

УДК 681.121.89.082.4

ВИЗНАЧЕННЯ КАЛІБРУВАЛЬНОГО КОЕФІЦІЄНТА УЛЬТРАЗВУКОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ВИТРАТИ ІЗ ДІАМЕТРАЛЬНИМ АКУСТИЧНИМ КАНАЛОМ**Ф.Д. Матіко, В.І. Роман***

Національний університет "Львівська політехніка", вул. С.Бандери, 12, м. Львів,
79013, тел. (032) 258-25-16, e-mail: roman_vitaliy@ukr.net

Здійснений порівняльний аналіз відомих аналітичних залежностей для розрахунку калібрувального коефіцієнта ультразвукових перетворювачів витрати з діаметральним акустичним каналом. Розроблено новий алгоритм визначення калібрувального коефіцієнта ультразвукових перетворювачів витрати із таким акустичним каналом. На основі сучасних моделей турбулентності та методів обчислювальної гідродинаміки виконано моделювання стаціонарного потоку газу у вимірjuвальній секції ультразвукового витратоміра. За результатами моделювання визначено за розробленим алгоритмом значення калібрувального коефіцієнта для чотирьох варіантів (кути 0°, 45°, 90° та 135°) розміщення площини діаметрального акустичного каналу ультразвукового перетворювача витрати за умови гладкої внутрішньої поверхні вимірjuвального трубопроводу. Встановлено, що значення коефіцієнта калібрування, отримані за розробленим алгоритмом добре узгоджуються із результатами розрахунку за аналітичними рівняннями, отриманими на основі степеневого закону розподілу швидкості.

Ключові слова: вимірjuвання витрати, ультразвуковий перетворювач, коефіцієнт калібрування, закон розподілу швидкості, турбулентний потік, акустичний шлях, обчислювальна гідродинаміка.

Представлен сравнительный анализ известных аналитических зависимостей для расчета калибровочного коэффициента ультразвуковых преобразователей расхода с диаметральной акустическим каналом. Разработан новый алгоритм определения калибровочного коэффициента ультразвуковых преобразователей расхода с диаметральной акустическим каналом. На основе современных моделей турбулентности и методов вычислительной гидродинамики выполнено моделирование стационарного потока газа в измерительной секции ультразвукового расходомера. По результатам моделирования определены по разработанному алгоритму значения калибровочного коэффициента для четырех вариантов (углы 0°, 45°, 90° и 135°) размещения плоскости диаметрального акустического канала ультразвукового преобразователя расхода при гладкой внутренней поверхности измерительного трубопровода. Установлено, что значение коэффициента калибровки, полученные по разработанному алгоритму хорошо согласуются с результатами расчета по аналитическим уравнениям, полученными на основе степенного закона распределения скорости.

Ключевые слова: измерение расхода, ультразвуковой преобразователь, коэффициент калибровки, закон распределения скорости, турбулентный поток, акустический путь, вычислительная гидродинамика.

The comparative analysis of known analytical relations to calculate the calibration coefficient of ultrasonic transducers with diametric acoustic channel is presented. A new algorithm for determining the calibration coefficient of ultrasonic transducers with diametric acoustic channel is developed. It allows to calculate the value of the calibration factor on the basis of CFD-modeling. Modeling of steady flow of gas in the measuring section of the ultrasonic flowmeter is made on the basis of the modern turbulence models and methods. The calibration coefficient for the four locations of the plane of the diametric acoustic channel (angles 0°, 45°, 90° and 135°) is calculated using developed algorithm and modeling results for a smooth inner surface of the measuring pipe. It is confirmed that the values of the calibration coefficient obtained by developed algorithm are in good agreement with the values of the calibration coefficient calculated by analytical equations obtained from a power law of the velocity distribution.

Keywords: flow measurement, ultrasonic transducer, calibration factor, the law of velocity distribution, turbulent flow, the acoustic path, computational fluid dynamics.

Вступ

Постійний розвиток і широке застосування ультразвукових перетворювачів витрати (УЗПВ) під час транспортування та обліку плинних енергоносіїв вимагають детального вивчення їх працездатності та поведінки в різних технологічних умовах.

