

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ БАГАТОКАНАЛЬНИХ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ВИТРАТОМІРІВ ШЛЯХОМ УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ІНТЕГРУВАННЯ ВИТРАТИ

© Роман В.І., 2014

Розглянуто підвищення точності вимірювання витрати ультразвуковими витратомірами з кількома хордовими акустичними каналами. Проаналізовано числові методи інтегрування, зокрема метод Гаусса–Якобі, і уточнено показник степеня його вагової функції. Уточнення виконано на основі степеневого закону розподілу швидкості потоку. Використовуючи класичний та уточнений показник степеня вагової функції, досліджено вплив спотвореної структури потоку (у вигляді формули швидкості Salami P9) на похибку інтегрування. Виконано розрахунок похибки інтегрування витрати методом Гаусса–Якобі для 4-канального ультразвукового витратоміра. Встановлено, що числовий метод інтегрування Гаусса–Якобі дає найменше значення похибки інтегрування витрати за значення показника степеня $k = 0,2$.

Ключові слова: багатоканальні ультразвукові витратоміри, числовий метод інтегрування, вагова функція, функції швидкості Salami, хордові акустичні канали.

The work is devoted to improving the accuracy of flow measurement by ultrasonic flowmeters with multiple chord acoustic channels. The numerical integration methods, including the Gauss-Jacobi method are analyzed and the exponent weighting function is improved. This clarification is based on the power law distribution of flow velocity. Using classic and improved by the author exponent weighting function, the effect of the distorted structure of the flow (as a Salami P9 formula rate) on the error of integration is investigated. The calculation of the integration error of flow rate with the Gauss-Jacobi method for the 4-channel ultrasonic flowmeter is made. It was defined that Gauss-Jacobi numerical integration method gives the smallest value of integration error of flow rate in the value of exponent $k = 0.2$.

Key words: multichannel ultrasonic flowmeters, numerical integration method, weighting function, Salami function of velocity, chord acoustic channels.

Постановка проблеми

Для точного вимірювання витрати за допомогою ультразвукового методу необхідно забезпечити точне відтворення швидкості потоку за значеннями швидкостей, що вимірюються окремими акустичними каналами. Це й зумовило розроблення багатоканальних ультразвукових витратомірів (УЗВ), які точніше відтворюють профіль швидкості потоку завдяки наявності більшої кількості вимірюваних значень локальних швидкостей потоку.

У таких витратомірах вимірюване значення витрати обчислюється за значеннями швидкості потоку, вимірюваними кожним із акустичних каналів. Тобто у обчислювачах витрати необхідно реалізувати алгоритм інтегрування швидкості потоку по усьому перерізу вимірювального трубопроводу (ВТ) на основі вимірюваних значень у окремих точках перерізу ВТ. Таке завдання виконують за допомогою числових методів інтегрування (ЧМІ).

Особливо важливим є правильний вибір ЧМІ для УЗВ, що працюють в умовах потоків із спотвореною структурою. Це зумовлено багатьма причинами:

1. Похибка визначення вагових коефіцієнтів у формулі розрахунку витрати для багатоканальних УЗВ може бути зумовлена деформацією профілю осьових швидкостей вимірювального потоку [1]. Це

пояснюється тим, що теоретичне визначення цих коефіцієнтів виконується для потоків з повністю розвиненою (ідеалізованою за певним законом) газодинамічною структурою потоку.

2. Згідно з [2], для автоматичної компенсації систематичної складової похибки УЗВ під час калібрування у пам'ять обчислювача, що працює разом із витратоміром, можуть вводиться калібрувальні криві або значення поправок до його показів у точках витрати, за яких проводиться калібрування УЗВ. Процес калібрування за усіма нормативними документами повинен проводитись за повністю розвиненої неспотвореної газодинамічної структури потоку.

Враховуючи, що більшість потоків на практиці мають складну спотворену газодинамічну структуру (після типових і нетипових місцевих опорів, розташованих перед УЗВ), існує велика ймовірність зменшення точності показів УЗВ. Проектування УЗВ із застосуванням досконалих методів інтегрування дає змогу визначити значення вагових коефіцієнтів, а також координати розташування акустичних каналів в такий спосіб, щоб зменшити вплив спотворень потоку на точність вимірювання витрати.

