

М.М. Дорожовець<sup>1,2</sup>, А.В. Семенистий<sup>1</sup>, Б.І. Стадник<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Національний університет "Львівська політехніка",  
кафедра інформаційно-вимірювальних технологій<sup>2</sup>Ряшівська політехніка, кафедра  
метрології і вимірювальних систем

## ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОСТОРОВОГО РОЗПОДІЛУ ШВИДКОСТІ РУХУ РІДИНИ ЗА ДОПОМОГОЮ ФУНКЦІЙ САЛАМІ ДЛЯ БАГАТОКАНАЛЬНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВИТРАТОМІРА

© Дорожовець М.М., Семенистий А.В., Стадник Б.І., 2004

**Виконано теоретичний аналіз просторового розподілу швидкості руху рідини за допомогою функцій Саламі для багатоканального ультразвукового витратоміра.**

**The theoretical analysis of spatial distribution speed of movement a liquid with the help of functions Salami for multichannel ultrasonic flowmeter.**

### 1. Вступ

Вимірюючи витрати ультразвуковими методами, необхідно враховувати профіль швидкості руху рідини в трубопроводі та її гідродинамічні характеристики [1, 2].

Ультразвуковий витратомір (УЗВ) вимірює середню швидкість рідини по лінії вздовж УЗ-променя [3]. Утім, витрата визначається середньою швидкістю потоку по площі поперечного перерізу. Ці дві величини збігаються за значенням тільки для трубопроводу прямокутного перерізу (в ідеалі нескінченно великого). В круглому трубопроводі швидкість, виміряна УЗВ, в якому УЗ-промінь проходить по діаметральному перерізу, більша від середньої швидкості потоку: відношення цих величин залежить від розподілу швидкості в перерізі потоку. Для ламінарного потоку середня швидкість потоку дорівнює 1/2 від максимальної швидкості на осі трубопроводу, а УЗВ буде показувати 2/3 максимальної швидкості, тобто буде завищувати покази на 1/3. Згадане співвідношення зберігається для всієї області ламінарних потоків і може бути відповідно враховане [3].

У промислових трубопроводах потоки здебільшого турбулентні. Зривання ламінарного потоку за [4,5] відбувається приблизно якщо числа Рейнольдса становлять  $Re \cong 10^4$ , а промислові потоки  $Re > 10^5$ . В турбулентних потоках розподіл швидкостей змінюється залежно від  $Re$ . Відношення максимальної швидкості в центрі потоку до середньої швидкості зменшується від 1,3 до 1,15 із зростанням  $Re$  від  $5 \cdot 10^3$  до  $3 \cdot 10^6$ . Якщо застосовано одноканальне УЗВ, методична похибка сягає  $\approx 1...3\%$ . Щоб істотно зменшити (до декількох сотих–десятих часток відсотків) методичну похибку визначення витрати, необхідно застосувати багатоканальний УЗВ.

Метою досліджень є теоретичний аналіз використання функцій Саламі для врахування просторового розподілу профілю швидкості руху рідини в УЗВ.

### 2. Теоретичний аналіз просторового розподілу швидкості руху рідини.

Для модельного подання профілів швидкості турбулентних потоків використовують такі типи функцій, запропонованих Саламі [6]:

$$\frac{U}{U_c} = \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/n}; \quad (1)$$

$$U = (1 - r)^{1/n} + mr(1 - r)^{1/k} f(\theta), \quad (2)$$

де  $U$  – швидкість течії у довільній точці трубопроводу;

$U_c$  – максимальна швидкість у трубопроводі (швидкість на осі труби);

$r$  – відстань від центра трубопроводу;

$R$  – радіус трубопроводу;

$n$  – чинник, який залежить від числа Рейнольдса;

$k, m$  – чинники форми профілю;

$f(\theta)$  – вибрана модельна функція;

$\theta$  – кут повороту вимірювальних каналів у трубопроводі.

На рис. 1–3 наведено приклади моделювання профілю швидкості для різних типів збурень в трубопроводі [6,7]: профіль P10 та P18 відповідають умовам процесів циркуляційного обміну, профіль P12 подібний до профілю швидкості після каналу транспортування.

