

УДК 681.121

Коробко<sup>1</sup> І.В., д.т.н., доц., Рак<sup>2</sup> А.М.

1-НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна; 2- ДП Укрметртестстандарт, м. Київ, Україна

## ДОСЛІДЖЕННЯ ДІЇ АСИМЕТРИЧНОСТІ ПОТОКУ РІДИНИ, ВИКЛИКАНОЇ МІСЦЕВИМИ ГІДРАВЛІЧНИМИ ОПОРАМИ У ВИГЛЯДІ ДВОХ КОЛІН, НА ТОЧНІСТЬ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ВИТРАТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КЛАСУ

Korobko<sup>1</sup> I., Rak<sup>2</sup> A.1-National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine ([i.korobko@kpi.ua](mailto:i.korobko@kpi.ua));2-SE «Ukrmetrteststandard» ([i.mvsticus@gmail.com](mailto:i.mvsticus@gmail.com))

### RESEARCH OF THE IMPACT OF ASYMMETRIC FLUID FLOW, CAUSED BY THE HYDRAULIC RESISTANCE IN FORM OF TWO KNEES ON THE ACCURACY OF ULTRASONIC FLOWMETERS TYPE

В роботі наведені результати досліджень впливу неоднорідностей рідиннофазного потоку, які виникають при його проходженні крізь місцеві гідравлічні опори, на метрологічні характеристики ультразвукових вимірювальних перетворювачів витрати. Оцінювання впливу асиметрії течії рідини на точність приладів проведено з використанням методів обчислювальної гідродинаміки на базі програмного комплексу ANSYS CFX. Для дослідження обрані місцеві опори у формі колін різної просторової орієнтації, які є елементами багатьох вузлів обліку рідинних паливно-енергетичних ресурсів і в реальних умовах створюють значні асиметрії потоку. Отримані результати окреслюють досить чітку гідродинамічну картину потоку до і після гідравлічного опору, що уможливує визначити місця локального розміщення приладів по протяжності технологічної мережі за умов отримання максимальної точності і мінімальної дії на вимірюване середовище. Це дозволяє ефективно застосовувати перетворювачі без огляду на вимоги обов'язкового забезпечення прямих ділянок до і після них.

*Ключові слова:* рідина, витрата, перетворювачі, точність, асиметрія потоку

#### Вступ. Постановка проблеми

На сьогоднішній день актуальною є проблема високоточних вимірювань витрати та кількості рідини, включаючи всі її аспекти від розроблення і метрологічних досліджень вимірювальних перетворювачів витрати (ВПВ) до побудови вузлів обліку в конкретних умовах експлуатації.

Одними з тих ВПВ, що використовуються для обліку рідиннофазних потоків за різних режимів їх протікання, є ультразвукові (УЗ) ВПВ [1]. Принцип дії УЗ ВПВ ґрунтується на залежності швидкості переміщення акустичних коливань за і проти плину вимірюваного середовища. Такі прилади мають істотні переваги при вимірюванні витрати речовини, дозволяють вимірювати з високою точністю потоки з малими і великими швидкостями, на створюють втрати напору, не впливають на гідродинаміку потоку, забезпечують можливість виміру витрати нафтопродуктів, агресивних, неелектропровідних, непрозорих рідин, неоднорідних рідин (суспензій, пульп), а також потоків в трубах малих і великих діаметрів, мають високу швидкодію (мала інерційність), широкий діапазон вимірювання; конструктивну простоту; зручність обслуговування [2, 3]. В той же час, одним із факторів, що впливають на точність вимірів є деформація профілю швидкості потоку [4]. Гідродинамічна картина течії змінюється при плинні вимірюваного середовища по технологічній мережі з місцевими гідравлічними опорами різної просторової конфігурації, які формують вузол обліку рідини.

Для створення ефективних УЗ ВПВ з високими метрологічними характеристиками необхідно провести їх оптимізацію шляхом знаходження раціональних значень параметрів конструкції, не ускладнюючи при цьому технологію їх виготовлення, зменшення чутливості ВПВ до неоднорідності профілю потоку на вході.

#### Постановка задачі

Ультразвукові вимірювальні перетворювачі витрати мають значні переваги перед іншими класами приладів. В той же час, на точність вимірювання значно впливають гідродинамічні характеристики потоку, які окреслюють неоднорідність розподілу швидкості у поперечних перерізах вимірювальної камери і є наслідком впливу місцевих гідравлічних опорів, які є невід'ємною частиною будь-якої реальної системи обліку. До таких

гідралічних опорів належать конфузори, дифузори, раптові розширення та звуження; коліна різної геометричної форми та просторової орієнтації.

Для створення ефективного вузла вимірювання рідиннофазного середовища необхідно визначити основні чинники впливу на точність приладу і методологію їх компенсації та визначення раціонального місця монтажу на технологічній мережі.

#### Вплив місцевих гідралічних опорів на точність вимірювальних перетворювачів витрати

Дослідження впливу неоднорідностей потоків рідини, враховуючи складність та трудомісткість процесів натурних досліджень, на точність ультразвукових перетворювачів витрати, проводилися із застосуванням методів обчислювальної гідродинаміки на базі програмного комплексу *ANSYS CFX*, що реалізує метод кінцевих елементів і дозволяє, з високою ймовірністю, визначити проекції векторів швидкостей в дискретних точках потоку, як за поперечним перерізом, так і по його протяжності [5, 6].

Найбільш часто для вимірювання витрати та кількості рідинних паливно-енергетичних носіїв використовуються ультразвукові прилади, які визначають швидкість потоку за виміром різниці часу проходження акустичного сигналу в напрямі плинину і проти нього. Виходячи з цього, дослідження здійснювалася на прикладі однохордового УЗ перетворювача з класичним розміщенням хорди в діаметральній площині під кутом до вісі потоку. Для вказаної моделі проведено моделювання взаємодії потоку рідини з ЧЕ конструкції і визначення похибок вимірювання в залежності від кута її просторової орієнтації та відстані від місцевого опору.

