

ОЦІНКА АСИМЕТРІЇ ПОТОКУ РІДИНИ ПРИ ВИМІРЮВАННІ ЇЇ ВИТРАТИ ТА КІЛЬКОСТІ

Коробко І.В., Волинська Я.В.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
м. Київ, Україна

Описані результати оцінки асиметрії профілю швидкостей потоку рідини в циліндричному трубопроводі при вимірюванні її витрати та кількості. Запропоновано новий підхід до визначення ступеню асиметрії вимірюваного середовища на підґрунті енергетичної оцінки плинного середовища.

Розроблено методику оцінки асиметрії потоку, спричиненої місцевим опором певного типу, внаслідок визначення моменту розсіяння імпульсу потоку по діаметральних хордах поперечного перерізу та інтегральної оцінки, як середнього квадратичного відхилення від середнього значення моменту розсіяння імпульсу осесиметричного потоку для кожного поперечного перерізу. Методику розроблено із метою оцінки впливу асиметрії потоку на метрологічні характеристики вимірювальних перетворювачів витрати для забезпечення їх ефективної роботи.

Ключові слова: вимірювальний перетворювач витрати, однорідність потоку, енергетична оцінка, момент розсіяння імпульсу потоку, гідравлічний опір.

Вступ. Постановка проблеми

На роботу вимірювальних перетворювачів витрати (ВПВ) значний вплив має тип профілю потоку. І якщо ламінарні, турбулентні та перехідні потоки на сьогодні досить детально досліджені, то питання впливу асиметрії потоку на метрологічні характеристики ВПВ залишається актуальним. Головним завданням є розробка інтегрального показника, за яким досить точно можна оцінити асиметрію та неоднорідність потоку.

Аналіз останніх публікацій

При проектуванні ВПВ та дослідженні їх метрологічних характеристик в основному використовують осесиметричну модель турбулентного профілю потоку яка не зовсім точно відображає сутність і характер розподілу швидкості в поперечному перерізі. У роботах [1], [2] пропонуються уточнені аналітичні залежності профілю розподілу швидкості, що отримані емпіричним шляхом.

На метрологічні характеристики ВПВ рідини та газів суттєвий вплив мають гідродинамічні показники плинного вимірюваного середовища.

Особливу увагу впливу асиметрії потоку на роботу ультразвукових ВПВ приділяють у своїх роботах Ричагов, Терещенко, Грег, П. Мур, Г. Браун та ін.. Проте в даних роботах підвищення точності та компенсація впливу нерівномірності профілю потоку на роботу ультразвукового ВПВ здійснюється шляхом оптимізації вимірювальної камери перетворювача, варіацією кількості каналів зондування та їх розташуванням. Для якісного визначення впливу нерівномірності розподілу профілю швидкостей та асиметрії потоку в [1] пропонується порівнювати спотворений профіль з ідеальним за декількома по-

казниками. У приведених роботах не приділено достатньої уваги до узагальненої оцінки величини неоднорідності потоків рідин і газів.

Саме відсутність комплексного підходу до оцінки асиметрії плинних потоків для систем вимірювання витрати та кількості рідин і газів визначає актуальність даної роботи.

Постановка завдання

Аналіз методів оцінки гідродинамічної неоднорідності потоків рідин дозволив зробити такі висновки [1]- [3]: асиметричні потоки, які формуються після певних місцевих опорів, можна описати за допомогою базисних функцій Саламі; оцінка впливу асиметрії за чотирма факторами [2] (фактор профілю, фактор турбулентності, фактор асиметрії, кут закручування) не дає комплексного показника нерівномірності профілю; порівняння спотвореного профілю з ідеальним вносить методичну похибку, оскільки турбулентний осесиметричний профіль може бути описаний різними аналітичними залежностями;

Метою роботи є обґрунтування можливості оцінки величини несиметричності плинних потоків рідини і газів визначенням інтегральної енергетичної характеристики потоку.

Визначення енергетичної характеристики потоку в поперечних перерізах вимірювального каналу приладів

Одним із підходів до визначення ступеня асиметрії потоку в трубопроводі є його енергетична оцінка.