Аналіз літературних джерел

Дослідження ЧМІ для задач ультразвукової витратометрії можна прослідкувати у роботах таких науковців, як Zanker, Moore, Brown, Tresch, Gruber, Staubli, Voser та інші. У деяких працях для аналізу ЧМІ використано моделі спотвореної газодинамічної структури потоку у вигляді базисних функцій швидкості професора Salami [5], розроблених на основі експериментальних даних методом точкових швидкостей для Національного метрологічного центру Великобританії. У [3, 4, 11] доведено, що профілі швидкості Salami добре узгоджуються із результатами експериментальних досліджень та придатні для перевірки моделей ультразвукових та інших витратомірів. За допомогою функцій Salami швидкість у будь-якій точці перерізу потоку може бути обчислена без необхідності інтерполяції, що дає змогу виконати інтегрування для усього перерізу та отримати витрату потоку із спотвореною газодинамічною структурою [11].

У [4] з використанням набору 14-ти функцій швидкості потоку Salami досліджено класичні ЧМІ Гаусса, Чебишева та Тейлора і показано ефективність їх застосування у багатоканальних інсталяціях УЗВ. У [6–9] функції швидкостей Salami використовуються для дослідження ЧМІ вищого порядку точності в задачах ультразвукової витратометрії. Наприклад, у [7] за допомогою функцій Salami досліджено ЧМІ Гаусса–Якобі, Гаусса–Лежандра та OWIC (модифікований метод Гаусса–Якобі із показниками степеня, що дорівнюють 0,6). Проте, незважаючи на велику кількість наукових робіт у цьому напрямку, залишається недостатньо дослідженим ЧМІ Гаусса–Якобі.

Автором роботи **поставив за мету** виконати такі дослідження і запропонувати удосконалену вагову функцію методу Гаусса–Якобі із врахуванням степеневого закону розподілу швидкості. Завданням цієї роботи також є дослідження з використанням функції швидкості Salami ефективність застосування класичного і модифікованого методу Гаусса–Якобі для спотвореної газодинамічної структури потоку.

Виклад основного матеріалу

Загалом для визначення витрати потоку, що протікає через поперечний переріз круглого ВТ, необхідно знати усереднену по перерізу швидкість та площу перерізу. З математичної точки зору, це означає, що потрібно розв'язати двовимірний інтеграл [6] такого вигляду:

$$q = \int_{S(z)} U_{axial}(x, y) dS = \int_x \left[\int_y U_z(x, y) dy \right] dx, \quad (1)$$

де $U_{axial}(x, y)$ – осьова швидкість потоку; $U_z(x, y)$ – осьова швидкість потоку направлена по осі z ; S – площа поперечного перерізу ВТ; x, y – координати осей у тривимірній декартовій системі координат за умови, що $z = 0$.

Для вимірювання витрати ультразвуковим різницевою методом використовують усереднену швидкість потоку \bar{U} , яка пов'язана з осовою швидкістю потоку U_z такою залежністю [6]:

$$\int_y U_z(x, y) dy = 2\sqrt{R^2 - x^2} \bar{U}(x). \quad (2)$$

Приймаючи за межі інтегрування по x в (1), радіус ($\pm R$) із врахуванням (2) отримаємо формулу для розрахунку витрати багатоканальним УЗВ:

$$q = \int_{-R}^{+R} 2\sqrt{R^2 - x^2} \bar{U}(x) dx. \quad (3)$$

Оскільки величини середніх значень швидкостей \bar{U} , доступні у реальних умовах лише в обмеженому наборі вимірювальних площин, під час розрахунку q за допомогою (3) доводиться звертатися до ЧМІ. Із теорії ЧМІ [13] визначений інтеграл виду (3) можна розглядати як функціонал

$$q = \int_a^b W(x) f(x) dx, \quad (4)$$

де $W(x) \geq 0$ – задана вагова функція; $f(x)$ – підінтегральна функція.