Аналіз роботи УЗ приладів показує, що значення вимірної витрати пропорційне усередненій за УЗ променем швидкості потоку  $v_l$ , площі поперечного перерізу вимірювальної камери  $S$  та гідродинамічному коефіцієнту  $k_{uz}$ , що визначає співвідношення між усередненою за УЗ променем швидкістю потоку  $v_l$ , яку вимірює прилад, та середньою по поперечному перерізу швидкістю потоку  $\bar{v}$  [3]. Враховуючи сталість значення поперечного перерізу  $S$ , оцінку точності УЗ перетворювача можна проводити шляхом знаходження відхилення гідродинамічного коефіцієнта за реальної неоднорідності відносно його значення для модельного осесиметричного профілю що описує розвинутий турбулентний потік у трубопроводі з круглим поперечним перерізом.

В реальних вузлах обліку досить значні асиметрії потоку створюються місцевими гідралічними опорами у формі колін з різною просторовою орієнтацією (рис.1-2)

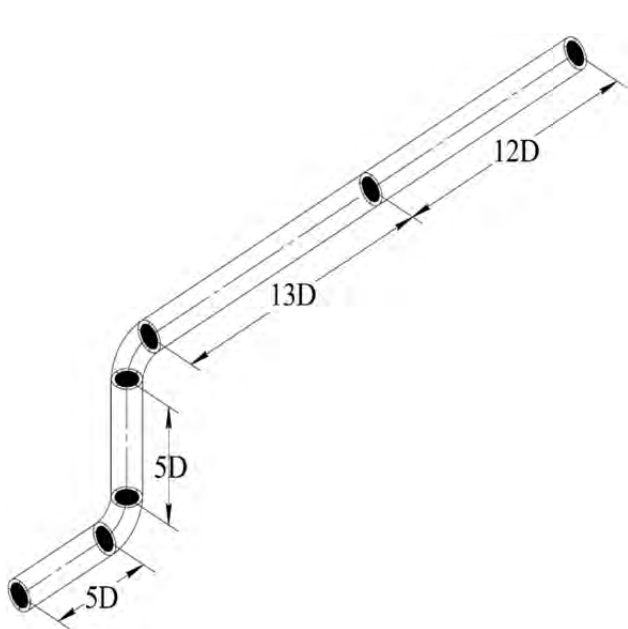


Рис. 1. Два коліна з поворотом на кут  $\pi/2$  рад кожний і розміщених в одній площині

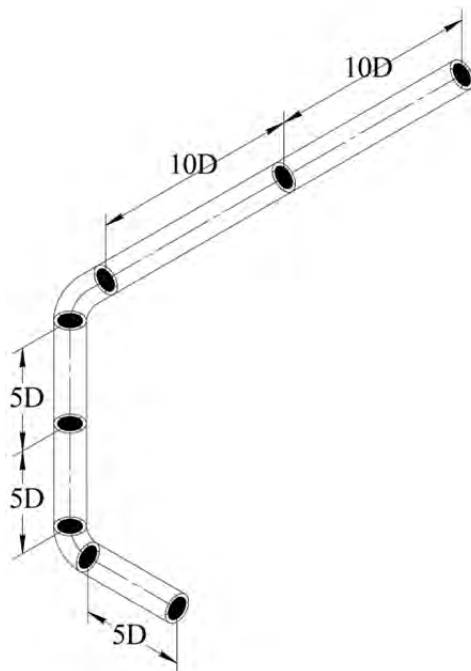


Рис. 2. Два коліна з поворотом на кут  $\pi/2$  рад кожний і розміщених в різних площинах

**Оцінка впливу на точність УЗ перетворювачів асиметричності потоку, викликаній двома колінами з поворотами на кут  $\pi/2$  рад кожне і розміщених в одній площині.**

Опираючись на результати оцінок ступеню неоднорідності потоків, для досліджень було обрано перетини №1, 9, 13 та 30, на вхід яких подавалися відповідні їм епюри профілів швидкостей (рис. 3 – 6).

Аналіз ізотак швидкостей (рис.3 – 6) вказує на те, що в перерізах 9 ( $3d_y$  від 1-го місцевого опору), 13 ( $d_y$  від 2-го місцевого опору) та 30 ( $12d_y$  від 2-го місцевого опору) спостерігається порушення симетричності потоку, внаслідок чого на результати визначення усередненої за УЗ променем швидкості потоку впливає орієнтація виміральної хорди відносно осі перетворювача, яка ортогональна напрямку руху рідини.