Визначимо кількість руху рідини, що проходить крізь живий переріз потоку. Для цього виділимо в перерізі елементарну площадку dS , крізь яку за одиницю часу проходить маса вимірюваного середовища в кількості

$$dm = \rho \cdot v \cdot dS, \quad (1)$$

де ρ – густина вимірюваного середовища;

v – миттєва швидкість вимірюваного середовища.

Враховуючи залежність (1) кількість руху рідини, що проходить крізь елементарну площадку dS , можна визначити за виразом

$$dJ = \rho \cdot v^2 \cdot dS. \quad (2)$$

Відповідно кількість руху рідини (сумарний імпульс) можна навести залежністю:

$$J = \int_S \rho \cdot v^2 \cdot dS. \quad (3)$$

Вираз (3) представляє собою інтегральну енергетичну характеристику потоку у вигляді сумарного імпульсу потоку [3].

Оскільки кількість руху рідини розраховується за дійсним значенням швидкості в потоці, то вона буде більшою, ніж розрахована за її середнім значенням.

Залежно від розподілу швидкості в перерізі потік може бути більш компактним або розмитим. Міра компактності потоку характеризується моментами розсіяння імпульсу потоку у вигляді [4]:

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{J} \int_y (y - y_0)^2 \rho v^2 dy, \quad (4)$$

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{J} \int_x (x - x_0)^2 \rho v^2 dx, \quad (5)$$

де x_0, y_0 – координати центра потоку;

x, y – плінна координата точки потоку.

Швидкість потоку рідини можна виразити як добуток максимальної швидкості $v_{\max}$ на базисну функцію $v\left(\frac{r}{R}\right)$ [4]:

$$V = v_{\max} \cdot v\left(\frac{r}{R}\right), \quad (6)$$

де R – радіус трубопроводу;

r – відстань від центру трубопроводу ($r/R=0\dots1$).

Враховуючи залежність (6), вирази (4) та (5) набудуть вигляду:

$$\sigma_x^2 = \frac{V_m^2}{J} \int_y (y - y_0)^2 v(y)^2 dy; \quad (7)$$

$$\sigma_y^2 = \frac{V_m^2}{J} \int_x (y - y_0)^2 v(x)^2 dx. \quad (8)$$

Оскільки розглядається круглий циліндричний трубопровід, то $x = \frac{r}{R}$ та $y = \frac{r}{R}$.

При енергетичній оцінці ступеню асиметрії потоку рідини розрахунки моментів розсіяння імпульсів потоку в перерізах пропонується проводити по 4 – х діаметральних хордах (рис.1).

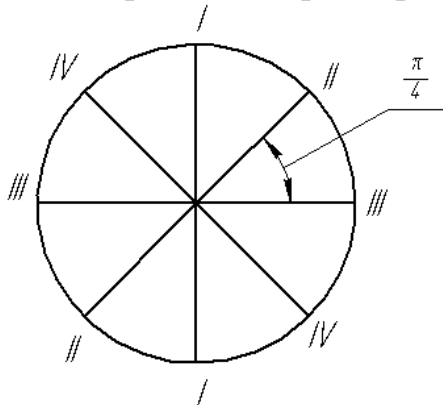


Рис. 1. Розташування хорд

Кожна хорда зміщена відносно попередньої на кут $\pi/4$. Для осесиметричного профілю по кожній із хорд графіки розподілу швидкостей будуть близькими один до одного. Проте для асиметричного профілю потоку графіки розподілу швидкостей будуть значно відрізнятися, а відповідно і для кожного перерізу значення моментів розсіяння імпульсів потоку будуть різними.

На рис. 2 зображено тривимірну модель профілю P5 за Саламі [5], що описується ви-

разом:

$$\frac{v\left(\frac{r}{R}\right)}{v_{\max}} = \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{9}} + 0,6813 \cdot \frac{r}{R} \cdot \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{9}} e^{-0,10} (\sin \theta)^2,$$

де θ - кут повороту вимірювальних каналів у трубопроводі.