Зважаючи на високу вартість вимірювальних полігонів для фізичного експерименту, для дослідження витратомірів доцільно використовувати обчислювальну гідродинаміку (Computational Fluid Dynamics - CFD) як підрозділ чисельних методів моделювання. Перевагою обчислювальної гідродинаміки CFD є можливість дослідження пристроїв та процесів на основі математичних моделей, що описують газо- та гідродинаміку плинних середовищ. В останній час такий підхід часто застосовується для розробки та дослідження засобів вимірювання витрати та кількості.

Одним із важливих завдань, які необхідно вирішити під час розробки ультразвукового витратоміра є визначення калібрувального коефіцієнта УЗПВ. У багатьох практичних випадках калібрувальний коефіцієнт визначають експериментальним шляхом. Однак успіхи обчислювальної гідродинаміки створюють передумови для розроблення методів визначення цього коефіцієнта на основі CFD-методів та моделей, особливо для простих діаметральних конструкцій УЗПВ.

Метою даної роботи є порівняльний аналіз відомих аналітичних залежностей для розрахунку калібрувального коефіцієнта УЗПВ з діаметральними акустичними каналами та синтез алгоритму визначення калібрувального коефіцієнта на основі результатів CFD-моделювання.

Для досягнення цієї мети в роботі виконано такі завдання:

1) за допомогою програмного пакету SolidWorks авторами змодельований потік газу через прямолинійну ділянку достатньої довжини для отримання усталеного турбулентного потоку. При моделюванні проведено імітацію декількох варіантів розміщення акустичних каналів УЗПВ (зміщення між каналами складає 45° один відносно одного);

2) застосовуючи розроблений авторами алгоритм, визначено калібрувальний коефіцієнт для чотирьох інсталяцій УЗПВ;

3) проведено порівняння значень калібрувального коефіцієнта, отриманих на основі результатів CFD-моделювання, із значеннями, отриманими за відомими теоретичними залежностями.

Аналіз відомих досліджень та публікацій

В роботі [1] представлено декілька залежностей для розрахунку калібрувального коефіцієнта УЗПВ. Перша аналітична залежність для розрахунку калібрувального коефіцієнта УЗПВ представлена у роботі [2] і розроблена на основі рівняння розподілу швидкостей Прандтля. Для отримання цієї залежності використано багато емпіричних характеристик потоку, що обмежує її область застосування. В роботі [3] на фундаментальному рівні було виведено залежність калібрувального коефіцієнта від числа Рейнольдса на базі логарифмічного закону розподілу швидкості. Показано, що значення швидкості, вимірюване з допомогою діаметрального УЗПВ, на 4-8% відрізняються від дійсної середньої швидкості потоку, отже результати вимірювання швидкості за допомогою такого УЗПВ потрібно коригувати введенням калібрувального коефіцієнту. В роботі [4] було виведено емпіричну залежність калібрувального коефіцієнта від числа Рейнольдса на базі результатів інтегрування експериментальних кривих розподілу швидкості, отриманих Нікурадзе. В роботі [5] було виведено залежність калібрувального коефіцієнта від числа Рейнольдса за уточненою регресивною моделлю. В діапазоні $2 \cdot 10^4 \leq Re \leq 1 \cdot 10^6$ різниця між розробленою залежністю та відомим логарифмічним рівнянням не виходить за межі 0,5... 0,8%.

Однак розроблені аналітичні залежності мають ряд недоліків:

- залежності в роботах [2÷4] не враховують наявність ламінарного граничного прошарку біля стінок трубопроводу або частково враховують [5], від чого процес стає математично трудомістким і вимагає розв'язку нелінійних рівнянь в реальному масштабі часу;

- всі залежності не враховують вплив поля температур у поперечному перерізі потоку;

- логарифмічна модель розподілу швидкостей, що застосована в роботах [2, 3], недостатньо точно описує реальний закон розподілу швидкостей поблизу стінок труби і поблизу осьової лінії;

- залежності в роботах [2÷4] справедливі для діапазону Re від $5 \cdot 10^3$ до $5 \cdot 10^6$ [6].

Зважаючи на недоліки розглянутих рівнянь визначення калібрувального коефіцієнта, доцільним є застосування CFD-моделювання, яке дозволяє враховувати ламінарні прошарки рухомого турбулентного потоку та вплив поля температур, використовуючи різні моделі турбулентності та чисельні методи в зручному інтерактивному режимі.

Виклад основного матеріалу

Для моделювання процесу вимірювання витрати за допомогою ультразвукових перетворювачів витрати нами побудовано у середовищі SolidWorks 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 формують вхідний та вихідний потоки. Поверхні «заглушок» обмежують розрахункову сітку. Під час моделювання програмою встановлюється напрям потоку, який перпендикулярний до цих поверхонь.