Однією із загальних ідей під час побудови алгоритмів наближеного обчислення інтеграла (4) є те, що для функції $f(x)$ будується деяке наближення $f^h(x)$ і розв'язується інтеграл (4). Звичайно ж наближення $f^h(x)$ має бути таким, щоб інтеграл (4) обчислювався простіше, ніж за $f(x)$. На практиці поширені наближення, які лінійно виражаються через функцію $f(x)$ та її похідні у точках із діапазону інтегрування функції. У цій роботі розглянуто наближення, в яких використовуються лише значення функції $f(x)$ і не використовуються похідні. У такому випадку формула для оцінки (наближеного розв'язку) інтеграла (4) має такий вигляд:

$$q \approx \sum_{j=1}^N w_j f(x_j), \quad (5)$$

де N – кількість точок, у яких вираховують значення підінтегральної функції $f(x)$. Точки x_j називаються абсцисами ЧМІ, а w_j – ваговими коефіцієнтами ЧМІ. Якщо $f^h(x)$ подати у вигляді

$$f^h(x) \equiv p_{N-1}(x; f) = \sum_{j=1}^N f(x_j) l_{j, N-1}(x), \quad (6)$$

де $p_{N-1}(x; f)$ – інтерполяційний поліном степеня $N-1$ для функції $f(x)$ за вузлами $x_j, j=1 \dots N$; $l_{j, N-1}$ – фундаментальні інтерполяційні поліноми. У такому випадку

$$w_j = \int_a^b W(x) l_{j, N-1}(x) dx. \quad (7)$$

Як можна побачити із (7), вагові коефіцієнти ЧМІ залежать від вибраного фундаментального інтерполяційного полінома [13]. Вагова функція методу Гаусса–Якобі має такий вигляд:

$$W(x) = (1-x)^\alpha (1+x)^\beta = (1-x^2)^k, \quad (8)$$

де $k = \alpha = \beta$ – показники степеня вагової функції ортогонального полінома Якобі.

У [7] автори пропонують модифікувати вагову функцію методу Гаусса–Якобі в такий спосіб, щоб вона була близькою до функції розподілу швидкості (розподілу елементарної витрати потоку, area-flow-function [7]). На основі цього підходу вони запропонували вибрати показник степеня k таким, що дорівнює 0,6, та розроблено новий метод під назвою OWICS. Ми пропонуємо модифікувати вагову функцію методу Гаусса–Якобі на основі степеневого закону розподілу швидкості, який для круглого ВТ можна записати так:

$$u(r) = u_{\max}(1 - z)^{1/n_t}, \quad (9)$$

де $z = r/R$ – відносна координата точки у радіальному напрямку на поперечному перерізі ВТ.

Із порівняння виразів (8) та (9) зрозуміло, що показник степеня k із (8) є в певний спосіб корельований із оберненим коефіцієнтом $1/n_t$. Коефіцієнт n_t характеризує ступінь турбулентності потоку (залежить від числа Рейнольдса) і для турбулентних потоків приймає значення 6...10 [12]. Отже, показник степеня k у ваговій функції методу Гаусса–Якобі є в певний спосіб корельований із числом Рейнольдса. У такому випадку можливо модифікувати вагову функцію методу Гаусса–Якобі за значенням числа Рейнольдса, тобто за проектним значенням витрати (швидкості) потоку, на яку виготовлений УЗВ.

