

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ПОТОКУ ЗА ДОПОМОГОЮ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ІЗ ДІАМЕТРАЛЬНИМ АКУСТИЧНИМ КАНАЛОМ

© Роман Віталій, Матіко Федір, 2013

Національний Університет «Львівська політехніка», кафедра «Автоматизації теплових та хімічних процесів»
вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна

В статті викладено результати моделювання впливу спотворень профілю швидкості потоку на похибку одноканального ультразвукового перетворювача витрати із діаметральним розміщенням акустичного каналу.

В статтє изложєны результать моделирования влияния искажений профиля скорости потока на погрешность одноканального ультразвукового преобразователя расхода с диаметральным размещением акустического канала.

The paper presents the results of modeling of flow profile distortions on the accuracy of single channel ultrasonic flow transducer with diametrically placing acoustic channel.

Вступ. Одним із сучасних методів вимірювання витрати та кількості газу (в тому числі і природного) що протікає через трубопровід круглої форми є ультразвуковий метод. Завдяки своїм перевагам метод широко впроваджується у багатьох галузях промисловості, зокрема і в галузі транспортування та розподілу природного газу [6].

Перетворювачі витрати на базі ультразвукового методу в процесі роботи використовують різні способи поширення і обробки ультразвукового імпульсу і, внаслідок цього, мають різноманітні конструктивні виконання. Серед відомих на сьогодні ультразвукових перетворювачів витрати (УЗПВ) існують конструкції із діаметральними акустичними каналами встановленими під певним кутом до осі трубопроводу [1]. Незважаючи на це, всі УЗПВ в тій чи іншій мірі піддаються дії різноманітних факторів що впливають на їх метрологічні характеристики. Серед цих факторів виділяють два класи: внутрішні (в більшості залежать від самого УЗПВ) та зовнішні (які залежать від газового середовища) [3, 4]. Кожен з цих класів налічує багато факторів які в тій чи іншій інсталяції чи методі, що реалізується в УЗПВ, намагаються зменшити або зовсім ліквідувати.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дослідженням впливу різноманітних факторів на метрологічні характеристики УЗПВ присвячено багато наукових праць. Зокрема, щодо досліджень впливу спотвореного профілю швидкості потоку (як одного із факторів) на похибку УЗПВ, у роботі [5] наведені приклади програмних засобів «Kalibra» (розробник Ruhrgas AG, Німеччина) та «GARUSO» (Норвегія), за допомогою яких виконують прогнозування похибки УЗПВ при вимірюванні швидкості газових потоків із спотвореним внаслідок дії місцевих опорів профілем швидкості. Названі програми дозволяють сформулювати рекомендації щодо збільшення кількості та виду вимірювальних променів (діаметральні або хордові) для конкретного УЗПВ. Також, дослідження впливу цього фактора проводять в багатьох програмних засобах що реалізують методи обчислювальної гідродинаміки (CFD - Computational Fluid Dynamics), а саме програмні пакети ANSYS Fluent, SolidWork (FloWorks), Comsol Multiphysics, Flow Vision, Matlab (PDE Toolbox, FEMLAB) та інші.

Теоретичну базу цього напрямку заклали такі науковці як Achim Hilgenstock (спеціаліст Ruhrgas AG) та Thomas Huwener (University of Essen) – одні з розробників програмного засобу «Kalibra», Lawrence C. Lynnworth (провідний інженер Panametrics), Jeker Delsing, Joel Clancy, Mario Kupnik, Per Lunde, Kjell-Elvind Froya, Кремльовський П.П., Філатов В.І. [1, 5, 8, 9] та багато інших в роботах яких викладено фундаментальні засади ультразвукової витратометрії та принципи конструювання УЗПВ.

Для побудови УЗПВ розроблено та впроваджено ряд конструкцій, у яких поширення ультразвукових імпульсів відбувається в діагональних площинах (площина що завжди проходить через вісь трубопроводу). В свою чергу сам ультразвуковий імпульс випромінюється в газовий потік під певним кутом до осі вимірювального трубопроводу. Тому актуальним є завдання дослідження впливу спотворень кінематичної структури потоку на

результат вимірювання швидкості газового потоку за допомогою УЗПВ із діаметральним акустичним каналом встановленим під певним кутом до осі трубопроводу як показано на рис.1.

Мета роботи. Метою даної роботи є дослідити вплив спотворення профілю швидкості потоку на похибку УЗПВ та розробити рекомендації для удосконалення їх конструкції з метою зменшення додаткової похибки внаслідок спотворення профілю швидкості потоку.