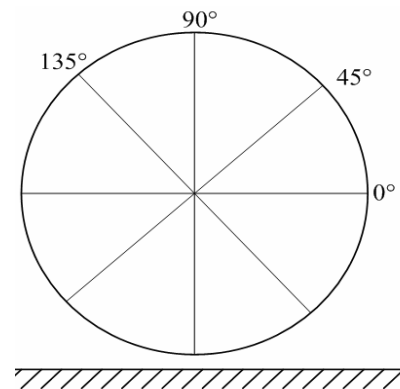
Моделювання вимірювального трубопроводу виконано для умови твердої непроникної адиабатичної стінки трубопроводу (умова Wall на стінках труби). На вхідній поверхні (вхідна «заглушка») задано значення вхідної масової витрати (гранична умова Inlet Mass Flow) із заданням температури потоку і параметрів турбулізації.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

Моделювання виконане на таких засадах: вимірювальний трубопровід має круглу форму, розподіл швидкості по перерізу потоку володіє осью симетрією (стабілізований, без спотворення кінематичної структури) (рис. 1, б), потік є турбулентним, що характерно для переважної більшості промислових вимірювань витрати.

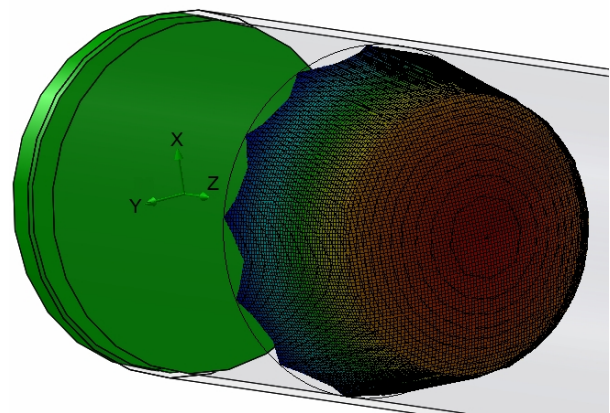
Моделювання в SolidWorks виконано для таких значень параметрів потоку: статичний тиск на виході дорівнює 201325 Па, температура газу становить 293.2 К, газ – метан. Основними конструктивними параметрами вимірювального трубопроводу є діаметр, що рівний 0,1 м та довжина прямолінійної ділянки, яка рівна 6м (60D).

Виконавши моделювання потоку, виконують обробку отриманих результатів в програмному засобі MATLAB, відтворюючи роботу УЗПВ для чотирьох варіантів розміщення діаметрального акустичного каналу: 0°, 45°, 90°, 135° (рис. 1, б).

Під час моделювання на переріз вимірювального трубопроводу накладено сітку (рис. 1, б) із кроком 0,001 м. Це дозволило отримати для вимірювального трубопроводу діаметром 100 мм 7555 вузлів. В процесі CFD-моделювання в кожному з цих вузлів отримано значення шістнадцяти параметрів потоку, зокрема і швидкість потоку. Тобто для перерізу трубопроводу сформовано масив із 7555 значень швидкості.



а)



б)

Рисунок 1 - Спрощений вигляд перерізу трубопроводу з акустичними каналами (а) та накладена на цей переріз розрахункова сітка в програмі SolidWorks (б)

Об'ємна витрата, яку вимірює УЗПВ, визначається на основі швидкості потоку U_L , виміряної вздовж акустичного шляху. Однак, як було вказано вище, ця швидкість не дорівнює усередненій швидкості потоку по площині поперечного перерізу U_S . Усереднена вздовж акустичного каналу швидкість потоку U_L і усереднена по перерізу швидкість U_S можуть бути рівними тільки у випадку прямокутного трубопроводу, до того ж, нескінченно широкого [3]. Для трубопроводів круглого перерізу необхідно вводити калібрувальний коефіцієнт

$$k = U_S / U_L. \quad (1)$$

В різноманітній науково-технічній літературі цей коефіцієнт може мати різні назви: гідродинамічний коефіцієнт, коефіцієнт корекції, meter factor, flow profile factor, поправковий множник на профіль потоку.