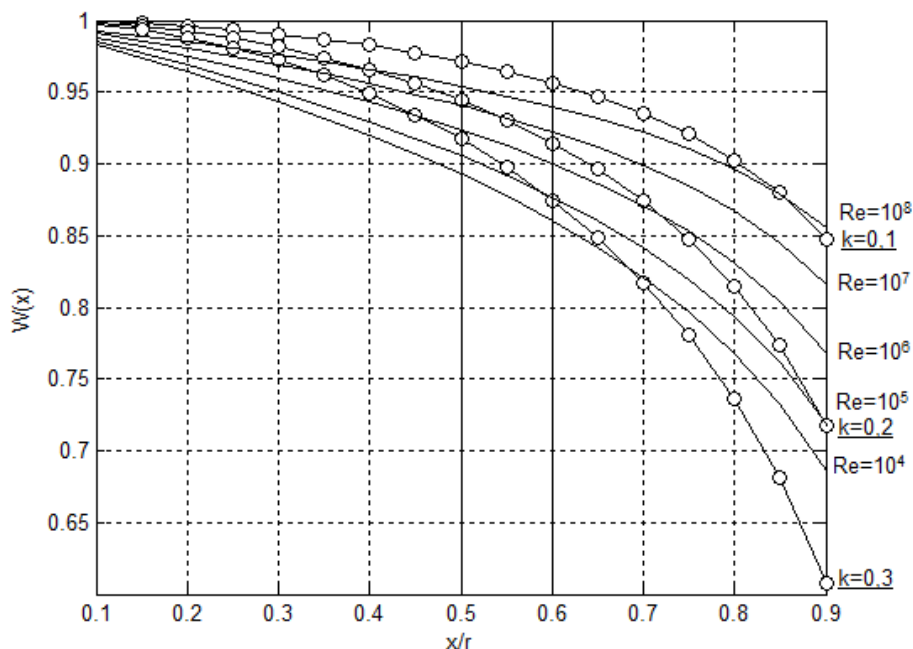


Рис. 1. Вагові функції ЧМІ Гаусса–Якобі та криві степеневого закону розподілу швидкості: “о” – залежності вагової функції від абсцис; “-” – криві розподілу швидкості потоку

На рис. 1 показано залежності вагової функції методу Гаусса–Якобі від значень його абсцис для трьох k (0,1, 0,2 та 0,3). Також на рис. 1 показано криві розподілу швидкості потоку у ВТ круглої форми, отримані за степеневим законом розподілу (9), залежно від числа Рейнольдса [12]. Значення числа Рейнольдса вибрані із діапазону $Re = 10^4 \dots 10^8$, що відповідає реальним умовам, в яких працюють багатоканальні УЗВ. Як бачимо із рис. 1, графіки вагової функції методу Гаусса–Якобі за значень $k = 0,2$ та $0,3$ (о) доволі добре збігаються із графіками кривих степеневого закону розподілу швидкості за $Re = 10^4 \dots 10^7$. Це дає можливість говорити, що під час застосування ЧМІ Гаусса–Якобі для розрахунку витрати багатоканальних УЗВ необхідно застосовувати показник степеня k , що дорівнює 0,2 або 0,3.

Дослідження ЧМІ Гаусса–Якобі з використанням функцій Salami

Рівняння (1) справедливе для довільної функції $U_z(x,y)$. У той самий час під час вимірювання і дослідження потоків, як правило, на швидкість $U_z(x,y)$ накладаються додаткові умови, що

обмежують клас допустимих функцій. Якщо використане припущення не відповідає реальному потоку, то в результаті розрахунків на основі вимірних даних вносяться додаткові похибки. Можна виділити такий клас функцій по важливості накладених умов [6]:

1. Швидкість $U_z(x,y)$ описується заданою аналітичною залежністю.
2. Швидкість $U_z(x,y)$ симетрична щодо осі $U_z(x,y) = U_z(\sqrt{x^2+y^2}) = U_z(r)$.
3. Швидкість $U_z(x,y)$ є довільною функцією координат.

Із аналізу [10] можна стверджувати, що є кілька класів аналітичних залежностей, які описують швидкість потоку у ВТ з круглим поперечним перерізом. Серед таких класів можна виділити клас функцій Salami та клас функцій Grego.

Переважно ці класи містять функції спотворених профілів потоку, пройденого через стандартні та нестандартні місцеві опори. Використовуючи ці класи аналітично до поданої функції $U_z(x,y)$, можна розв'язувати актуальні задачі підвищення точності ультразвукових та інших витратомірів в умовах спотвореної газодинамічної структури потоку. Однією із таких задач є дослідження ЧМІ, які застосовуються у багатоканальних УЗВ.

