0,2737	-0,2741
90	V, м/с	40,6172	41,4736	41,8395	41,3210	41,7679	42,0212	42,4927	42,8882	43,1241
	Δ , м/с	-2,6851	-1,8287	-1,4628	-1,9813	-1,5344	-1,2811	-0,8096	-0,4141	-0,1782
	δ , %	-6,2008	-4,2231	-3,3781	-4,5755	-3,5434	-2,9585	-1,8696	-0,9563	-0,4115
135	V, м/с	41,4286	43,5459	42,1621	44,0415	43,7583	43,2479	43,2519	43,2672	43,2895
	Δ , м/с	-1,8736	0,2437	-1,1401	0,7393	0,4560	-0,0542	-0,0503	-0,0349	-0,0127
	δ , %	-4,3268	0,5627	-2,6328	1,7073	1,0532	-0,1253	-0,1161	-0,0808	-0,0293

Відносну похибку вимірюваної швидкості потоку δ обчислено як відношення абсолютної похибки до значення усередненої швидкості стабілізованого потоку

$$\delta = (V - V_{\text{стаб}}) / V_{\text{стаб}} * 100. \quad (2)$$

На практиці монтаж пари ЕАП (1 та 2 на рис. 3) однопроменевого діаметрального УЗПВ може відбуватися під будь-яким кутом до площини встановлення МО “90° коліно”. При цьому слід монтувати пару ЕАП так, щоб акустичний промінь був розміщений у діаметральній площині. В цій статті розглянуто чотири варіанти діаметрального розміщення пари ЕАП, які показано на рис. 3 (кут акустичного каналу відносно осі ОУ дорівнює 0, 45, 90 та 135°).

Для досліджуваної ділянки вимірювального трубопроводу (див. рис. 2) виконано моделювання в програмному комплексі SolidWorks для таких значень параметрів потоку: масова витрата на вході $Q_m = 0,3$ кг/с, статичний тиск на виході $P_{\text{стат}} = 101325$ Па, температура газу $T_{\text{газ}} = 293,2$ К, газ – метан.

Значення усередненої швидкості потоку V , абсолютної Δ та відносної δ похибок вимірювання швидкості потоку, обчислені для вказаних вище параметрів потоку та для чотирьох значень кута акустичного каналу, наведені у таблиці.

Унаслідок роботи сил тертя тиск газового потоку вздовж вимірювального трубопроводу зменшується. Згідно із законом збереження маси інші параметри газового потоку (густина, швидкість) також змінюються вздовж вимірювального трубопроводу. Тому аналіз зміни швидкості потоку у різних перерізах по довжині вимірювального трубопроводу необхідно виконувати із урахуванням зміни швидкості, зумовленої втратами тиску по довжині вимірювального трубопроводу. Для того, щоб оцінити зміну швидкості по довжині вимірювального трубопроводу, ми виконали моделювання турбулентного потоку ($Re = 3,37 \cdot 10^5$), сформованого за умови вказаних вище параметрів у прямолинійній ділянці вимірювального трубопроводу, у якій протікає стабілізований потік із рівномірним розподілом швидкості по перерізу. Моделювання виконане для умов гладкої стінки трубопроводу (Roughness = 0 мкм). Для таких умов зміна швидкості потоку та тиску газу по довжині вимірювального трубопроводу є незначною: зміна тиску 0,029 % на 10D, зміна швидкості – 0,01 % на 10D. Враховуючи, що відносне відхилення швидкості потоку в досліджуваних перерізах має порядок цілих відсотків (див. таблицю), такі малі зміни швидкості внаслідок падіння тиску по довжині вимірювального

трубопроводу істотно не впливають на результати досліджень. Тобто аналіз довжини ділянки стабілізації потоку чи аналіз похибки вимірювання швидкості залежно від кута встановлення акустичного шляху можна виконувати прямим порівнянням швидкості потоку в перерізах вздовж вимірювального трубопроводу.