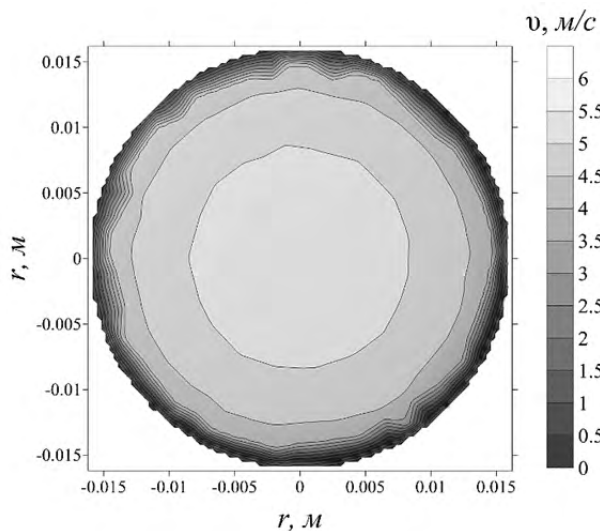


Рис. 3. Ізотак швидкостей для перерізу на відстані  $1 d_y$  від входу

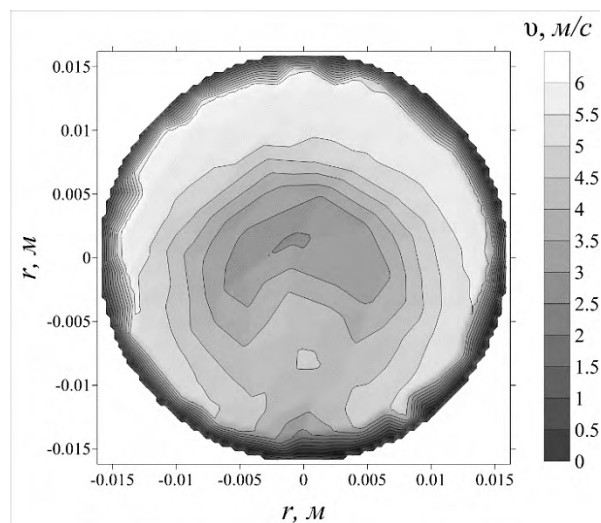


Рис. 4. Ізотак швидкостей для перерізу на відстані  $9 d_y$  від входу

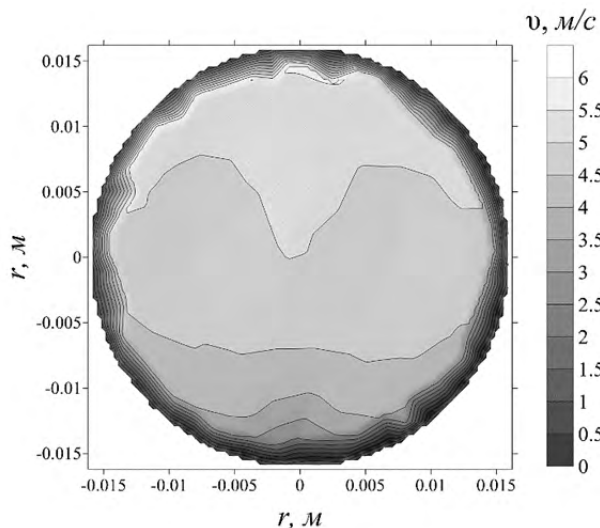


Рис. 5. Ізотак швидкостей для перерізу на відстані  $13 d_y$  від входу

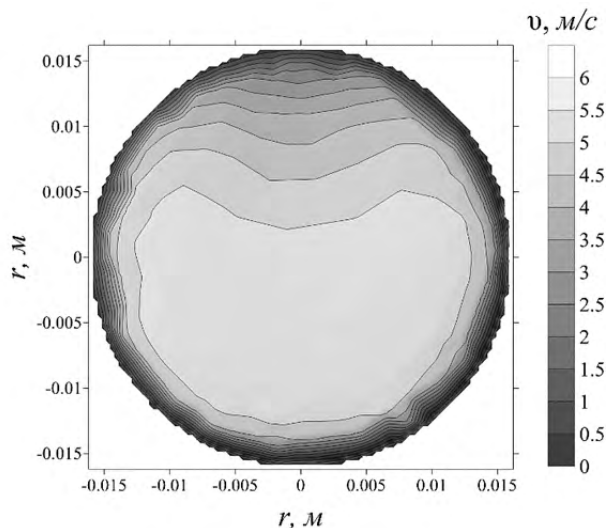


Рис. 6. Ізотак швидкостей для перерізу на відстані  $30 d_y$  від входу

Оцінювання якісних і кількісних особливостей процесу такого впливу проведено чисельним моделюванням для кожного з вказаних перетинів (рис. 7, 8) – для перерізу на відстані  $9 d_y$  від входу ( $3 d_y$  від 1-го місцевого опору), за чотирьох випадків розміщення вимірювальних площин, відносно вертикальної осі перетворювача, при відліку кута повороту за годинниковою стрілкою з дискретністю  $\pi/4$  рад.

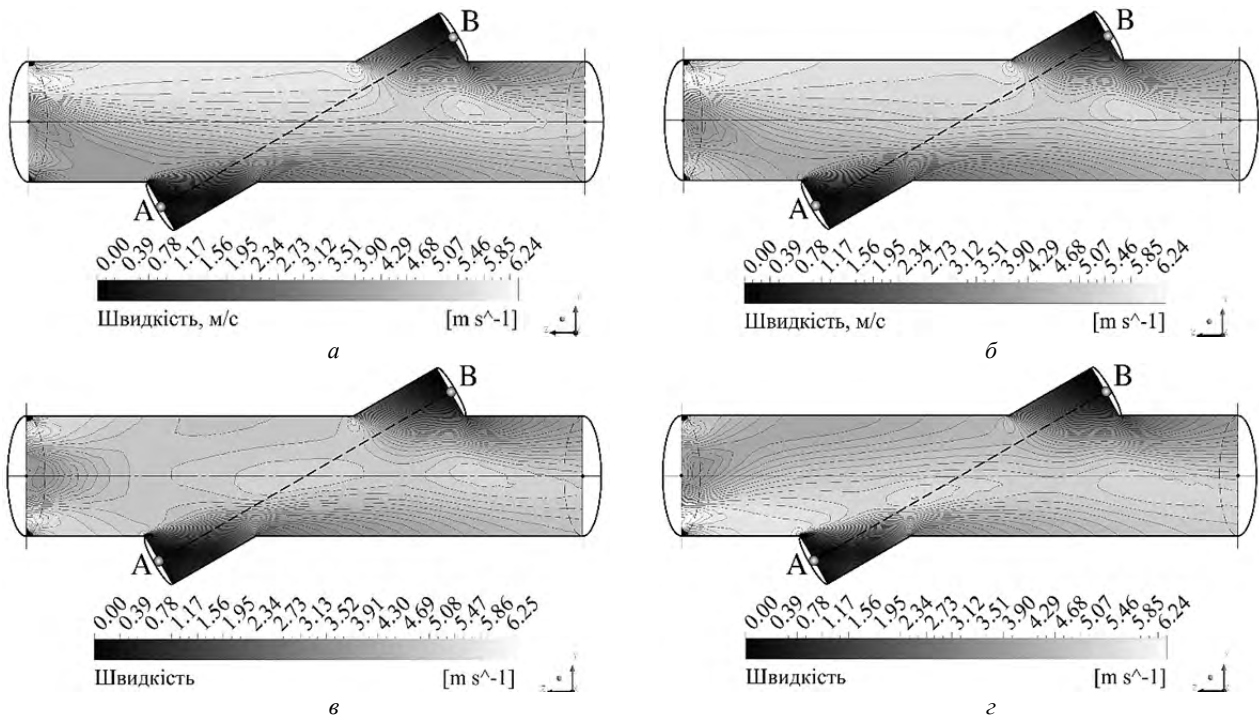


Рис. 7. Візуалізовані картини течії рідини у вимірювальній камері (для перерізу на відстані  $3d_y$  від 1-го місцевого опору), за різних кутів орієнтації вимірювальної хорди: а)  $\theta=0$ ; б)  $\theta=\pi/4$ ; в)  $\theta=\pi/2$ ; г)  $\theta=3\pi/4$

Аналіз графічних залежностей похибок вимірювання УЗ перетворювачів за різних кутів орієнтації вимірювальної хорди (рис.9) показує, що на перерізах близьких до 1-го гідравлічного опору найменшу похибку отримуємо при орієнтації вимірювальної хорди на кут  $\theta=3\pi/4$  рад. При інших орієнтаціях приладів в просторі похибки вимірювання на початкових перерізах близькі за характером та величиною і досягають максимуму в районі 6-7 перетинах ((1-2)  $d_y$  після 1-го гідравлічного опору), який становить 5%. При орієнтації вимірювальної хорди на кут  $\theta=3\pi/4$  рад максимальна похибка спостерігається безпосередньо після 2-го опору (13 перетин) і досягає 3,5%.