У більшості робіт з такої тематики, і зокрема в [9], для оцінки ЧМІ пропонується використовувати похибку методу $\delta_{ЧМІ}$ згідно з формулою

$$d_{ЧМІ} = \frac{q_{ЧМІ} - q_0}{q_0} \cdot 100 \%, \quad (10)$$

де $q_{ЧМІ}$ – витрата, що вимірюється багатоканальним УЗВ, за певної кількості акустичних каналів та вагових коефіцієнтів згідно з ЧМІ; q_0 – дійсне значення витрати за формулою (1). Оскільки в подальшому ми будемо застосовувати функції швидкості Salami для потоків у трубопроводах круглого перерізу, то зручно розглядати їх в полярних координатах.

Довільна функція швидкості Salami, що описує певний випадок спотворення структури потоку, є функцією кутового положення радіуса щодо довільно вибраної координати центра. Яким би асиметричний потік не був, він завжди повинен мати нульову швидкість на стінці ВТ внаслідок теорії в'язкого потоку. Отже, близько до стінки повинен бути ламінарний шар, який стає турбулентним, коли наближається до центра ВТ. Степеневий закон для розподілу швидкості повинен зберігатися на відстані від стінки ВТ. Щоб моделювати ці умови, допускається, що функція швидкості Salami U складається з двох компонент [5]: $U = U_b + U_c$ – осьової компоненти U_b , заданої степеневим законом $U_b = (1-r)^{1/n}$, і багаточленної компоненти U_c , що накладається на нього $U_c = r(1-r)^{1/K}$. Застосування U_c створює асиметрію потоку. Якщо цей член помножити на $mf(\theta)$, де $f(\theta)$, може бути будь-якою функцією, то можна отримати різні розподіли швидкості.

У результаті будь-яка функція швидкості Salami, що описує певний вид спотворення структури потоку, може бути задана у полярних координатах у такому вигляді [9]:

$$U(r, \theta) = U_b + U_c = (1-r)^{1/n} + mr(1-r)^{1/K} \cdot f(\theta), \quad (11)$$

де $n, K, m, f(\theta)$ – параметри, за допомогою яких задаються різні моделі витрати; r – радіус довільної точки потоку; θ – кут нахилу довільної точки потоку.

Формула для обчислення витрати q_0 (1) із врахуванням (11) виглядає так [9]:

$$q_0 = \int_0^{2\pi} \int_0^1 U(r, \theta) r \, dr d\theta. \quad (12)$$

У науковій літературі функції швидкості Salami позначаються латинською літерою “P”. Згідно з [8], функції P10, P18 відповідають умовам процесу циркуляційного обміну. Згідно з [11] функції P1, P2 відповідають профілям після заслінки. Згідно з [4, 5], функції P4, P8, P9, P11, P12 та P14 аналогічні до профілів швидкостей після вигинів (колін); P3 – аналогічною профілів швидкості на відстані від 6 до 16 діаметрів внизу за течією від діафрагми. У [9] розраховано значення витрати q для деяких функцій швидкості Salami: P6 = 2,6786; P8 = 3,0908; P9 = 3,1454; P10 = 2,8179; P12 = 2,7862; P16 = 2,6417; P17 = 2,7849.

Витрата, що вимірюється УЗВ із кількома акустичними каналами з використанням ЧМІ $q_{ЧМІ}$ та функцій швидкості Salami, визначається за таким принципом: для довільного профілю швидкості Salami і певного розташування акустичних каналів УЗВ x_j (рис. 1, а) визначеного згідно з ЧМІ, середня швидкість потоку $\bar{U}(x, \theta)$ вздовж каналу може бути розрахована так [8, 11]:

$$\bar{U}(x, \theta) = \frac{1}{2\sqrt{R^2 - x^2}} \left[\int_0^{\sqrt{R^2 - x^2}} U\left(\sqrt{x^2 + l^2}, \theta + \arctg \frac{l}{x}\right) dl + \int_0^{\sqrt{R^2 - x^2}} U\left(\sqrt{x^2 + l^2}, \theta - \arctg \frac{l}{x}\right) dl \right], \quad (13)$$

де l – довжина акустичного каналу; $x = (0..1)R$ – відносна відстань від осі ВТ до акустичного каналу; R – радіус ВТ; θ – кут інтегрування (рис. 2, а).