Для досягнення цієї мети в роботі виконано такі завдання:

1. За допомогою CAD (Computer Aided Design) / CEA (Computer Aided Engineering) - програми SolidWorks та її додатку FloWorks виконане моделювання потоку газу через ділянку вимірювального трубопроводу з місцевим опором (МО) “90° коліно”, на якій встановлений УЗПВ із діаметральним акустичним каналом.

2. На основі отриманих за допомогою SolidWorks результатів моделювання, проведено дослідження зміни профілю швидкості потоку після МО “90° коліно” вздовж вимірювальної ділянки трубопроводу.

3. Визначено оптимальний кут акустичного каналу відносно площини в якій знаходиться 90° коліно, який забезпечує мінімальну похибку вимірювання швидкості потоку.

4. За результатами моделювання розроблено рекомендації щодо мінімізації впливу спотворення потоку на точність вимірювання швидкості за допомогою однопроменевого УЗПВ.

Виклад матеріалу. В практиці обліку природного газу та інших енергоносіїв застосовують [4, 10] УЗПВ із діаметральним акустичним каналом. Схематичне зображення конструкції таких УЗПВ наведено на рис.1.

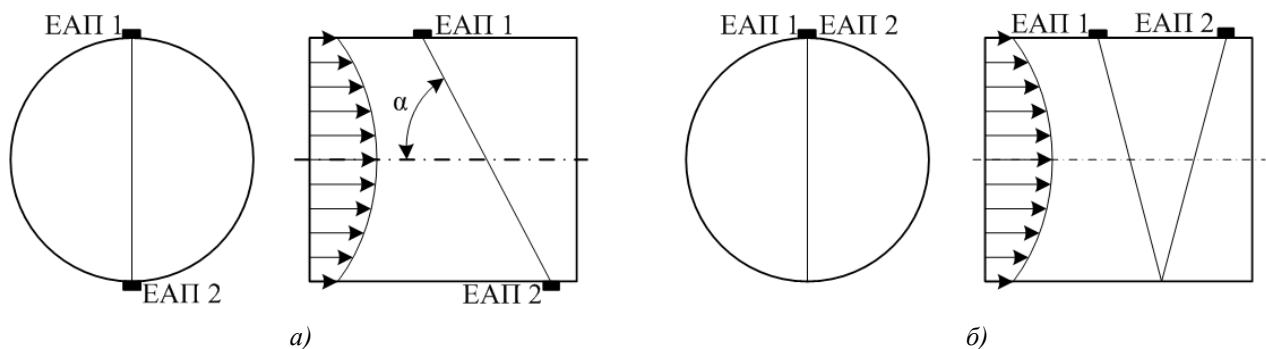


Рис.1. Спрощена схема УЗПВ із діаметральним акустичним каналом:

а) одноканальний УЗПВ без відбивання променя; б) одноканальний УЗПВ із відбиванням променя

Серед конструкцій УЗПВ із діаметральним акустичним каналом виділяють такі:

1. Одноканальні УЗПВ (рис.1, а) без відбивання акустичного променя які в своєму складі містять два електроакустичні перетворювачі (ЕАП) що поперемінно реалізують функцію випромінювання акустичного імпульсу та його приймання.

2. Одноканальні УЗПВ (рис.1, б) з відбиванням акустичного променя від стінки УЗПВ або трубопроводу (відбивання може бути як одиничне так і багаторазове).

3. Багатоканальні УЗПВ без відбивання акустичних променів.

4. Багатоканальні УЗПВ з відбиванням акустичних променів.

Для всіх цих конструкцій УЗПВ спотворення профілю швидкості потоку, які виникають після МО, в тій чи іншій мірі впливають на точність вимірювання швидкості потоку і, відповідно, витрати.

Прямим способом усунення спотворення профілю швидкості потоку перед витратоміром є збільшення довжини прямолінійної ділянки перед УЗПВ. Цей спосіб вимагає дослідження структури потоку після різних типів МО та визначення необхідних довжин прямолінійних ділянок. Інший спосіб полягає у застосуванні засобів підготовки потоку встановлених перед УЗПВ. Проте в реальних умовах не завжди є можливість цю відстань збільшити або встановити пристрій підготовки потоку. Тоді виникає завдання удосконалення конструкції УЗПВ для зменшення впливу спотворень потоку на результати вимірювання.

В цій роботі досліджено УЗПВ з одиничним діаметральним акустичним каналом який для вимірювання швидкості газового потоку реалізує ультразвуковий різницевий часоімпульсний метод [2] без відбивання акустичного імпульсу та наявністю двох ЕАП (рис.1., а). Серед існуючих на ринку УЗПВ ця конструкція реалізована у таких типах:

1. FLOWSIC 300R (виробник SICK MAIHAK) призначений для технологічного та комерційного обліку попутного нафтового, факельного, природного газів там, де точність, працездатність, довговічність і надійність має величезне значення.