Аналіз похибки вимірювання швидкості потоку доцільно виконати для розміщення УЗПВ на ділянці вимірювального трубопроводу від 5D до 100D після МО “90° коліно”, оскільки саме на цій ділянці встановлюють переважну більшість витратомірів. Як видно із таблиці та рис. 4, якщо розташувати МО “90° коліно” перед УЗПВ у горизонтальній площині, найменше відхилення вимірюваного значення швидкості потоку d від швидкості неспотвореного потоку досягається на вказаній ділянці вимірювального трубопроводу за умови розміщення акустичного каналу під кутом 45 та 135°.

Для розміщення акустичного каналу під кутом 45° або 135° близькі і результати вимірювання швидкості потоку, і характер зміни відносного відхилення δ за довжиною ділянки. Тому похибка однопроменевих УЗПВ із діаметральними акустичними каналами під кутом 45° або 135° є менш залежною від площини встановлення МО “90° коліно”. Отже, метрологічні характеристики такого УЗПВ, отримані під час його калібрування на витратовимірювальній установці, будуть менше спотворені під час інсталяції після МО “90° коліно”. Тому рекомендується для однопроменевих УЗПВ із діаметральними променями встановлювати акустичні канали під кутом 45° або 135°. Таке розташування дає змогу забезпечити похибку вимірювання швидкості потоку, що не перевищує 1 % для ділянки встановлення УЗПВ від 30D до 100D після МО “90° коліно”.

Із рис. 4 видно, що для повністю стабілізованого потоку результат вимірювання швидкості потоку не залежить від кута встановлення акустичного каналу. Зокрема, для відстані від МО “90° коліно”, більшої за 90D, де потік стабілізований, що підтверджено аналізом профілю швидкості в перерізах на ділянці від 90D до 100D, відхилення між результатами вимірювання за допомогою акустичних каналів розміщених під різними кутами не перевищують 0,5 %.

На рис. 5 подано зміну профілю швидкості (ізо-ліній) по довжині УЗПВ. Множина значень швидкості у кожному перерізі представлена методом градієнтної зміни кольору заповнення. Із рис. 5 видно, що форма

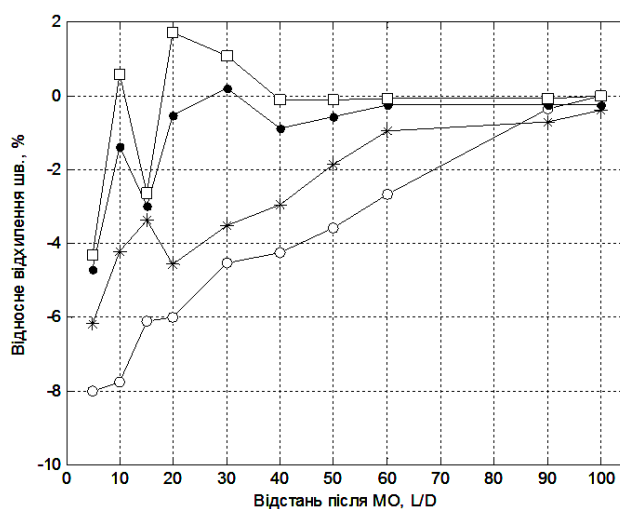


Рис. 4. Залежність відносного відхилення швидкості потоку від кута встановлення та відстані після МО "90° коліно": • – кут 45°, □ – кут 135°, ○ – кут 0°, * – кут 90°