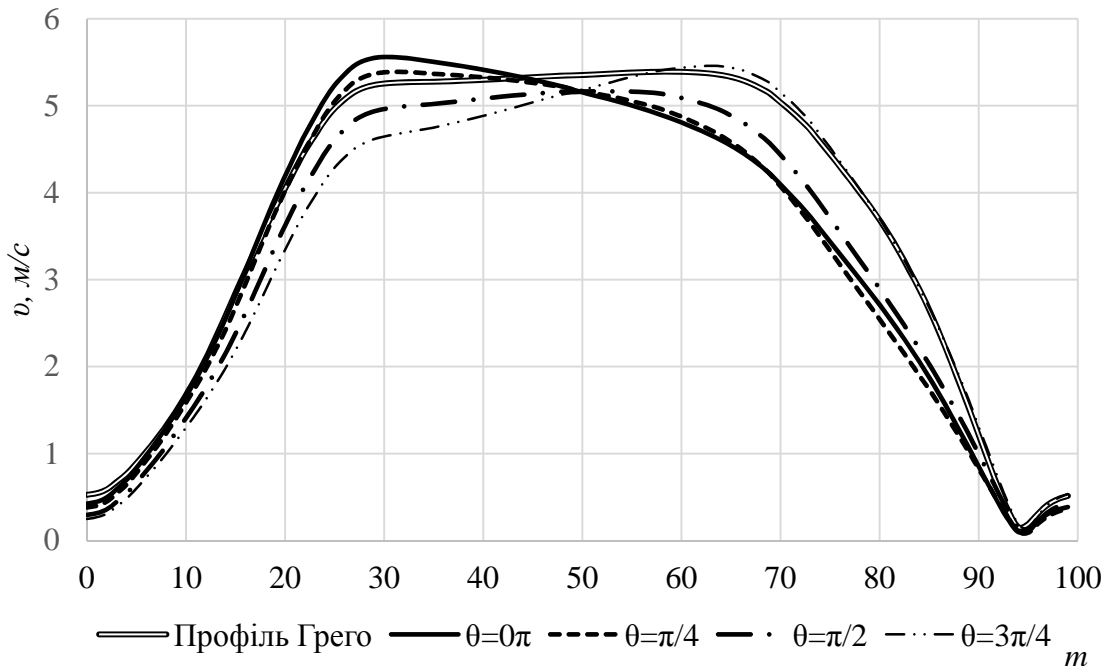


Рис. 8. Профілі швидкостей за різних кутів орієнтації вимірювальної хорди та профілю *Грего* для перерізу на відстані  $3d_y$  від 1-го місцевого опору

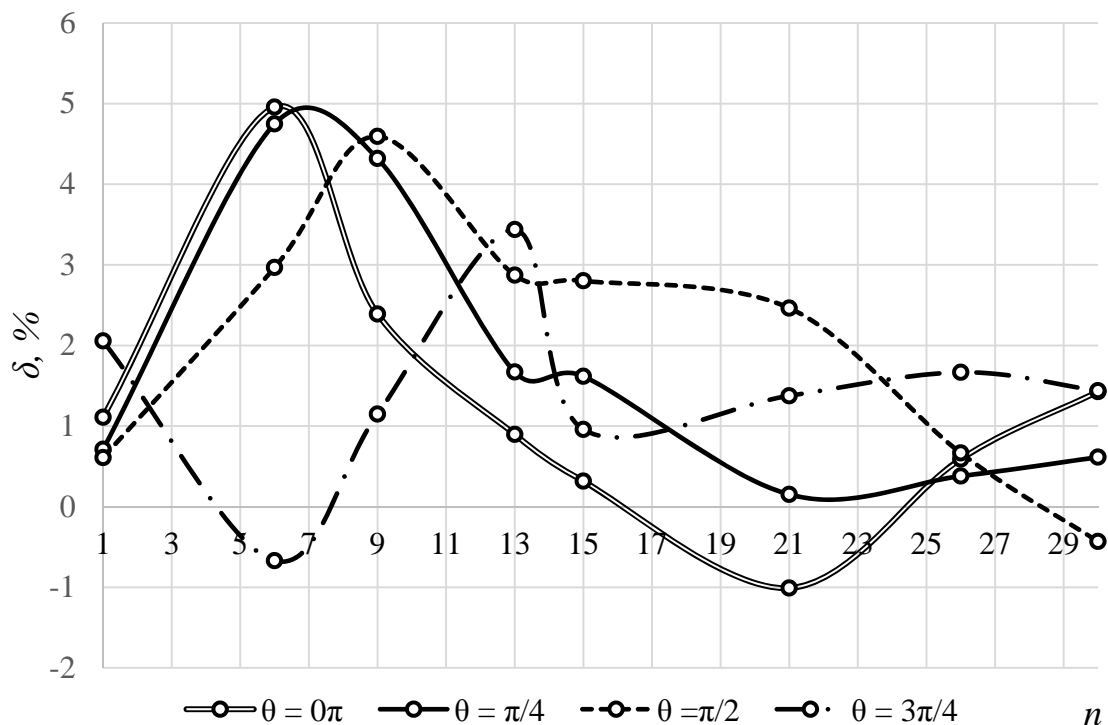


Рис. 9. Похибки УЗ ВПВ в залежності від місця встановлення відносно місцевого опору у вигляді двох колін з поворотами на кут  $\pi/2$  рад кожний і розміщених в одній площині та орієнтації перетворювача в просторі

Після 9-го перетину похибки зменшуються для всіх орієнтацій розміщення хорд (за винятком кута орієнтації  $\theta=3\pi/4$  рад) і досягають мінімуму в районі 21-го перерізу (15  $d_y$  після 1-го та 9  $d_y$  після 2-го гідралічних опорів) за кутів орієнтації  $\theta=0^\circ$  та  $\theta=\pi/2$  рад. На відстані 14  $d_y$  від 2-го перерізу (26 перетин) похибки приладу співпадають і наближаються до (0,5 – 0,6)%, за виключенням орієнтації напряму посилання УЗ сигналів під кутом  $\theta=3\pi/4$  рад. Після 26 перетину похибки перетворювача, за будь-якої орієнтації вимірювальної хорди, не перевищують 1%.