Маючи кількість акустичних каналів N , швидкості знайдені для цих каналів, згідно з формулою (13), а також значення вагових коефіцієнтів, згідно з ЧМІ, можна отримати рівняння для розрахунку витрати $q_{ЧМІ}$. Рівняння для розрахунку витрати може мати дві форми:

1. Інтегруванням парціальних витрат [7]:

$$q_{ЧМІ} = R \sum_{j=1}^N w_j 2\sqrt{R^2 - x_j^2} \bar{U}(x_j); \quad (14)$$

2. Інтегруванням парціальних швидкостей [14]:

$$q_{ЧМІ} = \pi R^2 \sum_{i=1}^N \frac{w_j}{\pi R} 2\sqrt{R^2 - x_j^2} \bar{U}(x_j). \quad (15)$$

Результати розрахунку витрати за формулами (14) і (15) збігаються під час застосування одного і того самого ЧМІ для розрахунку вагових коефіцієнтів w_j методу для однакової конфігурації акустичних каналів УЗВ. Отже, незалежно від вибраного рівняння розрахунку витрати ((14) чи (15)), для реалізації цього рівняння необхідно отримати значення вагових коефіцієнтів w_j для кожного акустичного каналу ЧМІ.

Дослідимо ЧМІ Гаусса–Якобі для $k = 0,2$ та $0,3$. Порівняємо похибку інтегрування цього методу із класичним методом Гаусса–Якобі ($k = 0,5$). Для дослідження в умовах спотвореної структури потоку вибрано функцію швидкості Salami P9 (потік після одиничного коліна в горизонтальній площині), що є акутальним із-за великої кількості місцевих опорів цього типу на ВТ перед УЗВ (таблиця).

Абсциси та вагові коефіцієнти метода Гауса–Якобі

N	$k = 0,2$		$k = 0,3$		$k = 0,5$	
	x_i	w_i	x_i	w_i	x_i	w_i
4	$\pm 0,83916$	0,35850	$\pm 0,82876$	0,36269	$\pm 0,80901$	0,36931
	$\pm 0,32651$	0,62854	$\pm 0,32035$	0,61768	$\pm 0,30901$	0,59756

Функція швидкостей Salami P9 описується рівнянням (16) в системі полярних координат. Вигляд ліній однакової швидкості профілю P9 зображено на рис. 2, а. Профіль функції швидкостей у тривимірних координатах – на рис. 1, б.

$$U(r, \theta) = (1 - r)^{1/9} + \frac{2}{\pi^5} (1 - r)^{1/4} r \theta^2 (2\pi - \theta)^2. \quad (16)$$

Значення абсцис (координат розташування акустичних каналів) та вагових коефіцієнтів методу Гаусса–Якобі для чотириканальної орієнтації акустичних каналів УЗВ наведені у таблиці. Абсциси та вагові коефіцієнти методу Гаусса–Якобі розраховані для трьох значень: $k = 0,2, 0,3$ та $0,5$.

