

Вплив гідродинамічних збурень на точність вимірювання швидкості потоку ультразвуковими витратомірами газу

Віталій Роман, Федір Матіко

Кафедра автоматизації теплових та хімічних процесів,
Національний університет "Львівська політехніка",
УКРАЇНА, м. Львів, вул. Устияновича, 5,
E-mail: roman_vitaliy@ukr.net

Abstract – The modeling of perturbed velocity profile of turbulent gas flow using computational fluid dynamics method (CFD) is carried out. The algorithm for determining the average velocity along the acoustic path is developed using the results of CFD-modeling. The effect of influence of flow profile distortions produced by the fitting "90° elbow" on the average velocity measurement error is investigated for single channel ultrasonic flowmeter with diametrical acoustic channels. Modeling of such flowmeter is carried out for various angles of the plane of diametrical acoustic channel (0°, 45°, 90° and 135°). The dependence of the relative deviation (error) of average velocity on the angle of acoustic channel and on the distance between the flowmeter and the fitting "90° elbow" is investigated. The angle of acoustic channel of ultrasonic flowmeter that provides the minimum error of flow velocity measurement downstream of fitting "90° elbow" is defined. The distance between the ultrasonic flowmeter and the fitting "90° elbow" is defined to provide the velocity measurement error smaller than 0.5%.

Ключові слова – розрахункова гідродинаміка, турбулентний потік, ультразвуковий перетворювач витрати, акустичний діаметральний канал, профіль швидкості, місцевий опір.

I. Вступ

Одним із сучасних методів вимірювання витрати та кількості газу (в тому числі 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 природного газу.

Всі ультразвукові перетворювачі витрати (УЗПВ) в тій чи іншій мірі піддаються дії різноманітних факторів, що впливають на їх метрологічні характеристики. Серед цих факторів виділяють два класи: внутрішні (залежать від самого УЗПВ) та зовнішні (які залежать від газового середовища).

Одним із зовнішніх факторів є вплив спотворень кінематичної структури потоку на результат вимірювання швидкості газового потоку за допомогою УЗПВ. Завдання дослідження цього впливу є важливим та актуальним.

Для побудови УЗПВ розроблено та впроваджено ряд конструкцій [1, 2], у яких поширення ультразвукових імпульсів відбувається в діаметральних площинах (площина що завжди проходить через вісь трубопроводу), як показано на Рис.1. В цій роботі досліджено вплив спотворення профілю швидкості

потоку на похибку УЗПВ із діаметральним акустичним каналом.

II. Моделювання потоку в УЗПВ

В практиці обліку природного газу та інших енергоносіїв застосовують [3, 5] УЗПВ із діаметральним акустичним каналом (Рис.1).

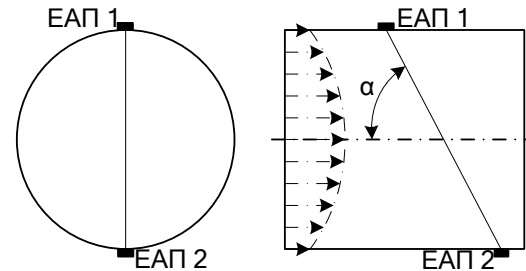


Рис. 1. Спрощена схема УЗПВ із діаметральним акустичним каналом без відбивання променя (ЕАП – електроакустичний перетворювач)

В 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 наявністю двох електроакустичних перетворювачі (ЕАП) (Рис.1). Серед існуючих на ринку УЗПВ ця конструкція реалізована у таких типах:

1. FLOWSIC 300R (виробник SICK МАІНАК) призначений для обліку попутного нафтового, факельного, природного газів там, де точність, працездатність, довговічність і надійність має велике значення.

2. FGM160 (Fluenta AS, Норвегія) спеціально розроблений для вимірювання витрати попутного нафтового, факельного газу і відхідних димових газів у великих газопроводах при значних коливаннях витрати і тиску.