**Оцінка впливу на точність УЗ перетворювачів асиметричності потоку, викликаної просторовим коліном (два коліна з поворотом на кут  $\pi/2$  рад кожний і розміщених в різних площинах)**

Опираючись на результати оцінок ступеню неоднорідності потоків, для досліджень були обрані перетини № 9, 14, 19, 24, 30 та 50, на вхід котрих подавалися відповідні їм епюри профілів швидкостей (рис.10 – 15).

Аналіз ізотак швидкостей (рис. 10 – 15) показує, що в досліджуваних перерізах спостерігається асиметричність потоку, в наслідок чого на результати визначення усередненої за УЗ променем швидкості потоку впливає орієнтація вимірювальної хорди відносно осі перетворювача, яка ортогональна напряму руху рідини. Оцінювання якісних і кількісних особливостей процесу такого впливу проведено чисельним моделюванням для кожного з вказаних перерізів (рис.16 – 17) - для перерізу на відстані 9  $d_y$  від входу (3  $d_y$  від 1-го місцевого опору), за чотирьох випадків розміщення площини, в якій знаходиться вимірювальна хорда, відносно вертикальної осі перетворювача, при відліку кута повороту за годинниковою стрілкою з дискретністю  $\pi/4$  рад.

Аналіз графічних залежностей похибок вимірювання УЗ ВПВ за різних кутів орієнтації вимірювальної хорди (рис.18) чітко і однозначно відображає місце знаходження гідралічних опорів. На перерізах близьких до 1-го місцевого гідралічного опору найменшу похибку отримуємо при орієнтації вимірювальної хорди на кути  $\theta=0$ ,  $\theta=\pi/4$  рад. При інших орієнтаціях перетворювача в просторі похибки вимірювання на початкових перерізах близькі за характером та величиною і досягають максимуму в районі 6-7 перетинах ((1-2)  $d_y$  після 1-го гідралічного опору) і досягають 9%. Аналогічна за характером спостерігається картина в безпосередній близькості до 2-го гідралічного опору (19-20 перерізи). В цьому разі значення похибок досягає 9% і 4% для хорд, що направлені під кутом  $\theta=3\pi/4$  рад і  $\theta=\pi/2$  рад відповідно.