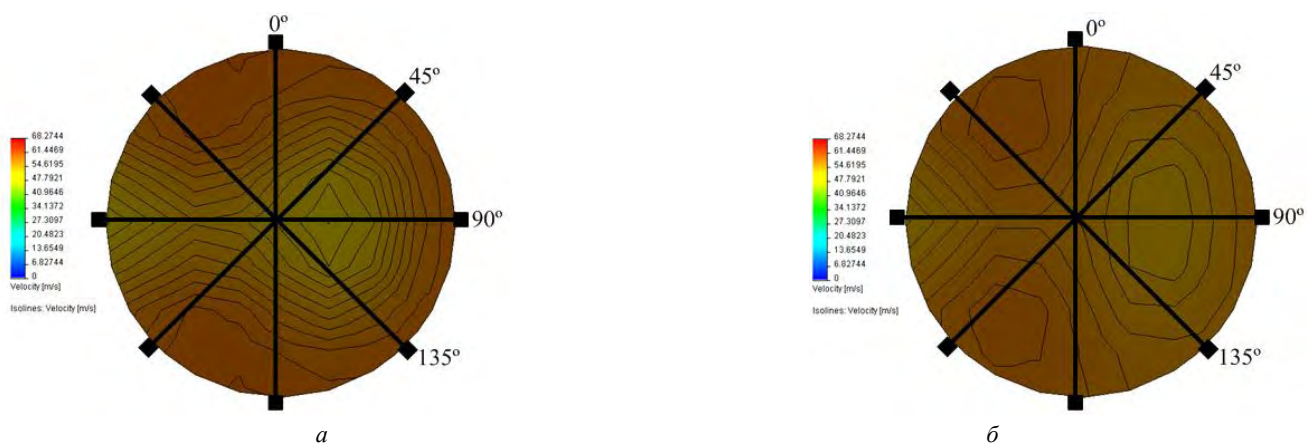


Рис. 5. Зображення структури потоку у вхідному та вихідному перерізах витратоміра та діаметральних акустичних променів УЗПВ з різним кутом встановлення ЕАП: а – відстань від 90° коліна 0,5 м (5D); б – відстань від 90° коліна 0,68 м (6,8D)

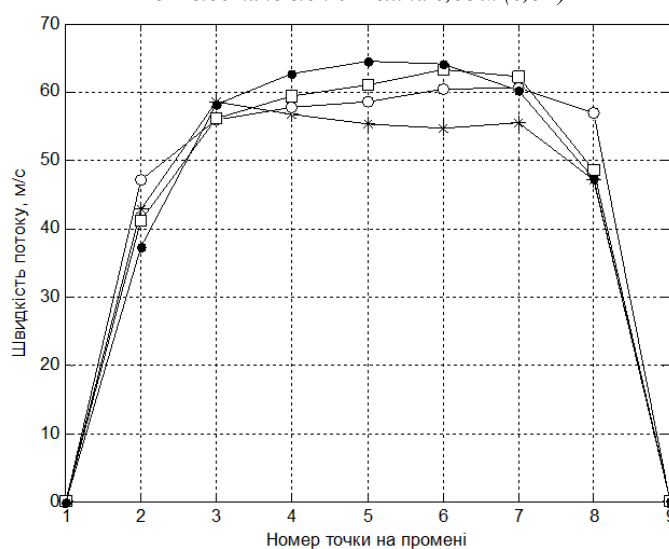


Рис. 6. Вигляд епюри швидкості потоку, коли однопроменеве УЗПВ встановлене на різних відстанях після МО "90° коліно" із кутом встановлення ЕАП, що дорівнює 135°: • 100D; □ 50D; ○ 20D; * 5D

залежить від площини розміщення МО “90° коліно” та відстані від нього до УЗПВ. За умов розглянутої орієнтації МО “90° коліно” ультразвуковий промінь, розміщений під кутом 90°, проходить через область профілю, найбільше спотворену внаслідок зміни швидкості та напрямку потоку під час протікання через МО “90° коліно”. Тобто результати визначення швидкості за цим променем мають найбільші відхилення від швидкості стабілізованого потоку (див. таблицю). Однак після МО іншого типу можуть виникати спотворення профілю в іншому секторі або сегменті перерізу [5]. Тобто в загальному випадку немає гарантії, що один промінь, розташований під будь-яким кутом, врахує спотворення профілю швидкості, а отже, однопроменеві УЗВ не забезпечують надійних та точних вимірювань в умовах спотворень профілю швидкості.

Дослідимо, як змінюється епіюра швидкості вздовж акустичного шляху, встановленого під кутом 135°, залежно від довжини відстані між місцевим опором та УЗПВ. Результати моделювання епіюри швидкості показано на рис. 6.