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 нами застосовано програмний пакет для обчислювальної гідродинаміки SolidWorks (FloWorks). Для проведення числового розв'язку задач, SolidWork застосовує метод кінцевих об'ємів і нестационарне рівняння Нав'є-Стокса усереднене по Рейнольдсу (прийняте скорочення RANS) і теплопередачі. Нами побудовано у середовищі SolidWorks твердотілу модель ділянки вимірювального трубопроводу на якій встановлено УЗПВ.

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 трубопроводу та її основні конструктивні параметри показано на Рис.2.

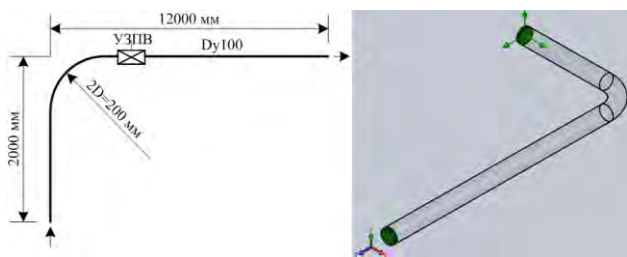


Рис. 2. Вигляд твердотілої моделі вимірювального трубопроводу в SolidWorks та розрахункової схеми

У зображеній моделі вимірювального трубопроводу УЗПВ розглядається як секція вимірювального трубопроводу довжиною L . По довжині цієї секції розглядаємо 7 перерізів, у кожному з яких моделюється розподіл швидкості по всьому перерізу. Початковий переріз відповідає входу в УЗПВ а сьомий переріз відповідає виходу з УЗПВ (Рис.3). Кожен із сімох перерізів має своє розташування по відношенню до осі Z , це розташування характеризується числом або координатою на осі OZ . Різниця між координатою сьомого перерізу і першого складає довжину вимірювальної секції УЗПВ. За результатами аналізу конструкції серійних УЗПВ прийнято для моделювання значення $L = 1,8D$.

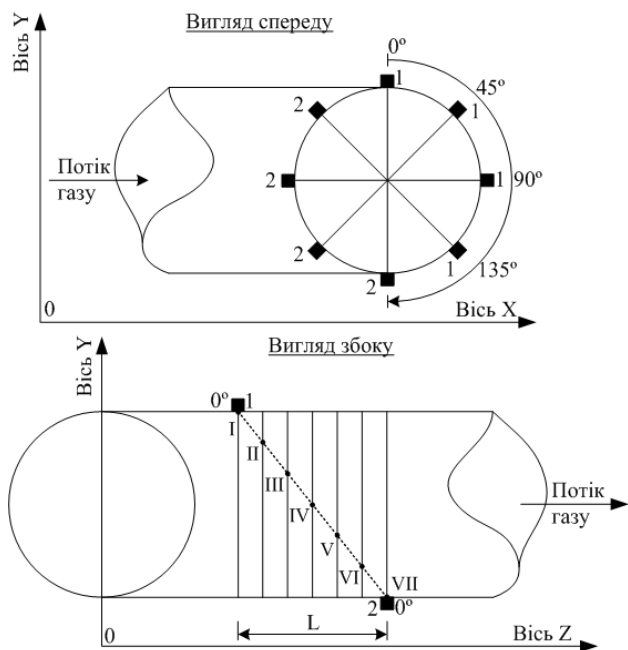


Рис. 3. Схема розміщення ЕАП під час моделювання одноканального УЗПВ: 1, 2 – ЕАП; L – довжина вимірювальної секції УЗПВ; I... VII – номери перерізів для моделювання УЗПВ

Після завантаженням даних із сімох масивів, які містять значення швидкості в кожній точці перерізів, в програмному середовищі Matlab проводиться обчислення усередненої швидкості потоку, яку вимірює одиничний діаметральний акустичний промінь, що пронизує всі сім перерізів. Усереднена швидкість

потоку по довжині променя УЗПВ розраховується на основі значень що знаходяться в кожному із семи перерізів. Значення усередненої по акустичному каналу УЗПВ швидкості потоку V , обчислені для різних відстаней секції УЗПВ від МО типу «90° коліно», наведені у Табл.1.