За умови введення такого коефіцієнта спрощене рівняння для визначення об'ємної

витрати за допомогою УЗПВ має такий вигляд:

$$q = SU_S = \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) k U_L, \quad (2)$$

де q – об'ємна витрата середовища; k – калібрувальний коефіцієнт; D – внутрішній діаметр вимірювального трубопроводу; S – площа поперечного перерізу вимірювального трубопроводу.

Отже, як видно із формул (1) та (2), калібрувальний коефіцієнт зв'язує фізично виміряну швидкість потоку УЗПВ (U_L) із усередненою по перерізу швидкістю (U_S). На практиці значення цього коефіцієнта знаходять, як правило, індивідуально для кожного УЗПВ за допомогою процесу калібрування на спеціальних установках. Проте існують УЗПВ з діаметральним розміщенням акустичних каналів (такі як FLOWSIC 100 Flare, MPU 200 Series B), зокрема, для вимірювання витрати високошвидкісних факельних газів або інших завдань невисокої точності, де відносна похибка лежить в межах $\pm 1,5 \dots 5\%$. В таких випадках калібрування на спеціальних установках можна замінити застосуванням аналітичної залежності для визначення калібрувального коефіцієнта.

Для того, щоб отримати аналітичну залежність калібрувального коефіцієнта згідно формули (1), застосовують такі аналітичні вирази:

$$U_S = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R U_R 2\pi r dr, \quad (3)$$

$$U_L = \frac{1}{R} \int_0^R U_R dr, \quad (4)$$

де U_S – усереднена швидкість потоку по площині поперечного перерізу; U_L – усереднена швидкість по акустичному каналу УЗПВ; U_R – швидкість на відстані r від центру трубопроводу для симетричного відносно осі вимірювального трубопроводу потоку; R – внутрішній радіус трубопроводу.

В турбулентних потоках розподіл швидкості по перерізу потоку U_R залежить від числа Рейнольдса та шорсткості внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу [7]. Однак, багатьма науковцями розроблено залежності швидкості по перерізу турбулентного потоку тільки від відстані точок від центру потоку.

Основоположними роботами в цьому напрямі стали роботи Базена (1902), який запропонував закон розподілу, виражений четвертиною еліпса, Хрістена (1904), який замість еліпса запропонував взяти параболу

восьмого порядку. Крей (1927) запропонував взяти для закону розподілу логарифмічну криву. Для чисел Рейнольдса в межах від 10000 до 30000 Карманом (1928), Нікурадзе (1926), Кірстеном (1929) і Стантоном (1911) було проведено ряд ґрунтовних досліджень і запропоновано степеневий закон розподілу ($n = 1/7$). В подальшому в роботах вище перерахованих науковців а також інших (Дарсі, Паннел, Мебіус) було проведено експериментальне підтвердження правильності степеневому закону розподілу ($n = 1/8 \div 1/10$) на високих числах Рейнольдса ($Re > 650\,000$) [7].

В результаті було виокремлено два закони, за допомогою яких найчастіше описують профіль турбулентного потоку або розподіл швидкості по перерізу вимірювального трубопроводу U_R : степеневий та логарифмічний (закон Прандтля).

Розрахунок калібрувального коефіцієнта для степеневому закону розподілу

Рівняння калібрувального коефіцієнта k для степеневому закону розподілу швидкості U_R отримали Ківіліс та Решетніков [4] на основі обробки та інтегрування кривих розподілу (експериментальні дані), отриманих Нікурадзе.

В загальному випадку степеневий закон розподілу швидкостей, отриманий Нікурадзе, виглядає наступним чином:

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

де u_{\max} – максимальна швидкість неспотвореного потоку або осьова швидкість в центрі труби; n – показник степеня що залежить від числа Рейнольдса; r – відстань від осі до точки визначення швидкості потоку.

Значення n для будь-якого числа Рейнольдса Re обчислюють за рівнянням [1]:

$$n = (11,269 - 3,019 \lg(Re) + 0,4321 \lg^2(Re)). \quad (6)$$

Підставивши вирази (3) – (6) у формулу (1), отримаємо рівняння калібрувального коефіцієнта для степеневому закону розподілу:

$$k = \frac{U_S}{U_L} = \frac{\frac{1}{\pi R^2} \int_0^R U_R 2\pi r dr}{\frac{1}{R} \int_0^R U_R dr} = \frac{\frac{1}{\pi R^2} \int_0^R \left(u_{\max} \left(\frac{1-r}{R} \right)^{-n} \right) 2\pi r dr}{\frac{1}{R} \int_0^R \left(u_{\max} \left(\frac{1-r}{R} \right)^{-n} \right) dr}. \quad (7)$$