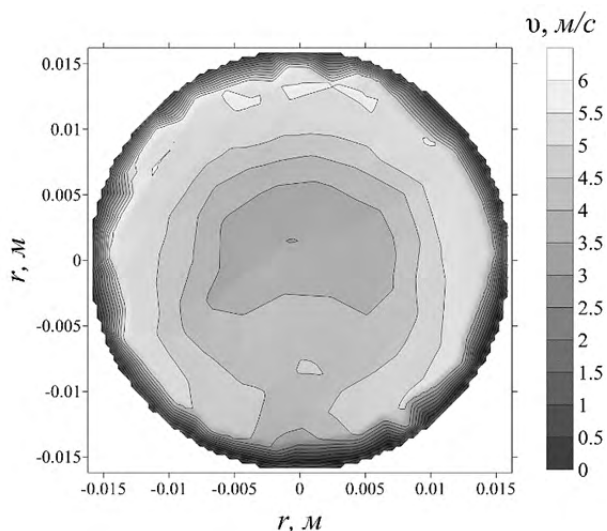


Рис. 10. Ізотахи швидкостей для перерізу на відстані  $9 d_y$  від входу

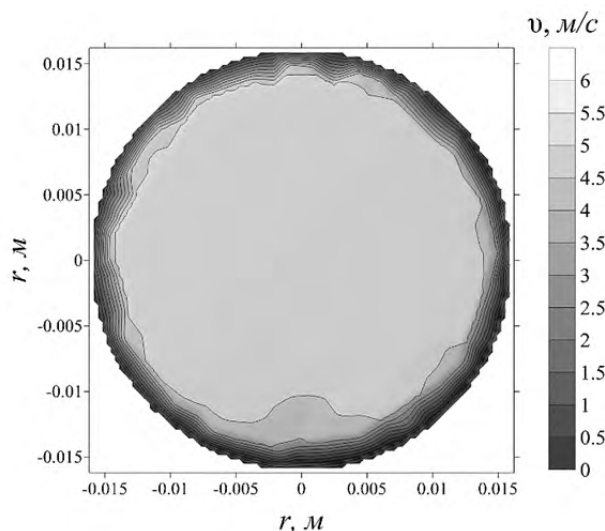


Рис. 11. Ізотахи швидкостей для перерізу на відстані  $14 d_y$  від входу

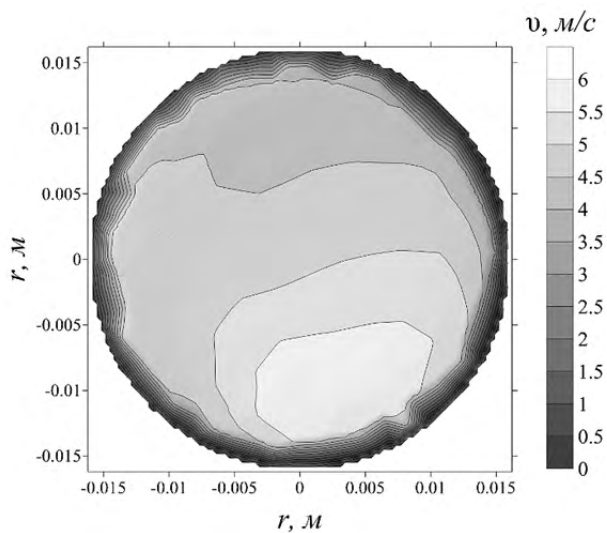


Рис. 12. Ізотахи швидкостей для перерізу на відстані  $19 d_y$  від входу

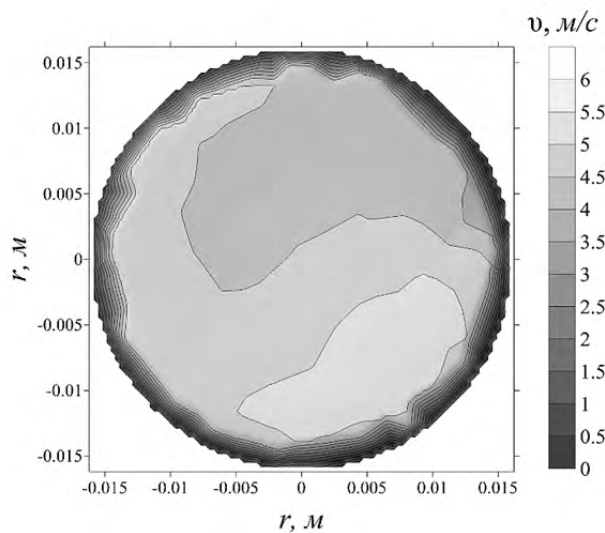


Рис. 13. Ізотахи швидкостей для перерізу на відстані  $24 d_y$  від входу

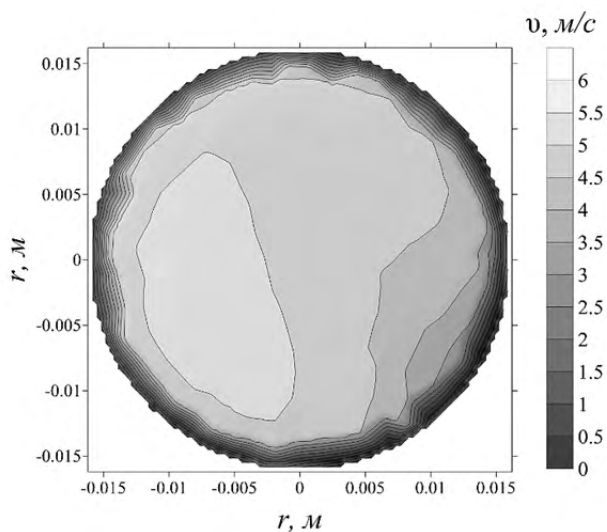


Рис. 14. Ізотахи швидкостей для перерізу на відстані  $30 d_y$  від входу

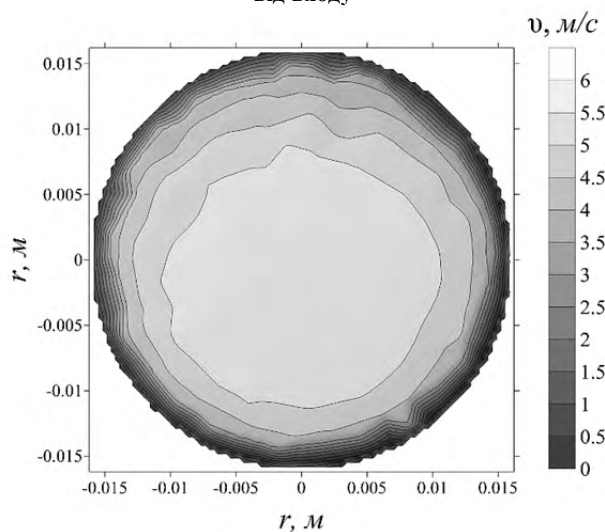


Рис. 15. Ізотахи швидкостей для перерізу на відстані  $50 d_y$  від входу

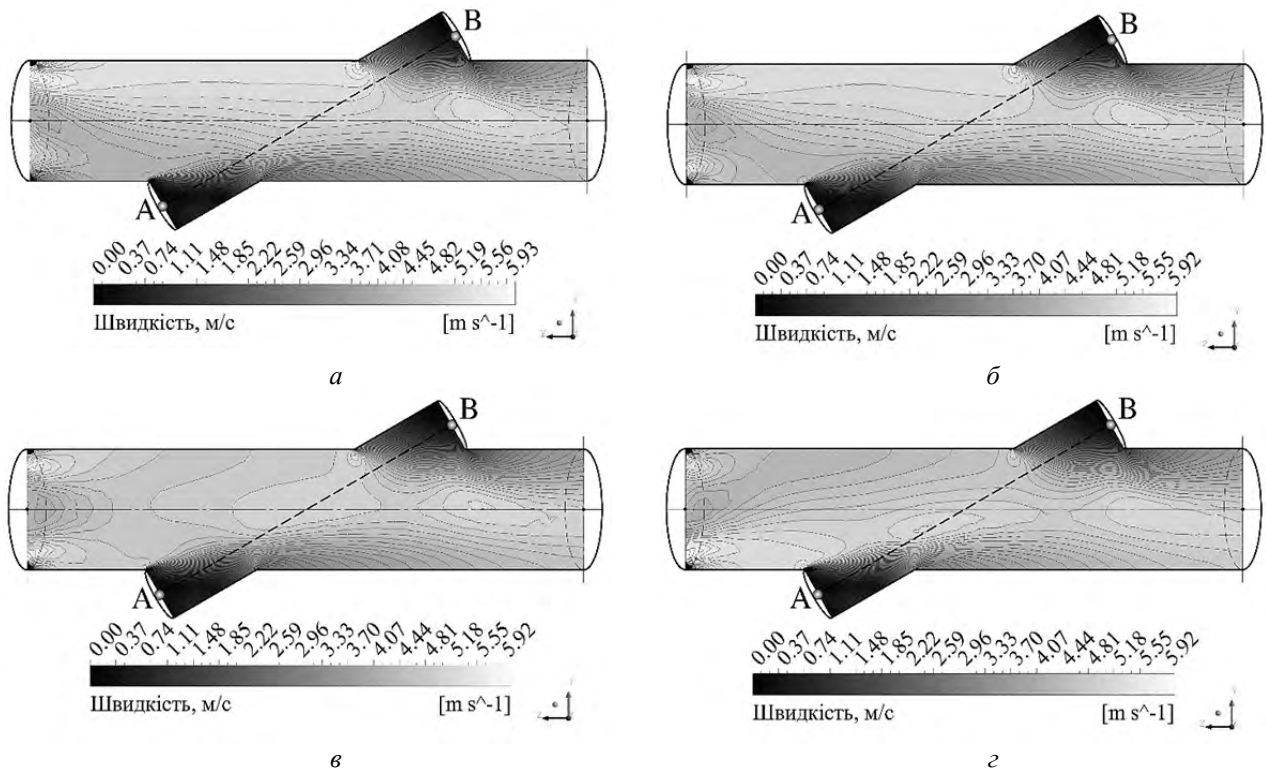


Рис. 16. Візуалізовані картини течії рідини в області взаємодії з ЧЕ УЗ ВПВ (для перерізу на відстані  $9 d_y$  від входу), за різних кутів орієнтації вимірювальної хорди: а)  $\theta=0$ ; б)  $\theta=\pi/4$ ; в)  $\theta=\pi/2$ ; г)  $\theta=3\pi/4$