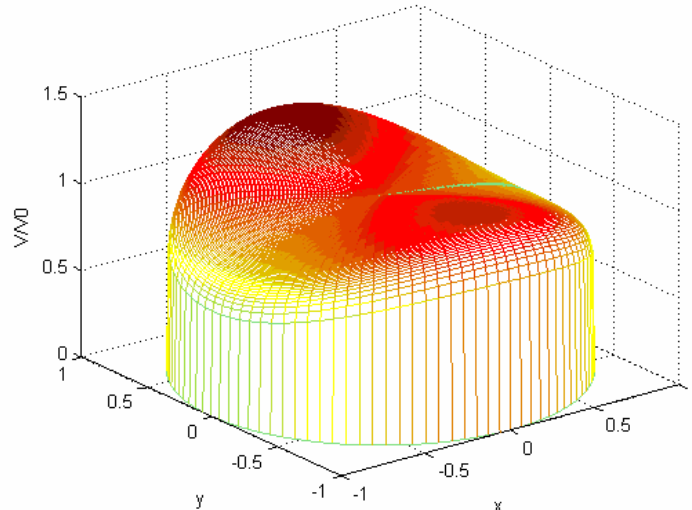


Рис. 2. Тривимірна модель профілю P5

На рис. 3 наведені графічні залежності розподілу швидкостей по діаметральних хордах (рис. 1).

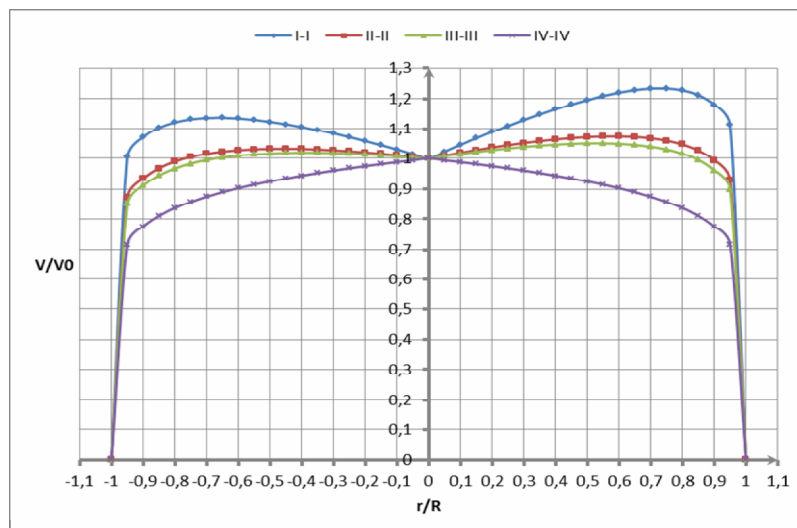


Рис. 3. Розподіл швидкостей профілю P5 по хордах

Оскільки моменти розсіяння імпульсів потоку виражають його енергетичну характеристику, то при асиметрії потоку їх значення будуть змінюватися в

залежності від її величини. При симетричних потоках моменти розсіяння імпульсу потоку будуть значно меншими ніж за асиметричних.

Для перевірки даного твердження були проведені дослідження симетричних та асиметричних потоків рідини, що протікає по трубопроводах з круглим поперечним перерізом.

Теоретичні дослідження гідродинамічних характеристик потоків здійснювалися для плинного вимірюваного середовища рідини, профіль швидкості яких описується такими математичними моделями:

а) зі степеневою базисною функцією:
$$\frac{v\left(\frac{r}{R}\right)}{v_{\max}} = \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{9}};$$

б) профіль Гrego [3]:
$$\frac{v\left(\frac{r}{R}\right)}{v_{\max}} = 1,1523 + 0,09211 \cdot \ln\left(1 - \frac{r}{R}\right) + 0,1858 \cdot \Phi\left(\frac{r}{R}\right),$$

де

$$\Phi\left(\frac{r}{R}\right) = -0,553035 \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^4 + 1,606606 \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^3 - 1,878203 \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^2 + 0,604417 \cdot \left(\frac{r}{R}\right) + 0,002689;$$

в) профіль P5 за Саламі.