Слід відмітити, що при виведенні рівняння калібрувального коефіцієнта k у роботі [4] застосовано не аналітичний вираз (7), а табличні експериментальні дані розподілу швидкості Нікурадзе. Обчислюючи значення швидкостей U_S та U_L методом числового інтегрування, авторами [4] одержано наступну залежність калібрувального коефіцієнта від числа Рейнольдса:

$$k = \frac{1}{1,12 - 0,011 \lg(\text{Re})}. \quad (8)$$

Залежність (8) застосована у звіті Американської газової асоціації (American Gas Association – AGA) [8] для визначення калібрувального коефіцієнта.

Інше спрощене рівняння калібрувального коефіцієнта, отримане на основі степеневого закону розподілу, представлено у [1]:

$$k = \frac{2n}{(2n+1)}, \quad (9)$$

де n визначають за формулою (6) і в деякій літературі його називають експонента Нікурадзе [9].

Залежність (9) застосована у монографії Європейської групи з газових досліджень (European Gas Research Group – GERG) [9] для визначення калібрувального коефіцієнта УЗПВ із діаметральним акустичним каналом в умовах розвиненого турбулентного потоку.

В загальному випадку логарифмічний закон розподілу виглядає наступним чином [3]:

$$u_r = u_{\max} + 2,5u^* \ln\left(\frac{R-r}{R}\right), \quad (10)$$

де u^* – динамічна швидкість потоку, яка залежить від коефіцієнта гідравлічного опору вимірювального трубопроводу λ .

Одним із перших рівнянь для розрахунку калібрувального коефіцієнта k , що отримане на основі логарифмічного закону розподілу, є таке рівняння [2]:

$$k = \frac{1}{1 + 0,19 \text{Re}^{-0,1}}. \quad (11)$$

Біргер також застосував логарифмічний закон розподілу для отримання рівняння калібрувального коефіцієнта. В результаті інтегрування за формулами (3) і (4) було отримано наступні вирази для швидкостей при логарифмічному законі розподілу:

$$U_S = u_{\max} - 3,75u^*, \quad (12)$$

$$U_L = u_{\max} - 2,5u^*. \quad (13)$$

Віднімаючи (12) від (13), отримуємо, що

$$U_S = U_L + 1,25u^*. \quad (14)$$

Величина u^* визначає характер потоку в пограничному шарі і залежить від режиму потоку і від стану внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу. Для гладких циліндричних труб ця величина досить точно описується наступним виразом:

$$u^* = \frac{\sqrt{\lambda}}{2\sqrt{2}} u. \quad (15)$$

Залежність величини λ від числа Рейнольдса в явній формі можна виразити наближеною формулою Нікурадзе для коефіцієнта гідравлічного опору трубопроводу:

$$\lambda = 0,0032 + 0,221 \text{Re}^{-0,237}. \quad (16)$$

Підставляючи рівняння (15) і (16) в (14) і виконуючи деякі спрощення, остаточно отримуємо:

$$U_S = U_L \left(1 + 0,01 \sqrt{6,25 + 431 \text{Re}^{-0,237}} \right). \quad (17)$$

Або в остаточній формі калібрувальний коефіцієнт буде таким:

$$k = \frac{1}{\left(1 + 0,01 \sqrt{6,25 + 431 \text{Re}^{-0,237}} \right)}. \quad (18)$$

Розроблений алгоритм передбачає розрахунок калібрувального коефіцієнта за результатами моделювання потоку у вимірювальній секції витратоміра засобами обчислювальної гідродинаміки або CFD-моделювання.

Під час моделювання ультразвуковий перетворювач витрати розглядається як секція вимірювального трубопроводу довжиною L . По довжині цієї секції розглядаємо 9 перерізів, у кожному з яких моделюється розподіл швидкості по всьому перерізу. Початковий переріз відповідає входу в УЗПВ (початку акустичного шляху), а дев'ятий переріз відповідає виходу з УЗПВ (кінець акустичного шляху) (рис.2). Різниця між координатою дев'ятого перерізу і першого складає довжину вимірювальної секції ультразвукового перетворювача витрати, яка позначена на рис.2

літерою L . За результатами аналізу конструкції серійних ультразвукових перетворювачів витрати прийнято для моделювання значення $L = 1,8D$.