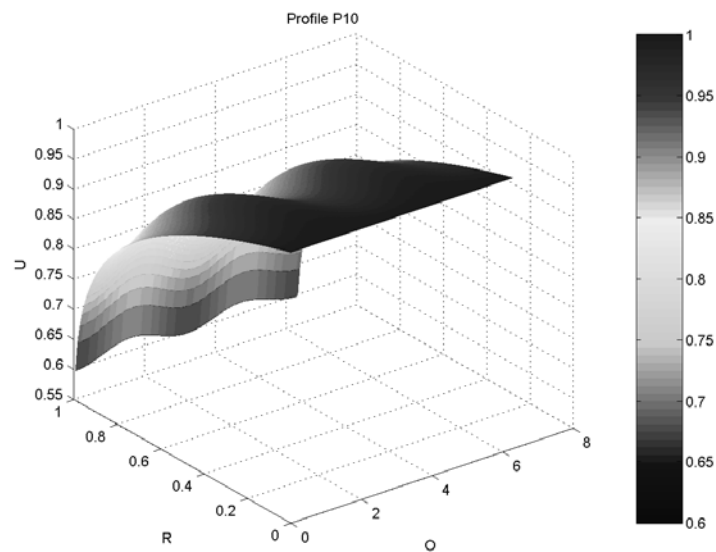


Рис. 1. Профіль P10:  $U = (1 - R)^{1/9} + \frac{2}{\pi^3} R(1 - R)^{1/4} (2\pi - \theta)^{1/9} \sin^2 \theta$

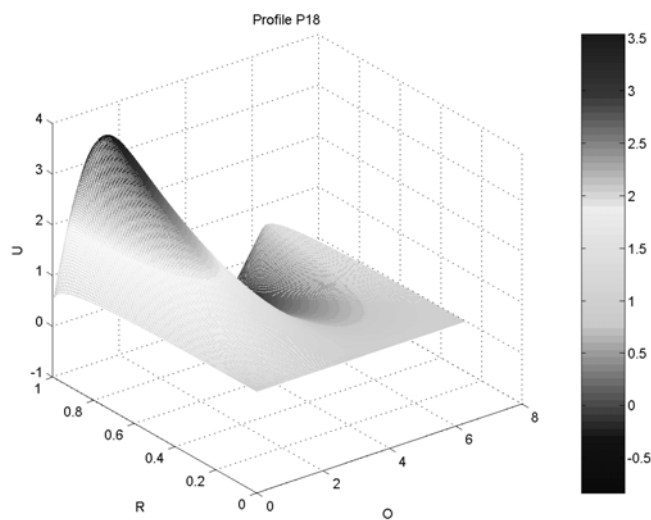


Рис. 2. Профіль P18:  $U = (1 - R)^{1/7} + R(1 - R)^{1/9} e^{(0,05\pi - 0,2\theta)} \sin \theta$

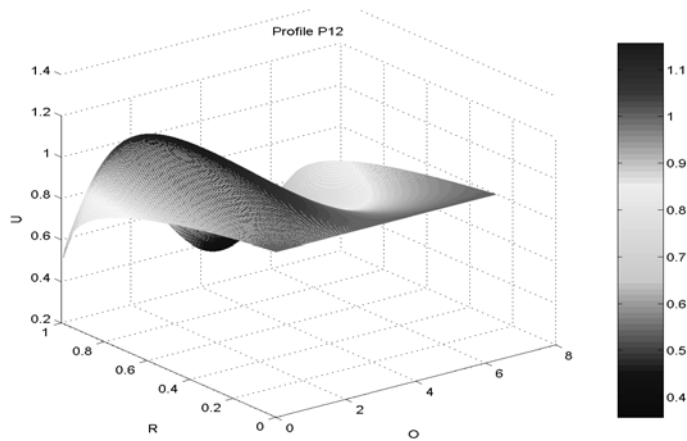


Рис. 3. Профіль P12:  $U = \sin \frac{\pi}{2} (1 - R)^{1/5} + 0,6 \sin \pi (1 - R)^{1/5} e^{-0,2\theta} 2\pi \sin \theta$

Для неосесиметричного профілю швидкості в перетині труби, якщо орієнтація вимірювальної площини (рис. 4) довільна, середня швидкість  $\bar{u}(\xi, \theta)$  за результатами УЗВ з часо-імпульсною схемою визначається згідно із залежністю [7, 8]:

$$\bar{u}(\xi, \theta) = \frac{1}{2\sqrt{R^2 - \xi^2}} \left[ \int_0^{\sqrt{R^2 - \xi^2}} u\left(\sqrt{\xi^2 + l^2}, \theta + \arctg \frac{l}{\xi}\right) dl + \int_0^{\sqrt{R^2 - \xi^2}} u\left(\sqrt{\xi^2 + l^2}, \theta + \arctg \frac{l}{\xi}\right) dl \right]. \quad (4)$$