2. FGM160 (виробник Fluenta AS) (Норвегія) спеціально розроблений для вимірювання витрати попутного нафтового газу, факельного газу і відхідних димових газів у великих газопроводах при значних коливаннях витрат і тисків.

3. PanaFlow конструкція «С» (виробник GE Panametrics) призначений для вимірювання витрати скраплених природних газів, стиснутих природних газів, паливних газів, газоподібних вуглеводнів.

Для моделювання процесу протікання газу у вимірювальному трубопроводі нами застосовано програмний пакет для обчислювальної гідродинаміки SolidWorks (FloWorks). Для проведення числового розв'язку задач, SolidWork застосовує метод кінцевих об'ємів і нестационарне рівняння Нав'є-Стокса усереднене по Рейнольдсу (прийняте скорочення RANS) і теплопередачі. Усереднення по Рейнольдсу рівнянь Нав'є-Стокса означає, що для моделювання використовуються усереднені по малому масштабу часу впливи турбулентності на параметри потоку, а великомасштабні часові зміни усереднених по малому масштабу часу складових газодинамічних параметрів потоку (тиску, швидкості, температури) враховуються введенням відповідних похідних по часу. Дискретизація рівнянь виконується в консервативній формі, часткові похідні апроксимуються за допомогою різницевих схем із похибкою, порядок якої рівний квадрату кроку дискретизації моделі, похідні по часу – по неявній схемі Ейлера першого порядку [7].

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 описують зміст вхідного та вихідного потоків. Поверхні “заглушок”, обмежують розрахункову сітку. Під час моделювання програмою встановлюється напрям потоку перпендикулярний до цих поверхонь.

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

Вигляд модельованої ділянки вимірювального трубопроводу та її основні конструктивні параметри показано на рис.2.

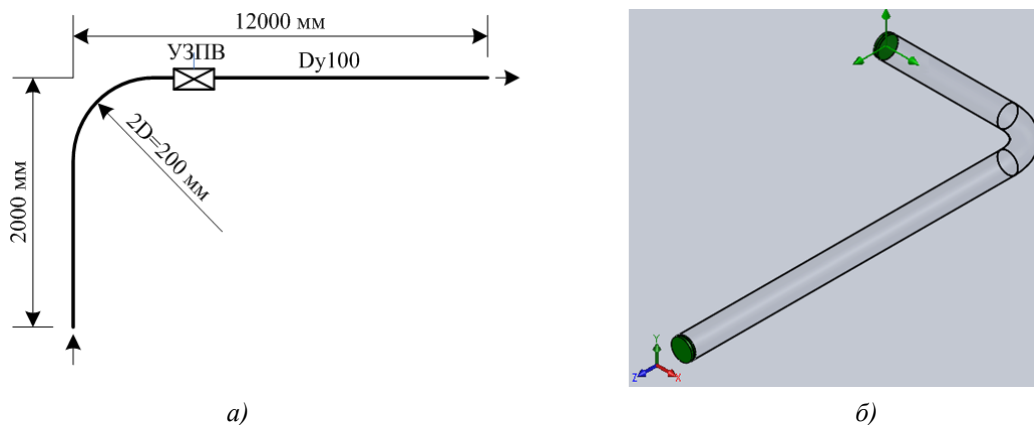


Рис.2. Ділянка вимірювального трубопроводу для моделювання спотворення структури потоку в програмі SolidWorks (FloWorks): а) розрахункова схема; б) вигляд твердотілої моделі

У зображеній моделі вимірювального трубопроводу УЗПВ розглядається як секція вимірювального трубопроводу довжиною L . По довжині цієї секції розглядаємо 7 перерізів, у кожному з яких моделюється розподіл швидкості по всьому перерізу. Початковий переріз відповідає входу в УЗПВ а сьомий переріз відповідає виходу з УЗПВ (див.рис.3). Кожен із сімох перерізів має своє розташування по відношенню до осі Z , це розташування характеризується числом або координатою на осі OZ . Різниця між координатою сьомого перерізу і першого складає довжину вимірювальної секції УЗПВ яка позначена на рис.3 літерою L . За результатами аналізу конструкції серійних УЗПВ прийнято для моделювання значення $L = 1,8D$.