Такі профілі описують турбулентну модель руху рідини, останній з чітко вираженою асиметрією. Результати розрахунків енергетичного критерію наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Результати розрахунків енергетичного критерію

Переріз Профіль	I-I	II-II	III-III	IV-IV
1/9	17,876	17,876	17,876	17,876
Гrego	17,919	17,919	17,919	17,919
P5	19,757	20,164	17,876	19,861

Сучасні САЕ/CAD системи дозволяють проводити моделювання проходження потоку через різноманітні місцеві опори. Але в такому випадку отримані результати моделювання дискретні. При обробці експериментальних даних доцільніше перейти від інтегральної оцінки до оцінювання за сумою. Звичайно, при таких обчисленнях дещо знижується точність оцінювання, яка не має суттєвого впливу на рішення. Так при оцінці моментів розсіяння та сумарного імпульсу струменя по 100 точках профілю (для прикладу профіль 1/9) відмінність між розрахунками складає 0,34%.

У такому випадку вирази для визначення сумарного імпульсу (3) та моментів розсіяння (4) та (5) набудуть вигляду:

$$J = \sum_{i=1}^n v_i^2 \cdot \rho \cdot \Delta x; \quad (7)$$

$$\sigma_x^2 = \frac{v_{\max}^2}{J} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2 \cdot v_i^2 \cdot \rho \cdot \Delta x, \quad (8)$$

де Δx – крок, між i -тими значеннями швидкості в напрямі діаметральної хорди;
 n – кількість точок.

При моделюванні проходження потоку через різні місцеві опори на вході досліджуваної ділянки задається осесиметричний потік.

Інтегральна енергетична оцінка ступеня асиметрії потоку, викликаній відповідним місцевим опором, визначається відносно осесиметричного профілю на вході досліджуваної ділянки.

Середнє значення моменту розсіювання імпульсу на вході досліджуваної ділянки буде визначатися за виразом:

$$\bar{\sigma}_0 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \sigma_{0i}, \quad (9)$$

де $m = 4$ – кількість хорд, по яким здійснюється оцінка.

Індекс «0» означає, що розглядається початковий вхідний переріз.

Середнє квадратичне відхилення від середнього значення симетричного потоку буде визначатися за виразом

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\sigma_{ji} - \bar{\sigma}_0)^2}, \quad (10)$$

де j – номер перерізу вздовж осі трубопроводу.

Одним із найпотужніших програмних пакетів для моделювання гідродинамічних процесів CAE/CAD системи на сьогодні є середовище Ansys Fluent. Середовище Ansys Fluent дозволяє вирішувати широкий спектр завдань обчислювальної гідродинаміки, та проводити моделювання як статичних так і динамічних процесів.

Моделювання в середовищі Ansys Fluent CFX проводилося для просторового коліна (рис. 4).

Умовний діаметр трубопроводу $D_y = 32$ мм. Вхідною величиною є швидкість потоку рідини, профіль якої розподілений за законом Гrego [2].

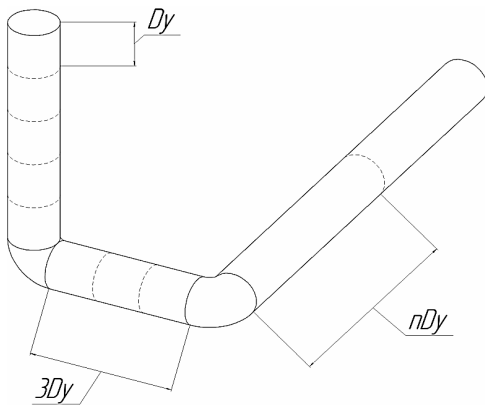


Рис. 4. Просторове коліно

Середнє значення швидкості відповідає номінальній витраті Q та визначається за виразом:

$$\bar{v} = \frac{4Q}{\pi D_y^2}. \quad (11)$$

Для просторового коліна найбільш характерними будуть перерізи безпосередньо після перегинів.

На рис. 5 приведені графіки розподілу швидкостей по хордах.