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 ж просторового розміщення, що й у секції УЗПВ, розміщеного на відстані $110D$ після МО «90° коліно», тобто на відстані достатній для відновлення структури потоку.

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 у діаметральній площині під будь-яким кутом до площини встановлення МО. В цій статті розглянуто чотири варіанти діаметрального розміщення пари ЕАП, які показані на Рис.3 (кут акустичного каналу відносно осі OY рівний 0, 45, 90 та 135°).

III. Дослідження похибки вимірювання швидкості потоку

Для досліджуваної ділянки вимірювального трубопроводу (Рис.2) виконано моделювання в програмному комплексі SolidWorks для таких значень параметрів потоку: масова витрата на вході $Q_m=0,3\text{кг/с}$, статичний тиск на виході $P_{\text{стаб}}=101325\text{Па}$, температура газу $T_{\text{газ}}=293,2\text{К}$, 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 Табл.1.

ТАБЛИЦЯ 1

РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ УСЕРЕДНОЇ ВЗДОВЖ АКУСТИЧНОГО ПРОМЯКА ШВИДКОСТІ ПОТОКУ ДЛЯ ОДНОКАНАЛЬНОГО УЗПВ

кут	$L, \text{м}$	$5D$	$50D$	$100D$
0	$V, \text{м/с}$	39,8250	41,7493	43,3016
	$\Delta, \text{м/с}$	-3,4781	-1,5538	-0,0015
	$\delta, \%$	-8,0321	-3,5883	-0,0036
45	$V, \text{м/с}$	41,3463	43,1493	43,2800
	$\Delta, \text{м/с}$	-2,0527	-0,2497	-0,1190
	$\delta, \%$	-4,7298	-0,5753	-0,2741
90	$V, \text{м/с}$	40,6172	42,4927	43,1241
	$\Delta, \text{м/с}$	-2,6851	-0,8096	-0,1782
	$\delta, \%$	-6,2008	-1,8696	-0,4115
135	$V, \text{м/с}$	41,4286	43,2519	43,2895
	$\Delta, \text{м/с}$	-1,8736	-0,0503	-0,0127
	$\delta, \%$	-4,3268	-0,1161	-0,0293

Внаслідок 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 врахуванням зміни швидкості, зумовленої втратами тиску по довжині вимірювального трубопроводу. Для того, щоб оцінити зміну швидкості по довжині вимірювального трубопроводу нами виконане 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=0мкм). Для таких умов зміна швидкості потоку та тиску газу по довжині вимірювального трубопроводу є незначними: зміна тиску 0,029% на 10D, зміна швидкості – 0,01% на 10D, що дозволяє дослідити саме вплив спотворень структури потоку на вимірюване значення швидкості газу. Тобто, аналіз довжини ділянки стабілізації потоку, чи аналіз похибки вимірювання швидкості в залежності від кута встановлення акустичного шляху можна виконувати прямим порівнянням швидкості потоку у 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 Табл.1 та Рис.4, при розташуванні МО «90° коліно» перед УЗПВ в горизонтальній площині, найменше відхилення вимірюваного значення швидкості потоку δ 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° близькими є 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 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 дозволяє 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 90D, де потік стабілізований, що підтверджено аналізом профілю швидкості в перерізах на ділянці від 90D до 100D, відхилення між результатами вимірю-

вання за допомогою акустичних каналів розміщених під різними кутами не перевищують 0,5%.

На Рис.5 представлено зміну профілю швидкості (ізоліній) по довжині УЗПВ. Множина значень швидкості у кожному перерізі представлена методом градієнтної зміни кольору заповнення.