Після завантаження даних із дев'яти масивів, які містять значення швидкості в кожній точці перерізів, проводиться обчислення усередненої швидкості потоку по довжині одиничного діаметрального акустичного каналу, що пронизує всі дев'ять перерізів. Усереднена швидкість потоку по довжині променя ультразвукового перетворювача витрати із діаметральним акустичним каналом U_L розраховується на основі значень що знаходяться в кожному із дев'яти перерізів.

Послідовність розрахунку калібрувального коефіцієнта за допомогою розробленого авторами алгоритму є такою.

1. Визначають усереднену по перерізу швидкість потоку $U_{S,CFD}$.

Оскільки виконується моделювання стаціонарного потоку із неспотвореним профілем швидкості, то усереднена по перерізу швидкість потоку $U_{S,CFD}$ може бути визначена в першому перерізі:

$$U_{S,CFD} = \frac{\sum_{i=1}^N U(i)}{N} \quad (19)$$

де $U(i)$ – значення швидкості в i -тому вузлі сітки; $i = 1 \dots N$; $N = 7555$ – кількість вузлів розрахункової сітки.

2. Визначають усереднену вздовж акустичного шляху променя швидкість потоку $U_{L,CFD}$.

2.1. Використавши опцію Point Parameters підпрограми Flow Simulations CFD - програмного пакету SolidWorks, отримують дев'ять масивів швидкості потоку (для кожного із 9-ти перерізів на які поділено вимірювальну ділянку УЗПВ). Кожен із масивів має 7555 значень швидкості потоку по кожній із трьох

координат. Повну швидкість потоку знаходимо за наступною формулою:

$$U(i) = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2}, \quad (20)$$

де U_x, U_y, U_z – значення проекцій швидкості в i -тому вузлі сітки на осі x, y, z .

2.2. Імітація діаметрального розміщення акустичного каналу виконується проведенням через дев'ять перерізів прямої, кінці якої відповідають розміщенню електроакустичних перетворювачів. Початок прямої знаходиться в першому перерізі (точка A на рис.2), а кінець в останньому перерізі (точка B на рис.2).

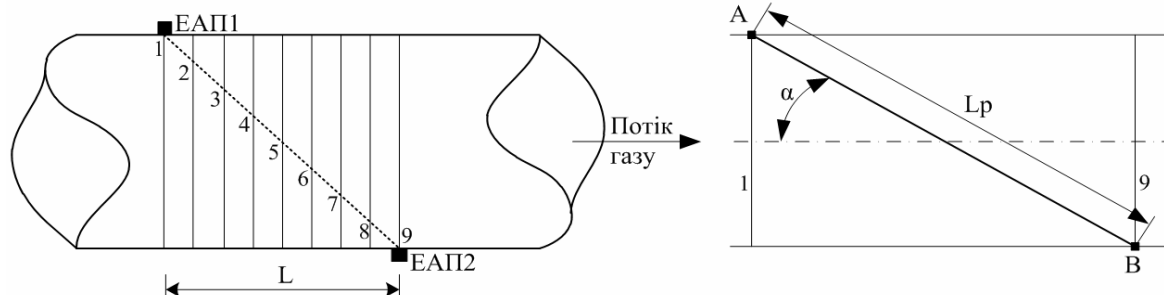
Координати точок: $A(\text{mean}(X_1), \text{max}(Y_1), Z_1)$, $B(\text{mean}(X_9), \text{min}(Y_9), Z_9)$.

2.3. Використовуючи масиви швидкостей (також існують ідентичні масиви координат) та координати прямої, що імітує діаметральний промінь УЗПВ, знаходять швидкості потоку в кожному із перерізів, які знаходяться на акустичному шляху.

2.4. Отримують усереднену вздовж акустичного шляху швидкість потоку $U_{L,CFD}$ за допомогою інтегрування масиву значень швидкості вздовж акустичного шляху (див.п.2.3) за формулою

$$U_{L,CFD} = \frac{\sum_{j=1}^M \left(\left(\frac{z(j+1) - z(j)}{\cos(\alpha)} \right) \cdot \left(\frac{U(j+1) + U(j)}{2} \right) \right)}{L_p}, \quad (21)$$

де L_p – довжина акустичного шляху променя; $U(j)$ – швидкість потоку в j -му перерізі; $j = 1 \dots M$; $M = 9$ – кількість перерізів на які поділено вимірювальну ділянку ультразвукового перетворювача витрати; $z(j)$ – розташування j -го перерізу на осі z (координата точок j -го перерізу по осі z); α – кут нахилу акустичного каналу (або площини через яку проходить цей канал) відносно осі вимірювального трубопроводу.