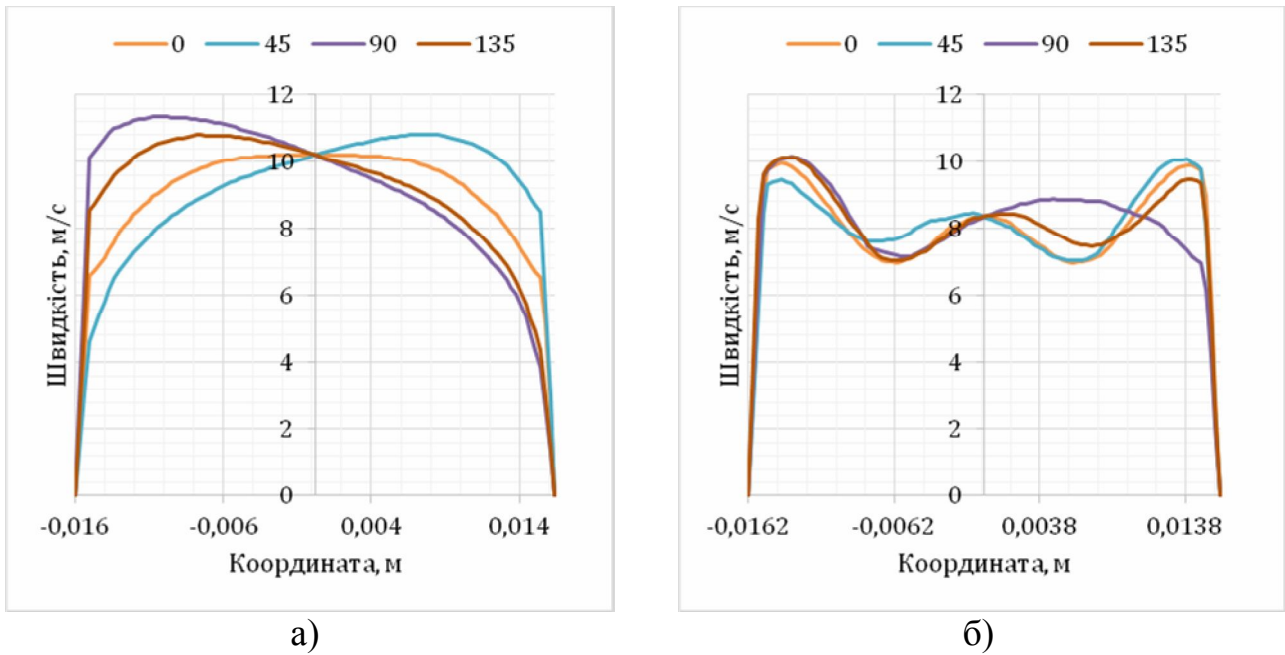


Рис. 5. Профілі розподілу швидкостей на відстані $7D_y$ (а) та $10 D_y$ (б) від початку трубопроводу

Як видно із приведених графіків у даних перерізах, наявна значна асиметрія потоку та неспівпадіння швидкостей по хордах. У результаті проведення розрахунків були отримані числові значення моментів розсіяння імпульсів потоку для всіх перерізів, що розміщені на відстані D_y один від одного.

На рис. 6 приведена графічна залежність моментів розсіяння імпульсу вздовж трубопроводу.