Після завантаженням даних із сімох масивів, які містять значення швидкості в кожній точці перерізів, в програмному середовищі Matlab проводиться обчислення усередненої швидкості потоку, яку вимірює одиничний діаметральний акустичний промінь, що пронизує всі сім перерізів. Усереднена швидкість потоку по довжині променя УЗПВ розраховується на основі значень що знаходяться в кожному із семи перерізів. Значення усередненої по акустичному каналу УЗПВ швидкості потоку V , обчислені для різних відстаней секції УЗПВ від МО “90° коліно”, наведені у табл.1.

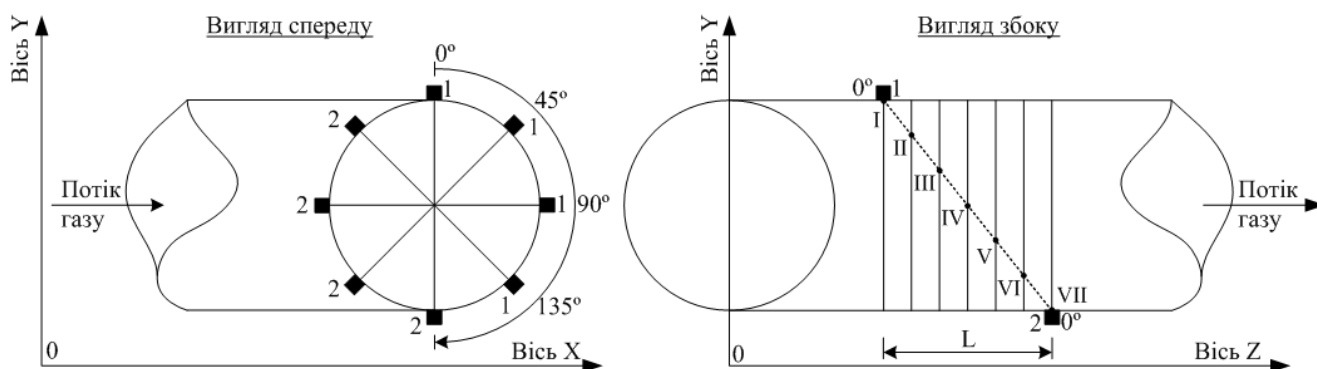


Рис.3. Схема розміщення ЕАП під час моделювання одноканального УЗПВ: 1, 2 – ЕАП; L – довжина вимірювальної секції УЗПВ; I, II, III, IV, V, VI, VII – номери перерізів для моделювання УЗПВ

Для кожного із отриманих значень швидкості V , обчислено абсолютну похибку вимірювання Δ

$$\Delta = V - V_{\text{стаб}} \quad (1)$$

де V - швидкість потоку усереднена по довжині променя УЗПВ;

$V_{\text{стаб}}$ - швидкість потоку усереднена по довжині променя такого ж просторового розміщення, що й у секції УЗПВ, розміщеного на відстані $110D$ після МО “90° коліно”, тобто на відстані достатній для відновлення структури потоку.

Відносну похибку вимірюваної швидкості потоку δ обчислено як відношення абсолютної похибки до значення усередненої швидкості стабілізованого потоку

$$\delta = (V - V_{\text{стаб}}) / V_{\text{стаб}} * 100 \quad (2)$$

На практиці, монтаж пари ЕАП (1 та 2 на рис.3) однопроменевого діаметрального УЗПВ може відбуватися під будь-яким кутом до площини встановлення МО “90° коліно”. При цьому слід монтувати пару ЕАП таким чином, щоб акустичний промінь був розміщений у діаметральній площині. В цій статті розглянуто чотири варіанти діаметрального розміщення пари ЕАП, які показані на рис.3 (кут акустичного каналу відносно осі OY рівний 0, 45, 90 та 135°).

Для досліджуваної ділянки вимірювального трубопроводу (див. рис.2) виконано моделювання в програмному комплексі SolidWorks для таких значень параметрів потоку: масова витрата на вході $Q_m = 0,3$ кг/с, статичний тиск на виході $P_{\text{стат}} = 101325$ Па, температура газу $T_{\text{газ}} = 293,2$ К, газ – метан.

Значення усередненої швидкості потоку V , абсолютної Δ та відносної δ похибок вимірювання швидкості потоку, обчислені для вказаних вище параметрів потоку та для чотирьох значень кута акустичного каналу, наведені у табл.1.

Таблиця 1.