Як видно із рис. 6, крива епіюри швидкості, позначена символом “•”, має ідеальну форму перетину параболоїда обертання (парабола Пуазейля). Ця епіюра відповідає сформованому (неспотвореному) потоку після МО “90° коліно” на відстані 100D (10 м). За умови встановлення УЗПВ на невеликій відстані після 90° коліна (□ – відстань 50D; ○ – відстань 20D; * – відстань 5D), епіюра швидкості є деформованою і в кожному перерізі змінюється, її вигляд наближається до неспотвореного, коли збільшується відстань від цього МО. Важливо знайти таку відстань, коли за оптимального кута встановлення акустичного каналу (45°, 135°) епіюра потоку вздовж акустичного шляху вимірювального променя буде наближена до неспотвореної епіюри потоку на достатній для цього відстані від МО “90° коліно”. В таких умовах вплив спотворень потоку після МО “90° коліно” на точність вимірювання швидкості потоку є незначним.

Висновки. В результаті проведеної роботи можна виокремити такі результати та рекомендації:

1. Форма спотворення профілю швидкості після МО “90° коліно” істотно залежить від площини розміщення цього місцевого опору, що потребує особливої уваги під час встановлення УЗПВ із одним діаметральним акустичним променем.

2. Похибка однопроменевих діаметральних УЗПВ із розміщенням акустичного каналу під кутом 45° або 135° є менш залежною від площини встановлення МО “90° коліно” (вертикальна чи горизонтальна) порівняно із кутами встановлення 0° та 90°. Отже, метрологічні характеристики такого перетворювача, отримані під

час його калібрування на витратовимірювальній установці, будуть менше спотворені під час інсталяції після МО “90° коліно”.

3. За умови застосування УЗПВ у вимірювальний трубопровід не вводять ніяких конструктивних елементів витратоміра, які б змінювали структуру потоку, тому спотворення структури потоку, спричинені місцевими опорами (зокрема МО “90° коліно”), усуваються на великих відстанях після МО, а отже, однопроменеві УЗВ, встановлені без струменевипрямлячів чи пристроїв підготовки потоку, потребують особливо значних довжин прямолінійних ділянок.

4. Для одноканальних УЗПВ рекомендується встановлювати струменевипрямлячі або пристрої підготовки потоку для зменшення похибки вимірювання швидкості потоку та зменшення необхідних довжин прямолінійних ділянок перед УЗПВ.

1. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества вещества: справочник: кн. 2 // под общ. ред. Е.А. Щорникова. – 5-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Политехника, 2004.
2. Роман В.І. Аналіз ультразвукових методів та засобів вимірювання витрати газових потоків // Вісник Інженерної академії України. – К., 2012. – Вип. 3–4. – С. 270–276.
3. Покрас С.И., Покрас А.И., Гришанова И.А. Ультразвуковая расходометрия: как и зачем повышают точность измерений // Сборник трудов 23-й конференции «Коммерческий учет энергоносителей». – 2006. – № 5.
4. Стандарт организации. Расход и количество природного газа. Методика выполнения измерений с помощью ультразвуковых преобразователей расхода // СТО ГАЗПРОМ 5.2-2005, ООО «Информационно-рекламный центр газовой промышленности». – М., 2005.
5. Lunde P. GERG Project on Ultrasonic Gas Flow Meters, Phase II // P. Lunde, K.E. Froyso, M. Vestrheim, 2000.
6. Крук І.С., Болховітін М.І. Сучасні методи вимірювання витрати природного газу // Трубопровідний транспорт: наук.-вироб. журнал: ДК «Укртрансгаз». – К. – № 6 (72). – 2011. – С. 12–15.
7. SolidWorks. Компьютерное моделирование в современной практике // А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов и др. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005.
8. Filatov V.I. Analysys of an ultrasonic method of measuring the flow rate materials // Measurement Techniques, Vol. 43, No.1, 2000.
9. Kupnik M., Schroder A., O'Leary P., Benes E., and Gruyschl M. An ultrasonic transit-time gas flowmeter for automotive applications // in Proc. IEEE Sens. Conf., 2004, pp. 451–454.
10. ISO 17089-1:2010 Measurement of fluid flow in closed conduits – Ultrasonic meters for gas. Part 1: Meters for custody transfer and allocation measurement.