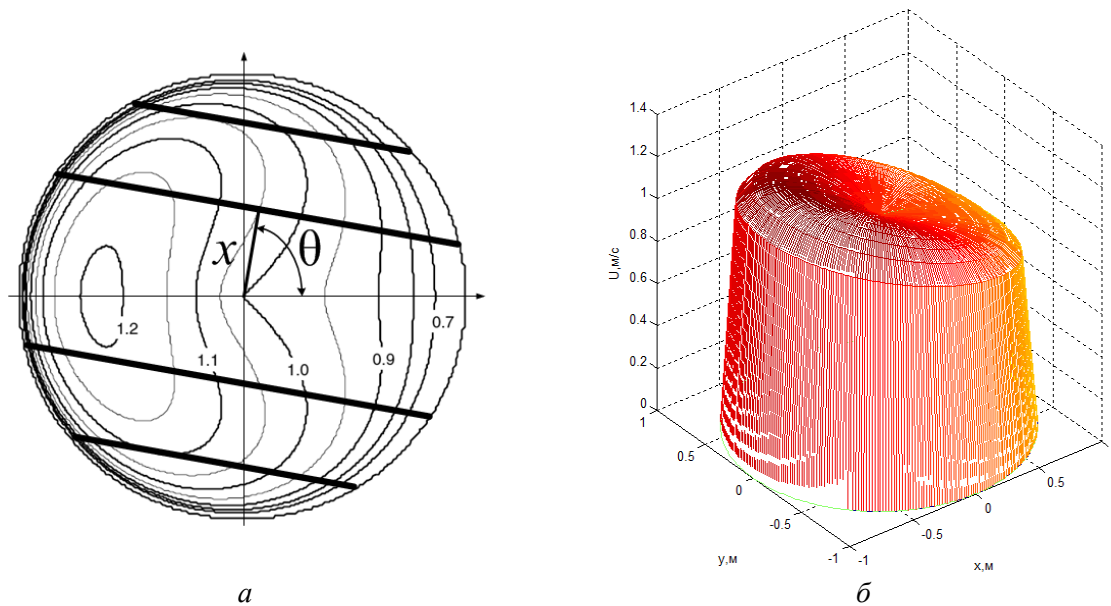


Рис. 2. Функція швидкості Salami P9: а – лінії однакої швидкості та просторове розташування акустичних каналів УЗВ; б – профіль швидкості у тривимірних координатах

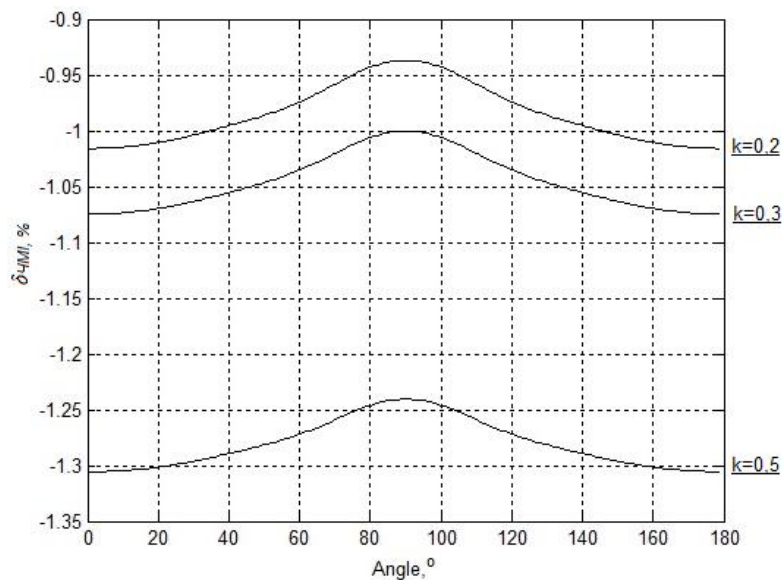


Рис.3. Залежність похибки інтегрування витрати методом Гаусса–Якобі (для чотирьоканального УЗВ) за різних значень показника степеня k його вагової функції

З рис. 3. бачимо, що відносне відхилення похибки інтегрування витрати $\delta_{\chi_{ML}}$ (для функції швидкості Salami P9) методом Гаусса–Якобі для чотирьоканального УЗВ залежить як від кута інтегрування θ так і від показників степеня k . Найменше значення похибки досягається для уточненого автором значень показника степеня вагової функції $k = 0,2$, на відміну від класичного ($k = 0,5$).

Також встановлено, що криві залежності похибки інтегрування витрати за методом Гаусса–Якобі (для $k = 0,2, 0,3$ та $0,5$) від кута встановлення акустичних каналів (див. рис. 1, а) мають мінімальне значення у точці, що відповідає куту 90° . Це означає, що таке розташування чотирьох акустичних каналів УЗВ дасть можливість мінімізувати вплив спотворень газодинамічної структури потоку після “ 90° коліна”, розміщеного в горизонтальній площині, на результат вимірювання витрати.

Висновки

В результаті виконаної роботи можна зробити такі висновки:

1. Одним із способів підвищення точності багатоканальних УЗВ є вдосконалення ЧМІ, які

використовуються для розрахунку вагових коефіцієнтів рівняння витрати.

2. Шляхом порівняння кривих швидкості потоку, отриманих за степеневим законом розподілу, та кривих вагової функції ЧМІ Гаусса–Якобі встановлена доцільність вибору значень показника степеня k цієї вагової функції 0,2 або 0,3.