**Результати моделювання усередненої вздовж акустичного променя швидкості потоку для
одноканального УЗПВ**

| кут | L, м | 5D | 10D | 15D | 20D | 30D | 40D | 50D | 60D | 100D |
|-----|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0 | V, м/с | 39,8250 | 39,9315 | 40,6511 | 40,6927 | 41,3407 | 41,4641 | 41,7493 | 42,1341 | 43,3016 |
| | Δ , м/с | -3,4781 | -3,3716 | -2,6520 | -2,6104 | -1,9624 | -1,8390 | -1,5538 | -1,1690 | -0,0015 |
| | δ , % | -8,0321 | -7,7861 | -6,1244 | -6,0283 | -4,5319 | -4,2469 | -3,5883 | -2,6997 | -0,0036 |
| 45 | V, м/с | 41,3463 | 42,7938 | 42,0941 | 43,1684 | 43,4778 | 43,0156 | 43,1493 | 43,2802 | 43,2800 |
| | Δ , м/с | -2,0527 | -0,6052 | -1,3049 | -0,2306 | 0,0788 | -0,3834 | -0,2497 | -0,1188 | -0,1190 |
| | δ , % | -4,7298 | -1,3945 | -3,0067 | -0,5313 | 0,1815 | -0,8834 | -0,5753 | -0,2737 | -0,2741 |
| 90 | V, м/с | 40,6172 | 41,4736 | 41,8395 | 41,3210 | 41,7679 | 42,0212 | 42,4927 | 42,8882 | 43,1241 |
| | Δ , м/с | -2,6851 | -1,8287 | -1,4628 | -1,9813 | -1,5344 | -1,2811 | -0,8096 | -0,4141 | -0,1782 |
| | δ , % | -6,2008 | -4,2231 | -3,3781 | -4,5755 | -3,5434 | -2,9585 | -1,8696 | -0,9563 | -0,4115 |
| 135 | V, м/с | 41,4286 | 43,5459 | 42,1621 | 44,0415 | 43,7583 | 43,2479 | 43,2519 | 43,2672 | 43,2895 |
| | Δ , м/с | -1,8736 | 0,2437 | -1,1401 | 0,7393 | 0,4560 | -0,0542 | -0,0503 | -0,0349 | -0,0127 |
| | δ , % | -4,3268 | 0,5627 | -2,6328 | 1,7073 | 1,0532 | -0,1253 | -0,1161 | -0,0808 | -0,0293 |

Внаслідок роботи сил тертя тиск газового потоку вздовж вимірювального трубопроводу зменшується. Згідно із законом збереження маси інші параметри газового потоку (густина, швидкість) також змінюються вздовж вимірювального трубопроводу. Тому аналіз зміни швидкості потоку у різних перерізах по довжині вимірювального трубопроводу необхідно виконувати із врахуванням зміни швидкості, зумовленої втратами тиску по довжині вимірювального трубопроводу. Для того, щоб оцінити зміну швидкості по довжині вимірювального трубопроводу нами виконане моделювання турбулентного потоку ($Re = 3,37 \cdot 10^5$), сформованого за умови вказаних вище параметрів у прямолинійній ділянці вимірювального трубопроводу, у якій протікає стабілізований потік із рівномірним розподілом швидкості по перерізу. Моделювання виконане для умов гладкої стінки трубопроводу (Roughness = 0 мкм). Для таких умов зміна швидкості потоку та тиску газу по довжині вимірювального трубопроводу є незначними: зміна тиску 0,029 % на 10D, зміна швидкості – 0,01 % на 10D. Враховуючи, що відносне відхилення швидкості потоку у досліджуваних перерізах має порядок цілих відсотків (див.табл.1), такі малі зміни швидкості внаслідок падіння тиску по довжині вимірювального трубопроводу суттєво не впливають на результати досліджень. Тобто, аналіз довжини ділянки стабілізації потоку, чи аналіз похибки вимірювання швидкості в залежності від кута встановлення акустичного шляху можна виконувати прямим порівнянням швидкості потоку у перерізах вздовж вимірювального трубопроводу.

Аналіз похибки вимірювання швидкості потоку доцільно виконати для розміщення УЗПВ на ділянці вимірювального трубопроводу від 5D до 100D після МО “90° коліно”, оскільки саме на цій ділянці встановлюють переважну більшість витратомірів. Як видно із табл.1 та рис.4, при розташуванні МО “90° коліно” перед УЗПВ в горизонтальній площині, найменше відхилення вимірюваного значення швидкості потоку δ від швидкості неспотвореного потоку досягається на вказаній ділянці вимірювального трубопроводу за умови розміщення акустичного каналу під кутом 45 та 135°.