ЕАП – електроакустичні перетворювачі; L – довжина вимірювальної секції; L_p – довжина акустичного шляху; 1-9 – номери перерізів для моделювання

Рисунок 2 - Вимірювальна секція одноканального ультразвукового перетворювача витрати

Процедура знаходження усередненої вздовж акустичного шляху променя швидкості потоку $U_{L,CFD}$ виконувалась для чотирьох варіантів розміщення площини акустичного каналу відносно горизонтальної площини (кути 0° , 45° , 90° та 135°).

2.5. За формулою (1) отримують значення калібрувального коефіцієнта

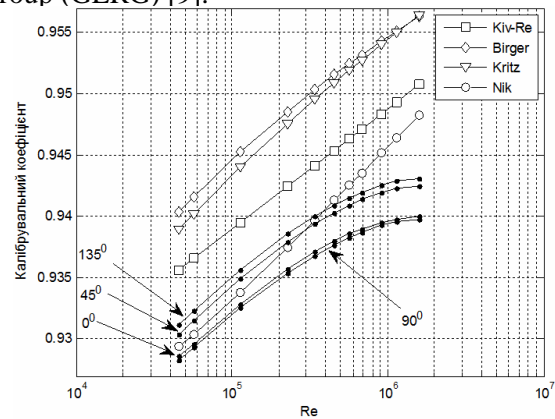
$$k_{CFD} = \frac{U_{S,CFD}}{U_{L,CFD}}. \quad (22)$$

Виконуючи попередні пункти для ряду значень витрати, отримують залежність калібрувального коефіцієнта від витрати та числа Рейнольдса.

В табл.1 наведені залежності калібрувального коефіцієнта від числа Рейнольдса (масова витрата), отримані для гладкої труби за наведеним вище алгоритмом та усереднена по перерізу швидкість потоку. Графічно рівняннями (8), (9), (11) та (18) як залежність калібрувального коефіцієнта від числа Рейнольдса представлені на рис.3.

Як видно із рис.3, значення k_{CFD} , отримані за результатами CFD-моделювання, відносно добре узгоджуються із аналітичною залежністю Нікурадзе (9). Відхилення значень калібрувального коефіцієнта k_{CFD} від значень, отриманих за формулою (9), не перевищують $\pm 0,4\%$ для діапазону чисел Рейнольдса від $4 \cdot 10^4$ до $5 \cdot 10^5$. Відхилення значень калібрувального коефіцієнта k_{CFD} від значень, отриманих за

рівнянням Ківіліса-Решетнікова (8), приймають значення $0,5 \dots 0,9\%$ у досліджуваному діапазоні чисел Рейнольдса. Тобто, в цілому можна зробити висновок, що рівняння калібрувального коефіцієнта отримані на основі степеневого закону розподілу швидкості дають більш адекватні результати, ніж рівняння, отримані на основі логарифмічного закону розподілу швидкості потоку, що й зумовило застосування рівнянь (8), (9) у роботах провідних дослідницьких організацій American Gas Association (AGA) [8] та European Gas Research Group (GERG) [9].



◇ – Біргера (18); □ – Ківіліса-Решетнікова (8); ○ – Нікурадзе (9); Δ – Крітца (11); • – залежності отримані за розробленим алгоритмом

Рисунок 3 - Залежності калібрувального коефіцієнта від числа Рейнольдса для гладкої труби, отримані за рівняннями:

Таблиця 1 – Результати CFD-моделювання для вимірювального трубопроводу із гладкою внутрішньою поверхнею