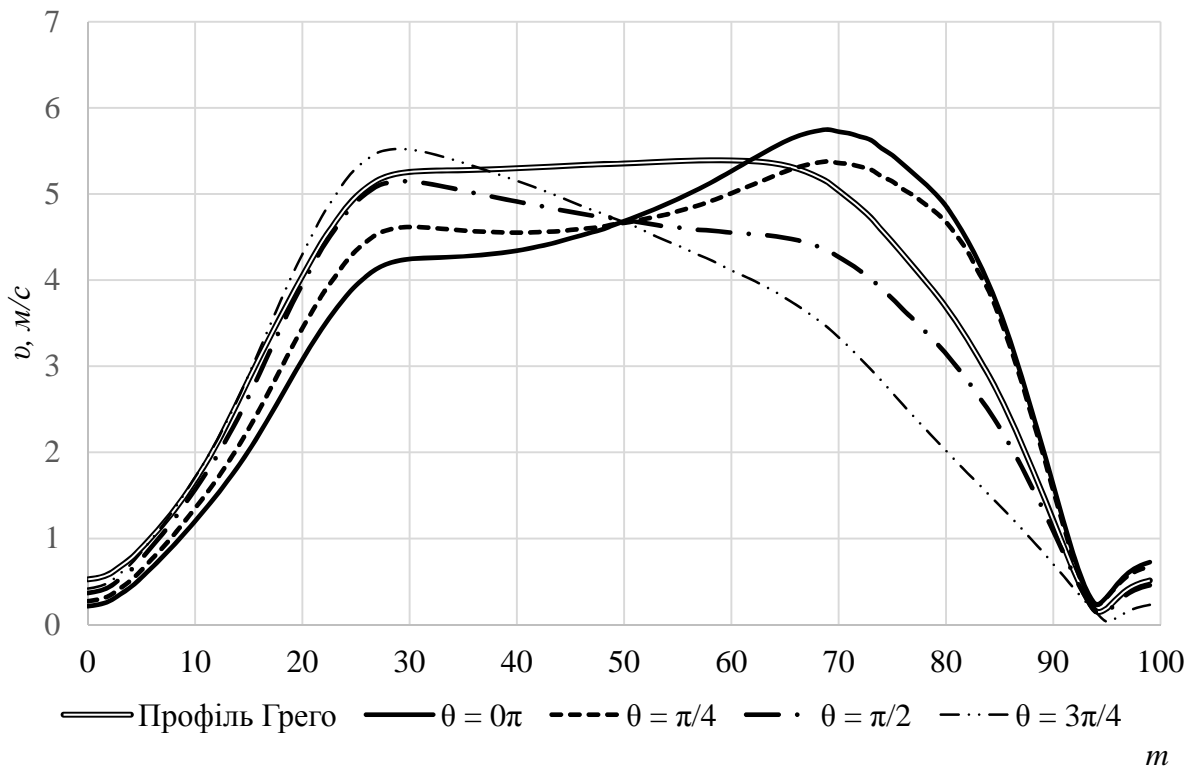


Рис. 17. Профілі швидкостей за різних кутів орієнтації вимірювальної хорди та профілю *Грего* для перерізу на відстані  $19 d_y$  від входу

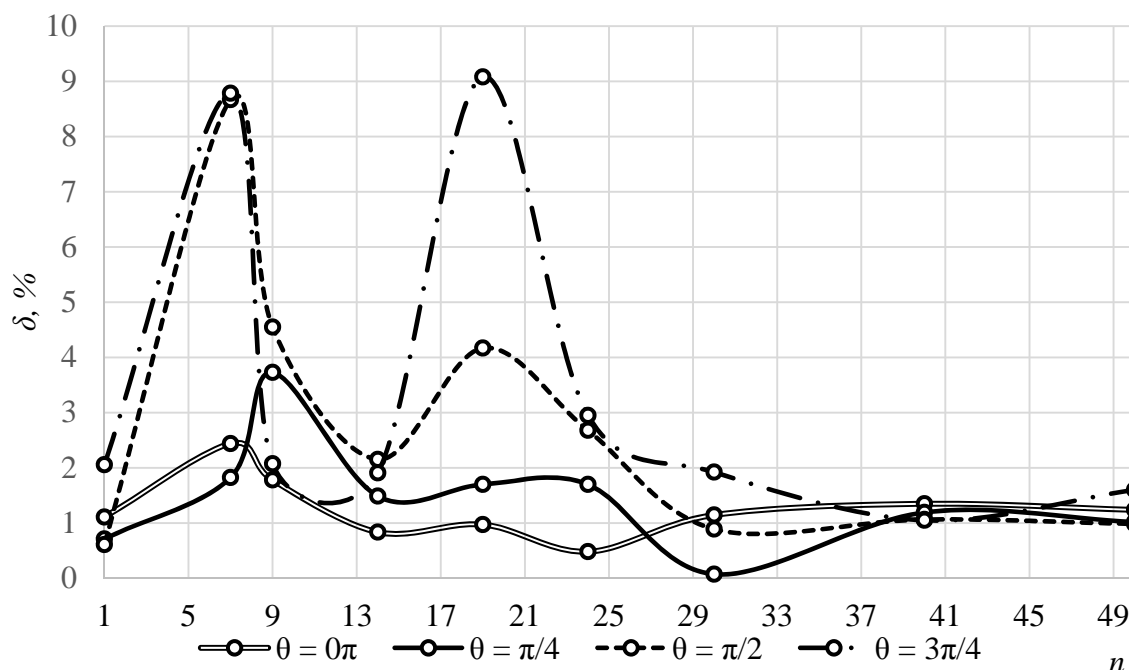


Рис. 18. Похибки УЗ ВПВР в залежності від місця встановлення відносно місцевого опору у вигляді просторових колін та орієнтації перетворювача в просторі

Найменшу похибку в діапазоні 7-30 перетинів має перетворювач з орієнтацією вимірювальної хорди під кутом  $\theta=0$ . В околиці 31-го перетину (15  $d_y$  після 2-го гідравлічного опору) за орієнтації вимірювальної хорди на кут  $\theta=3\pi/4$  рад похибка вимірювання близька до 0%.