Для розміщення акустичного каналу під кутом 45° або 135° близькими є і результати вимірювання швидкості потоку і характер зміни відносного відхилення δ за довжиною ділянки. Тому похибка однопроменевих УЗПВ із діаметральними акустичними каналами під кутом 45° або 135° є менш залежною від площини встановлення МО “90° коліно”. Отже метрологічні характеристики такого УЗПВ, отримані під час його калібрування на витратовимірювальній установці будуть менше спотворені під час інсталяції після МО “90° коліно”. Тому рекомендується для однопроменевих УЗПВ із діаметральними променями встановлювати акустичні канали під кутом 45° або 135°. Таке розташування дозволяє забезпечити похибку вимірювання швидкості потоку що не перевищує 1 % для ділянки встановлення УЗПВ від 30D до 100D після МО “90° коліно”.

Із рис.4. видно, що для повністю стабілізованого потоку результат вимірювання швидкості потоку не залежить від кута встановлення акустичного каналу. Зокрема для відстані від МО “90° коліно” більшої 90D, де потік стабілізований, що підтверджено аналізом профілю швидкості в перерізах на ділянці від 90D до 100D,

відхилення між результатами вимірювання за допомогою акустичних каналів розміщених під різними кутами не перевищують 0,5%.

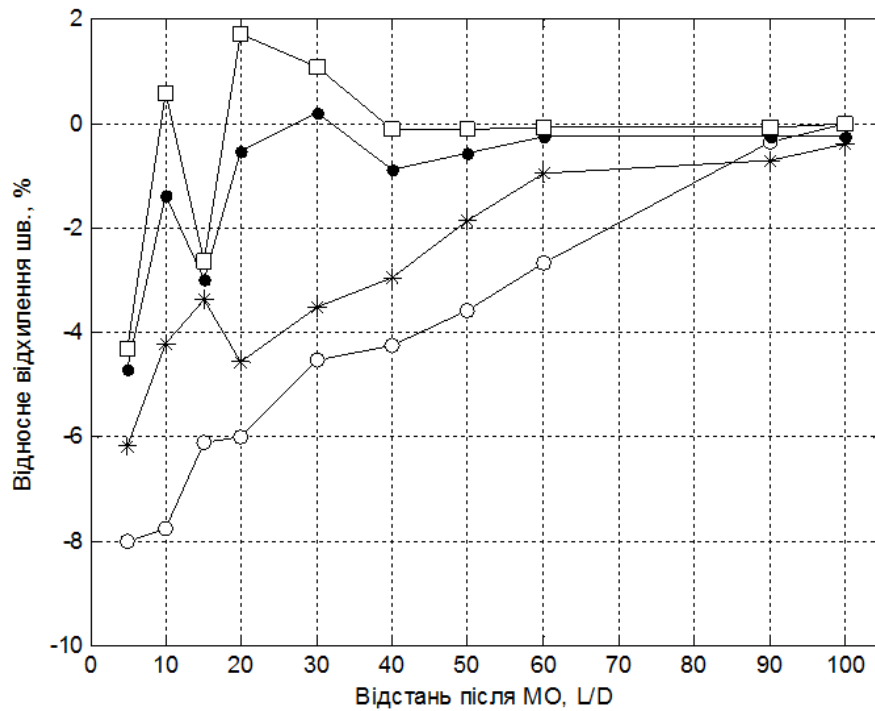
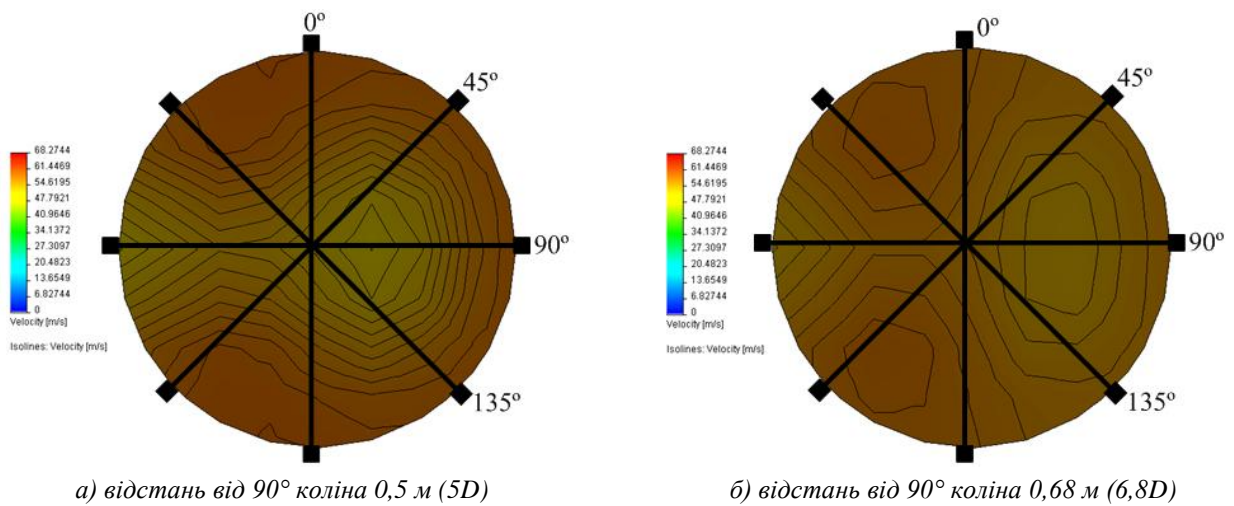