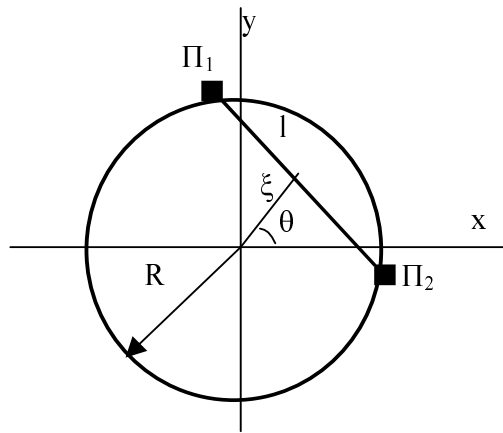


Рис. 4. Хордова схема розміщення вимірювальних каналів УЗВ.

А середня швидкість  $\bar{u}(0, \theta)$  для діаметрально-кутових вимірювань (рис. 5), описується залежністю:

$$\bar{u}(0, \theta) = \frac{1}{2R} \left[ \int_0^R u\left(1, \theta + \frac{\pi}{2}\right) dl + \int_0^R u\left(1, \theta - \frac{\pi}{2}\right) dl \right], \quad (5)$$

де  $\bar{u}(\xi, \theta)$ ,  $\bar{u}(0, \theta)$  – середні швидкості потоку в трубопроводі для хордового ( $\xi \neq 0$ ) та діаметрального ( $\xi = 0$ ) розміщення УЗ-каналів;

- $\xi$  – відстань від центра до площини УЗ-променя;
- $R$  – радіус трубопроводу;
- $\theta$  – кут повороту вимірювальних каналів у трубопроводі.

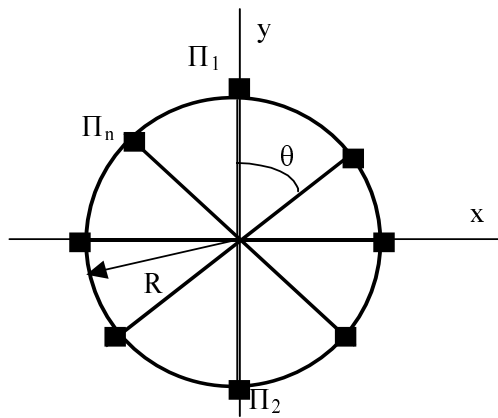


Рис. 5. Діаметрально-кутова схема розміщення вимірювальних каналів УЗВ

З (4) зрозуміло, що для радіально-симетричного профілю швидкості всі діаметрально-кутові виміри збігаються, тому вони непридатні для підвищення точності визначення витрати, як і для визначення дійсного двовимірного профілю швидкості. Вони непридатні також для ідентифікації конкретних профілів із заданого набору профілів, якщо у профілях швидкості немає кутової залежності. Якщо кутова залежність у базових наборах профілів Саламі наочна, така можливість з'являється [8].

### 3. Висновки.

Базові функції Саламі можна застосовувати для моделювання профілю швидкості руху турбулентного, неосесиметричного потоку рідини, який залежить від: числа  $Re$ , чинника гідравлічного опору та гідродинамічних характеристик рідини. На основі даних гідродинамічного моделювання профілю можна проектувати та покращувати метрологічні характеристики багатоканальних УЗВ. Моделі профілів Саламі можуть стати додатковим засобом непрямого калібрування та оптимізації УЗ вимірювальних систем.

1. Альтикуль А.Д., Киселев П.Г. *Гидравлика и аэродинамика*. М., 1965.
2. Огибалов П.М., Мирзаджазаде А.Х. *Нестационарное движение вязко-пластичных сред*. М., 1970.
3. Биргер Г.И. *Некоторые вопросы градуировки ультразвуковых расходомеров //Измерение расхода жидкостей и газов*, 1962, №10.
4. Тепакс Л.А. *Равномерное турбулентное движение в трубах и каналах*. Таллинн, 1975
5. Миллиончиков М. Д. *Турбулентное течение в пограничном слое и в трубах*. М., 1969.
6. Salami L. A. *Application of a Computer to Asymmetric Flow Measurement in Circular Pipes*, *Trans. Inst.M C*, 1984. 6(4): P. 197–206.
7. Franc S., Heilmann C. and Siekmann H. E. *Point-velocity methods for flow-rate measurements in asymmetric pipe flow*, *Flow. Meas. Instrum.*, 1996. 7(3/4): P. 201–209.
8. Rychagov M.N., Tereshchenko S.A. // *Inverse Problems*, 2000. V. 16. P. 495.