Масова витрата, кг/с	Усереднена по перерізу швидкість $U_{S,CFD}$, м/с	Число Рейнольдса	Калібрувальний коефіцієнт			
			k_{CFD} 0°	k_{CFD} 45°	k_{CFD} 90°	k_{CFD} 135°
0,04	3,79	45630,45	0,9286	0,9304	0,9283	0,9312
0,05	4,74	57024,54	0,9296	0,9315	0,9293	0,9323
0,1	9,47	113977,37	0,9328	0,9349	0,9326	0,9356
0,2	18,93	227828,49	0,9357	0,9379	0,9354	0,9386
0,3	28,37	341641,25	0,9371	0,9394	0,9368	0,9400
0,4	37,79	455429,95	0,9380	0,9403	0,9377	0,9409
0,5	47,19	569203,34	0,9386	0,9409	0,9383	0,9415
0,6	56,56	682966,48	0,9390	0,9414	0,9387	0,9420
0,8	75,18	910480,90	0,9395	0,9420	0,9393	0,9426
1,0	93,62	1138018,09	0,9398	0,9423	0,9396	0,9429
1,4	129,69	1593406,23	0,9400	0,9425	0,9398	0,9431

Із рис.3 також видно, що залежності калібрувального коефіцієнта, отримані для різних кутів розміщення площини акустичного каналу, є близькими, що свідчить про адекватність роботи розробленого алгоритму в умовах неспотвореного потоку та можливість його застосування для аналізу спотвореного потоку, а також для аналізу УЗПВ із різним просторовим розміщенням акустичних каналів.

ВИСНОВКИ

За результатами порівняльного аналізу встановлено, що відомі аналітичні залежності для визначення калібрувального коефіцієнта діаметральних УЗПВ мають невисоку точність, що не дозволяє застосувати їх у алгоритмах УЗПВ високої точності. Однак є передумови створення високоточних алгоритмів розрахунку калібрувального коефіцієнта на основі CFD-моделювання із врахуванням експериментальних даних для витратомірів окремої моделі.

Рівняння калібрувального коефіцієнта, отримані на основі степеневого закону розподілу швидкості, дають більш адекватні результати, ніж рівняння, отримані на основі логарифмічного закону розподілу швидкості потоку. Це дозволяє застосувати їх для завдань, де не вимагається висока точність вимірювання витрати (факельні гази, скидні газопроводи) і будувати витратоміри без їх індивідуального градування на еталонних установках.

Значення калібрувального коефіцієнта, отримані за розробленим авторами алгоритмом, добре узгоджуються із результатами розрахунку за рівняннями, отриманими на основі степеневого закону розподілу швидкості. Зокрема, відхилення значень калібрувального коефіцієнта k_{CFD} від значень отриманих за формулою Нікурадзе не перевищують $\pm 0,4\%$ для діапазону чисел Рейнольдса від $4 \cdot 10^4$ до $5 \cdot 10^5$. Це підтверджує адекватність алгоритму та можливість його застосування для аналізу спотвореного потоку, а також для аналізу УЗПВ із різним просторовим розміщенням акустичних каналів.

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. – 412с.: ил. - ISBN 5-7325-0709-4. 2. Kritz J. Proc. Instrum. Soc. Amer., 1955, v.10, part.1, №16/3. 3. Биргер Г. И. Некоторые вопросы градуировки ультразвуковых расходомеров / Г. И. Биргер // Измерительная техника. - 1962. - №10. - С. 43-44. 4. Кивилис С. С. Влияние профиля установившегося потока на погрешность ультразвукового расходомера / С. С. Кивилис, В. А. Решетников // Измерительная техника. - 1965. - №3. - С. 52-54. 5. Коновалов В. И. Нормування та контроль метрологічних характеристик акустичних вимірювальних перетворювачів витрати / В. І. Коновалов, В. С. Орлов, В. В. Паракуда // Український метрологічний журнал. - 2005. - №4. - С. 35-41. 6. Фафурин В. А. Расчет корректирующего коэффициента ультразвукового расходомера / В. А. Фафурин, М. К. Галеев // Вестник казанского технологического университета. - 2011. - №23. - С. 152-156. 7. Галимзянов Ф. Г. Теория внутреннего турбулентного движения / Ф. Г. Галимзянов, Р. Ф. Галимзянов. - Уфа: Эксперт, 1999. - 352с. - ISBN 5-89427-007-3. 8. Measurement of Gas by Multipath Ultrasonic Meters. Transmission Measurement Committee Report No.9 // American Gas Association (A.G.A.), 1998. – 84p. 9. Lunde P. GERG Project on Ultrasonic Gas Flow Meters, Phase II / P. Lunde, K. E. Froysa, M. Vestrheim, 2000. – 114p.

Поступила в редакцію 28.10.2013р.

Рекомендував до друку докт. техн. наук, проф. Пістун Є. П. та докт. техн. наук, проф. Середюк О. Є.