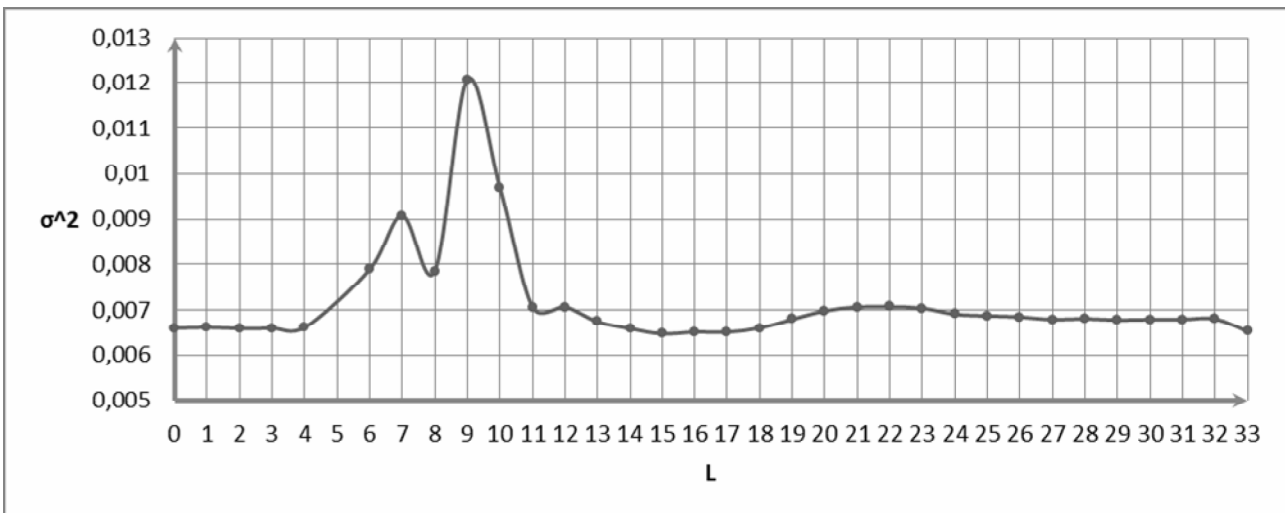


Рис. 6. Розподіл σ по довжині трубопроводу

Як видно із приведенного графіка значення сумарного моменту розсіяння імпульсу по чотирьох хордах зростає в порівнянні з його сумарним значенням

для симетричного профілю при спотворенні потоку. Піки на рис. 6 відповідають найбільшому значенню асиметрії, що зумовлена згинами просторового коліна.

Висновки

Одним із можливих підходів до оцінки ступеня асиметрії потоку є визначення зміни кінетичної енергії, що характеризує міру перенесення маси потоку, за допомогою моменту розсіяння імпульсу потоку.

Запропонована методика оцінки ступеня асиметрії потоку дозволяє отримати комплексний показник асиметрії в перерізі використовуючи дискретні значення швидкостей по чотирьох діаметральних хордах.

Представлені результати комп'ютерного моделювання проходження рідини крізь місцевий опір – просторове коліно, що підтверджують теоретичні дані.

Подальші дослідження будуть пов'язані з оцінюванням впливу несиметричності потоків рідин та газів на ефективність вимірювання їх витрати та кількості.

Література

1. Untersuchung und Entwicklung strömungsprofilunempfindlicher Wasser- und Wärmezähler und deren mechanischer Schnittstellen; (PTB-Bericht PTB-MA-90); Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2012.
2. Gianalberto Grego Choise of position of four acoustic paths in circular conduit sections_ downstream of curves with insufficient straight length and highly disturbed velocity profiles, 7th International Conference on Hydraulic Efficiency Measurements, September 3rd-6th 2008, Milan, Italy.
3. Кулінченко В.Р. Гідравліка, гідравлічні машини і гідропривід: підручник / В.Р. Кулінченко. – К.: Фірма «ІНКОС», Центр навчальної літератури, 2006. – 616 с.
4. Струтинський В.Б. Математичне моделювання процесів та систем механіки: підручник / В.Б. Струтинський. – Житомир: ЖІТІ, 2001. – 612 с.
5. Salami L.A. Application of a computer to asymmetric flow measurement in circular pipes // Trans. Inst. MC. 1984. V.6. P. 197.

*Надійшла до редакції
15 травня 2013 року*

© Коробко І.В., Волинська Я.В., 2013

УДК 676.017.55

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ВЛАЖНОСТИ И ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛОТНОСТИ БУМАЖНОГО ПОЛОТНА ПРИ ИХ СВЯЗАННОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ КОНТРОЛЕ

*Воронов С. А., Паламарчук Д. В., Панкратов В. Й., Родионов В. Н.
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина*

Точность технологического контроля характеристик влажности и поверхностной плотности бумажного полотна абсорбционным оптическим методом существенным образом определяется тем, что полосы поглощения воды и целлюлозы бумаги находятся в одном