Рис.4. Залежність відносного відхилення швидкості потоку від кута встановлення та відстані після МО “90° коліно”: • - кут 45°, □ – кут 135°, ○ – кут 0°, * - кут 90°



а) відстань від 90° коліна 0,5 м (5D)

б) відстань від 90° коліна 0,68 м (6,8D)

Рис.5. Зображення структури потоку у вхідному та вихідному перерізах витратоміра та діаметральних акустичних променів УЗПВ з різним кутом встановлення ЕАП

На рис.5 представлено зміну профілю швидкості (ізоліній) по довжині УЗПВ. Множина значень швидкості у кожному перерізі представлена методом градієнтної зміни кольору заповнення. Із рис.5 видно, що форма спотворення профілю швидкості істотно залежить від площини розміщення МО “90° коліно” та відстані від нього до УЗПВ. За умов розглянутої орієнтації МО “90° коліно” ультразвуковий промінь розміщений під кутом 90° проходить через область профілю, найбільше спотворену внаслідок зміни швидкості та напрямку потоку при протіканні через МО “90° коліно”. Тобто результати визначення швидкості за цим променем мають найбільші

відхилення від швидкості стабілізованого потоку (див.табл.1). Однак після МО іншого типу можуть виникати спотворення профілю у іншому секторі або сегменті перерізу [5]. Тобто в загальному випадку немає гарантії, що один промінь розташований під будь-яким кутом врахує спотворення профілю швидкості, а отже однопроменеві УЗВ не забезпечують надійних та точних вимірювань в умовах спотворень профілю швидкості.

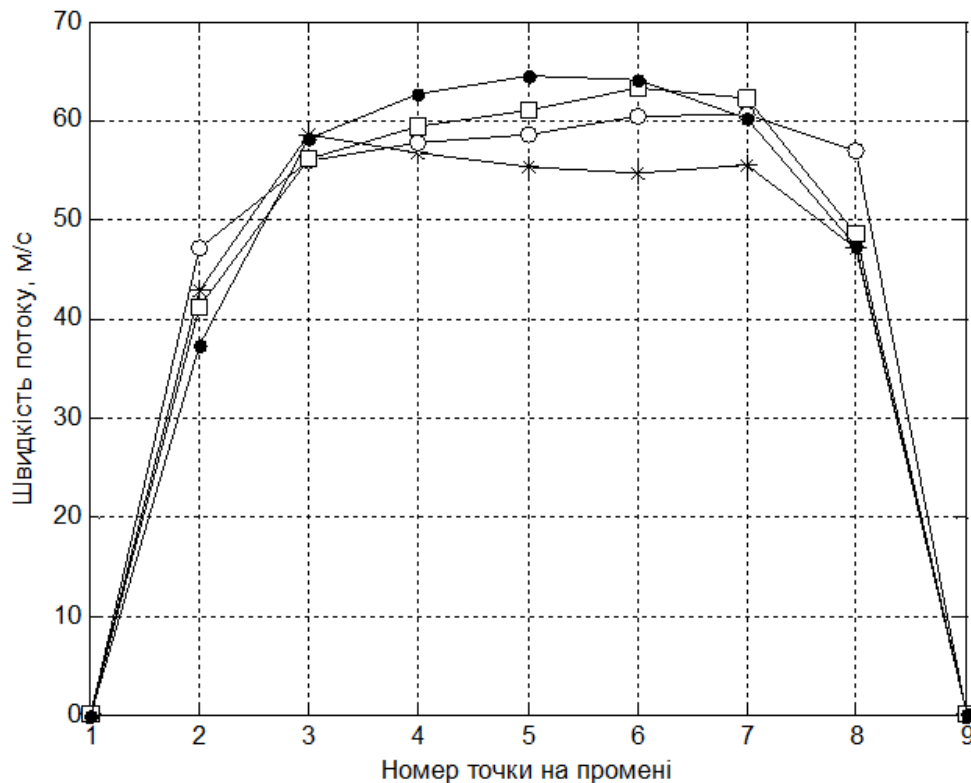


Рис.6. Вигляд епюри швидкості потоку при встановленні однопроменевого УЗПВ на різних відстанях після МО “90° коліно” із кутом встановлення ЕАП рівним 135°: ● 100D; □ 50D; ○ 20D; * 5D

Дослідимо як змінюється епюра швидкості вздовж акустичного шляху, встановленого під кутом 135°, в залежності від довжини відстані між місцевим опором та УЗПВ. Результати моделювання епюри швидкості показані на рис.6.