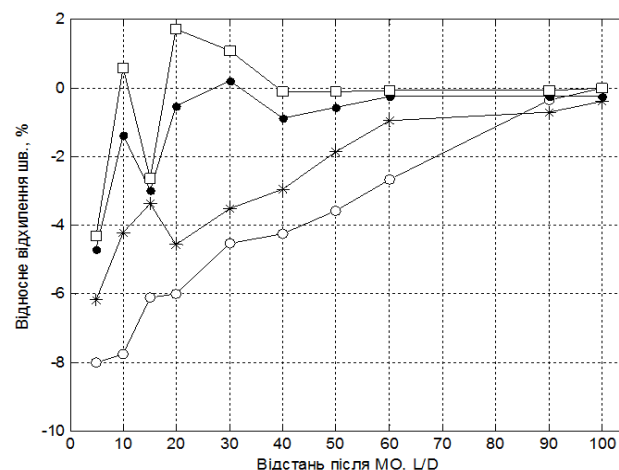


Рис. 4. Залежність відносного відхилення швидкості потоку від кута встановлення та відстані після МО «90° коліно»:

• - кут 45°, □ – кут 135°, ○ – кут 0°, * - кут 90°

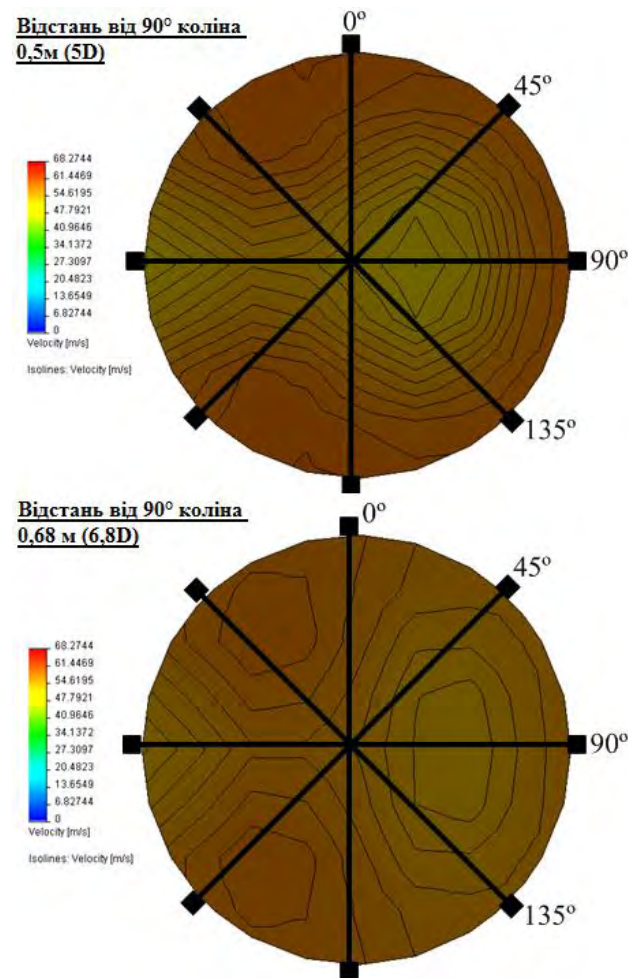


Рис. 5. Зображення структури потоку у входному та вихідному перерізах УЗПВ та діаметральних акустичних променів з різним кутом встановлення ЕАП

Із Рис.5 видно, що форма спотворення профілю швидкості істотно 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 при протіканні через МО «90° коліно». Тобто результати визначення швидкості за цим променем мають найбільші відхилення від швидкості стабілізованого потоку (Табл.1). Однак після МО іншого типу можуть виникати спотворення профілю у іншому секторі або сегменті перерізу [4]. 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 епора швидкості вздовж акустичного шляху, встановленого під кутом 135°, в залежності від довжини відстані між місцевим опором та УЗПВ. Результати моделювання епори швидкості показані на Рис.6.