Після 25-го перетину похибки зменшуються для всіх орієнтацій розміщення хорд і після 39-го перерізу (22  $d_y$  після 2-го опору) коливаються в межах (1 – 1,5)%.

### Висновки

Проведені дослідження показують, що для ультразвукового перетворювача однопроменевої конфігурації результат вимірювання хордової швидкості, що визначає витрату, залежить від величини викривлення осьової симетрії профілю і зменшується з віддаленням контрольного перетину від місцевого опору. Окрім того, величина похибки залежить від просторової орієнтації приладу відносно вертикальної вісі на технологічній мережі. Найбільший вплив на метрологічні характеристики перетворювачів витрати мають неоднорідності течій, що створюються місцевими гідравлічними опорами у вигляді двох колін розміщених в різних площинах.

Отримані результати дають чітку картину місць локального розміщення приладів на технологічній мережі за умов максимальної точності і мінімальної дії на вимірюване середовище. Це дозволяє можливість ефективно застосовувати перетворювачі без огляду на вимоги обов'язкового забезпечення прямих ділянок до і після приладів а в місцях на технологічній мережі в з врахуванням конкретних натурних умов організації вимірювання.

**Анотація.** В роботі приведені результати досліджень впливу неоднорідностей жидкофазного потоку, що виникають при його проходженні крізь місцеві гідравлічні опору, на метрологічні характеристики ультразвукових вимірювальних преобразовачів витрати. Оцінку впливу асиметрії течій жидкості на точність приладів проведено з використанням методів чисельної гідродинаміки на базі програмного комплексу ANSYS CFX. Для дослідження були вибрані місцеві опору в формі колін різної просторової орієнтації, які є складовими елементами багатьох вузлів мережі з жидких паливно-енергетичних ресурсів і в реальних умовах створюють значні асиметрії потоку. Отримані результати визначають достатньо чітку гідродинамічну картину потоку до і після гідравлічного опору, що дозволяє визначати місця локального розміщення приладів по протяженності технологічної мережі при умові отримання максимальної точності і мінімального впливу на вимірювану середовище. Це дозволяє ефективно застосовувати преобразовачі витрати без необхідності обов'язкового забезпечення прямих ділянок до і після них.

**Ключові слова:** жидкість, витрата, преобразовачі, точність, асиметрія потоку.

**Abstract.** This paper is focused on the influence of liquid-phase flow irregularities on the metrological characteristics of ultrasonic flow measuring transducers, that occurs during the flow passage through the local hydraulic resistance. The impact of asymmetric



*fluid flow on the accuracy of flowmeters was analyzed by the methods of computational fluid dynamics with software complex ANSYS CFX. The local resistances in the form of various tubes of spatial orientation, which are elements of many measurement sections for liquid fuel and energy resources, and in real conditions creates significant asymmetry of the flow, were selected. Obtained results delineate the sufficiently clear hydrodynamic flow pattern before and after the hydraulic resistance, therefore allows to determine the local placement of devices by the length of the technology network under conditions of maximum precision and minimum influence on the measured media. This allows to use measuring transducers without regard to the requirements to ensure straight sections before and after them effectively.*

**Keywords:** *fluid, flowrate, transducers, precision, flow asymmetry.*

#### **Библиографический список использованной литературы**

1. *Коробко, І. В.* Сучасні методи вимірювання витрат енергоносіїв [Текст] / І. В. Коробко, А. В. Писарець // Вестн. НТУУ «КПІ». Сер. Машиностроение.– 2001. – Вып. 40. – С. 448 – 455.
2. *Филатов, В. И.* Гидродинамические погрешности ультразвуковых расходомеров [Текст] / В. И. Филатов // Измерительная техника. – 1996. – №9.– С. 36 – 37.
3. *Биргер, Г. И.* Ультразвуковые расходомеры [Текст] / Г. И. Биргер, Н. И. Бражников – М.: Металлургия, 1964. – 343 с.
4. *Коробко, І. В.* Вплив епюри швидкостей на метрологічні характеристики вимірювальних перетворювачів витрати [Текст] / І. В. Коробко, І. А. Гришанова // Вестн. НТУУ “КПІ”. Сер. Машиностроение. – 2004.– Вып.45.– С. 131–133.
5. *Gryshanova, I.* CFD modeling of turbine flow meters [Text] / I. Gryshanova, I. Korobko // Innovations on discrete productions. – 2014. - №1. – P.6 – 8.].
6. *Гришанова, І.А.* Системи CAD/CAE. ANSYS FLUENT [Текст]: підруч. для вузів / І. А. Гришанова, І. В. Коробко. – К.: Дія ЛТД, 2012. – 208 с.

#### **References**

1. *Korobko, I. V., Pisarec, A. V.* Journal of Mechanical Engineerir «KPI», 2001, no 52, pp. 448 – 455.
2. *Filatov, V. I.* Izmeritel'naja tehnika, 1996, no 9, pp.36 – 37.
3. *Birger, G. I., Brazhnikov, N. I.* Ul'trazvukovye rashodomery, Moscow, Metallurgija, 1964. 343p.
4. *Korobko, I. V., Grishanova I. A.* Journal of Mechanical Engineerir «KPI», 2004, no 45, pp.131 – 133.
5. *Gryshanova, I., Korobko I.* Innovations on discrete productions, 2014, no1, pp.6–8.
6. *Grishanova I. A., Korobko I. V.* Sistemi CAD/CAE. ANSYS FLUENT. Kyiv: Dija LTD, 2012. 208 p.

Подана до редакції 28.10.2014