3. Досліджено похибку ЧМІ Гаусса–Якобі для чотириканальної інсталяції УЗВ стосовно моделі спотвореної газодинамічної структури потоку у вигляді функції швидкості Salami P9 і встановлено, що найменше значення похибки інтегрування витрати досягається для запропонованого автором значення показника степеня вагової функції $k = 0,2$. Крім того, похибка інтегрування чотириканального УЗВ незначно змінюється залежно від кута розміщення акустичних каналів, а отже, й від орієнтації МО “90° коліно” щодо УЗВ.

Отримані у цій роботі рекомендації можуть бути застосовані під час проектування багатоканальних УЗВ, що дасть змогу зменшити їх похибку під час експлуатації в умовах потоків із спотвореною структурою.

1. СТО Газпром 5.2:2005. Расход и количество природного газа. Методика выполнения измерений с помощью ультразвуковых преобразователей расхода. – М.: ОАО “ГАЗПРОМ”, 2005. – 51 с. 2. МИ 3213-2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Расход и объем газа. Методика выполнения измерений с помощью ультразвуковых преобразователей расхода. – Казань: ООО “ОМЦ Газметрология”, 2009. – 50 с. 3. Zanker, K. J. (1999). The effects of Reynolds number, wall roughness, and profile asymmetry on single- and multi-path ultrasonic meters. North Sea Flow Measurement Workshop, 1999, 117–29. 4. Moore P.I., Brown G.J. & Simpson B.P. (2000). Ultrasonic transit-time flowmeters modeled with theoretical velocity profiles: methodology. Meas. Sci. Technol, 11, 1802-1811. 5. Salami L.A. (1984). Application of a computer to asymmetric flow measurement in circular pipes Trans. Inst. Meas. Control, 6, 197–206. 6. Терещенко С. А. Акустическая многоплоскостная расходомерия на основе методов квадратурного интегрирования / С.А. Терещенко, М. Н. Рычагов // Акустический журнал. – 2004. – Т. 50, № 1. – С. 116-122. 7. 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 IGHM, Portland Oregon, USA. doi: <http://www.ighem.org>. 8. Дорожовець М. М. Теоретичний аналіз просторового розподілу швидкості руху рідини за допомогою функцій Саламі для багатоканального ультразвукового витратоміра / М. М. Дорожовець, А. В. Семенистий, Б.І. Стадник // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка” “Автоматика, вимірювання та керування”. – 2004. – № 500. С. 131–134. 9. Демідов І. Вимірювання витрати багатоканальним ультразвуковими витратомірами / І. Демідов, В. Поджаренко // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка” “Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація”. – 2003. – № 476. – С. 76–81. 10. Gianalberto, G. (2008, September 3rd-6th). Choise of position of four acoustic paths in circular conduit sections_ downstream of curves with insufficient straight length and highly disturbed velocity profiles. Paper presented at the 7th International Conference on Hydraulic Efficiency Measurements, Milan, Italy. 11. Акимова О. Ю. Математическое моделирование влияния профиля скорости потока на сигнал электромагнитного расходомера / О.Ю. Акимова // Горный информационно-аналитический бюллетень (ГИАБ). – 2006. – № 3. – С. 149–159. 12. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества вещества: справочник: кн.2 / П.П. Кремлевский; [гл. ред. Е. А. Щорников]. – 5-е изд. – СПб.: Политехника, 2004. – 412 с. 13. Гаврилюк І.П. Методи обчислень: у 2 ч. – Ч. 1: підруч. / І.П. Гаврилюк, В.Л. Макаров. – К.: Вища шк., 1995. – 367. 14. Костылев В.В. Принципы построения многоканального ультразвукового расходомера / В.В. Костылев, В.Л. Сорокопунт, А.А. Стеценко, А.И. Стеценко // Совершенствование измерений расхода жидкости, газа и пара: 12-та Междунар. науч.-прак. конф., 23–25 апрель 2002 г.: тезисы докл. – СПб.: Борей-Арт, 2002. – С. 288.