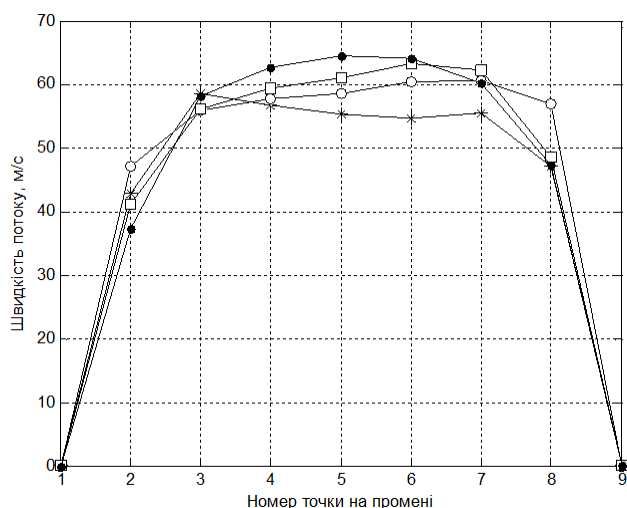


Рис. 6. Вигляд епори швидкості потоку при встановленні однопроменевого УЗПВ на різних відстанях після МО «90° коліно» із кутом встановлення ЕАП рівним 135°:
 ● 100D; □ 50D; ○ 20D; * 5D

Як видно із Рис.6, епора швидкості позначена лінією ● має ідеальну форму перетину гіперболіди обертання (парабола Пуазейля). Ця епора відповідає сформованому, стабілізованому (неспотвореному) потоку після МО «90° коліно» на відстані 100D (10м). За умови встановлення УЗПВ на невеликій відстані після «90° коліна» (□ - відстань 50D; ○ - відстань 20D; * - відстань 5D), епора швидкості є деформованою і в кожному перерізі змінюється наближаючи свій вигляд до неспотвореного при збільшенні відстані від цього МО. Важливим є знаходження такої відстані, коли при оптимальному куті встановлення акустичного каналу (45, 135°) епора потоку вздовж акустичного шляху вимірювального променя буде наближена до неспотвореної епори 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 наступні результати та рекомендації:

1. Форма спотворення профілю швидкості після МО «90° коліно» істотно залежить від площини розміщення цього місцевого опору, що вимагає особливої уваги при встановленні 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) у порівнянні 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 значних відстанях після МО, а отже однопроменеві УЗВ, встановлені без струменевипрямлячів чи пристроїв підготовки потоку вимагають особливо значних довжин прямолінійних ділянок. Рекомендується встановлювати струменевипрямлячі або пристрої підготовки потоку.

References

- [1] P. P. Kremlevskij *Rashodomery i schetchiki kolichestva veshhestva: Spravochnik [Flow and volume meters for fluids: Handbook]*, 5th ed., vol.2. Saint Petersburg: Politehnika Publ., 2004.
- [2] V. I. Roman, "Analiz ul'trazvukovyh metodiv ta zasobiv vymirjuvannja vytraty gazovyh potokiv" ["Analysis of ultrasonic methods and tools for gas flow measurement"], *Visnyk inzhenernoi' akademii' Ukrainy – Bulletin of Engineering Academy of Ukraine*, no.3-4, pp.270-276, 2012.
- [3] STO Gazprom. *Obespechenie edinstva izmerenij. Rashod i kolichestvo prirodnoho gaza. Metodika vypolnenija izmerenij s pomoshh'ju ul'trazvukovogo preobrazovatelej rashoda [STO Gazprom. Provision of uniformity of measurements. Natural gas flow rate and amount. Procedure of measurements with ultrasonic flow transducer]*, STO Gazprom 5.2, 2005.
- [4] P. Lunde, K. E. Frøysa, M. Vestheim, "GERG Project on Ultrasonic Gas Flow Meters, Phase II", *Groupe Européen de Recherches Gazières, GERG TM 11*.
- [5] ISO Measurement of fluid flow in closed conduits - Ultrasonic meters for gas. Part 1: Meters for custody transfer and allocation measurement, ISO 17089-1, 2010.