Як видно із рис.6, крива епюри швидкості позначена символом “●” має ідеальну форму перетину параболоїда обертання (парабола Пуазейля). Ця епюра відповідає сформованому (неспотвореному) потоку після МО “90° коліно” на відстані 100D (10 м). За умови встановлення УЗПВ на невеликій відстані після 90° коліна (□ - відстань 50D; ○ - відстань 20D; * - відстань 5D), епюра швидкості є деформованою і в кожному перерізі змінюється наближаючи свій вигляд до неспотвореного при збільшенні відстані від цього МО. Важливим є знаходження такої відстані, коли при оптимальному куті встановлення акустичного каналу (45, 135°) епюра потоку вздовж акустичного шляху вимірювального променя буде наближена до неспотвореної епюри потоку на достатній для цього відстані від МО “90° коліно”. В таких умовах вплив спотворень потоку після МО “90° коліно” на точність вимірювання швидкості потоку є незначним.

Висновки. В результаті проведеної роботи можна виокремити наступні результати та рекомендації:

1. Форма спотворення профілю швидкості після МО “90° коліно” істотно залежить від площини розміщення цього місцевого опору, що вимагає особливої уваги при встановленні УЗПВ із одним діаметральним акустичним променем.

2. Похибка однопроменевих діаметральних УЗПВ із розміщенням акустичного каналу під кутом 45° або 135° є менш залежною від площини встановлення МО “90° коліно” (вертикальна чи горизонтальна) у порівнянні із кутами встановлення 0° та 90°. Отже метрологічні характеристики такого перетворювача, отримані під час його

калібрування на витратовимірювальній установці будуть менше спотворені під час інсталяції після МО “90° коліно”.

3. За умови застосування УЗПВ у вимірювальний трубопровід не вводять ніяких конструктивних елементів витратоміра, які б змінювали структуру потоку, тому спотворення структури потоку, спричинені місцевими опорами (зокрема МО “90° коліно”), усуваються на значних відстанях після МО, а отже однопроменеві УЗВ, встановлені без струменевипрямлячів чи пристроїв підготовки потоку вимагають особливо значних довжин прямолінійних ділянок.

4. Для одноканальних УЗПВ рекомендується встановлювати струменевипрямлячі або пристрої підготовки потоку для зменшення похибки вимірювання швидкості потоку та зменшення необхідних довжин прямолінійних ділянок перед УЗПВ.

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. 2. Роман В.І. Аналіз ультразвукових методів та засобів вимірювання витрати газових потоків // Вісник інженерної академії України. Випуск 3-4. - Київ. - 2012. - С. 270-276. 3. Покрас С.И., Покрас А.И., Гришанова И.А. Ультразвуковая расходометрия: как и зачем повышают точность измерений // Сборник трудов 23-й конференции «Коммерческий учет энергоносителей». - №5. - 2006. 4. Стандарт организации. Расход и количество природного газа. Методика выполнения измерений с помощью ультразвуковых преобразователей расхода // СТО ГАЗПРОМ 5.2-2005, ООО «Информационно-рекламный центр газовой промышленности», М.: 2005. 5. Lunde P. GERG Project on Ultrasonic Gas Flow Meters, Phase II // P. Lunde, K.E. Froya, M. Vestheim, 2000. 6. Крук І.С., Болховітін М.І. Сучасні методи вимірювання витрати природного газу // Науково-виробничий журнал «Трубопровідний транспорт»: ДК «Укртрансгаз». – Київ. – №6 (72). - 2011. С. 12-15. 7. SolidWorks. Компьютерное моделирование в современной практике // Алямовский А.А., Собачкин А.А., Одинцов Е.В. и др. - СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 8. Filatov V.I. Analysys of an ultrasonic method of measuring the flow rate materials // Measurement Techniques, Vol.43, No.1, 2000. 9. M. Kupnik, A. Schroder, P. O’Leary, E. Benes, and M. Gruschl An ultrasonic transit-time gas flowmeter for automotive applications // in Proc. IEEE Sens. Conf., 2004, pp. 451–454. 10. ISO 17089-1:2010 Measurement of fluid flow in closed conduits - Ultrasonic meters for gas. Part 1: Meters for custody transfer and allocation measurement.