

УДК 681.121.89.082.4

Ф.Д. Матіко, доктор технічних наук, доцент

В.І. Роман, кандидат технічних наук

Національний університет «Львівська політехніка»

ВПЛИВ ПРОСТОРОВОГО РОЗТАШУВАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВИТРАТОМІРА НА ТОЧНІСТЬ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ СПОТВОРЕНИХ ПОТОКІВ

Матіко Ф.Д., Роман В.І. Вплив просторового розташування ультразвукового витратоміра на точність вимірювання витрати спотворених потоків. В статті на базі аналітико-емпіричних функцій швидкості спотворених потоків Salami розроблена узагальнена методика дослідження додаткової похибки вимірювання витрати ультразвукових витратомірів з різними типами схем розташування акустичних каналів. Встановлено, що просторове розташування ультразвукового витратоміра відносно горизонтальної площини може спричинити перевищення нормативних допустимих меж додаткової похибки вимірювання витрати зумовленої спотворенням структури потоку навіть для витратомірів із великою кількістю акустичних каналів.

Ключові слова: ультразвуковий витратомір, додаткова похибка, структура потоку, профіль швидкості, функція Salami, акустичний канал.

Матіко Ф.Д., Роман В.І. Влияние пространственного расположения ультразвукового расходомера на точность измерения расхода искаженных потоков. В статье на базе аналитико-эмпирических функций скорости искаженных потоков Salami разработана обобщенная методика исследования дополнительной погрешности измерения расхода ультразвуковых расходомеров с различными типами схем расположения акустических каналов. Установлено, что пространственное расположение ультразвукового расходомера относительно горизонтальной плоскости может вызвать превышение нормативных допустимых пределов дополнительной погрешности измерения расхода обусловленной искажением структуры потока даже для расходомеров с большим количеством акустических каналов.

Ключевые слова: ультразвуковой расходомер, дополнительная погрешность, структура потока, профиль скорости, функция Salami, акустический канал.

Matiko F.D., Roman V.I. The influence of the spatial arrangement of the ultrasonic flowmeter on the accuracy of the measurement of the distorted flow. In the article, based on the Salami analytic-empirical functions of the velocity of distorted flows, developed a generalized methodology for studying the additional error of measuring the flow rate of ultrasonic flowmeters with different types of layouts of acoustic paths. It has been established that the spatial arrangement of the ultrasonic flowmeter relative to the horizontal plane may lead to an excess of the standard allowable limits of the additional error of measuring the flow rate due to distortion of the flow structure even for flowmeters with a large number of acoustic paths.

Key words: ultrasonic flowmeter, additional error, flow structure, velocity profile, Salami function, acoustic path.

Постановка наукової проблеми. Активне впровадження ультразвукових витратомірів (УЗВ) для задач комерційного обліку плинних енергоносіїв (зокрема природний газ), викликане рядом їх переваг: відсутність впливу на структуру потоку; відсутність рухомих частин що швидко зношуються в процесі роботи; незначні втрати тиску; широкий діапазон вимірювання витрати; можливістю застосування для вимірювальних трубопроводів (ВТ) будь-яких діаметрів; можливістю вимірювання двонаправлених потоків; можливість визначення додаткових параметрів потоку (густина, швидкості звуку, теплотворної здатності) [1].

Проте, як і традиційні засоби вимірювання витрати плинних енергоносіїв (турбінні та роторні лічильники; методи із застосуванням пристроїв звуження потоку) так і УЗВ в значній мірі чутливі до зміни умов в яких вони калібровані (тиск, витрата, структура потоку). Головним фактором зменшення точності вимірювання витрати який може виникнути під час експлуатації УЗВ є спотворення структури потоку викликаного наявністю перед витратомірами місцевих опорів (МО). Згідно [1] дослідження і розробка заходів щодо усунення впливу цього фактора на точність вимірювання витрати УЗВ є одною із найважливішою наукових задач ультразвукової витратометрії.

Аналіз досліджень. Згідно огляду науково-технічної та нормативної літератури по ультразвуковій витратометрії [1] усунення спотворень структури потоку перед УЗВ здійснюють двома шляхами: встановленням прямолінійних ділянок ВТ достатньої довжини (для природнього вирівнювання структури потоку), або застосуванням спеціальних пристроїв для кондиціонування потоку перед УЗВ (для примусового вирівнювання структури потоку). Обидва названі підходи мають недоліки: встановлення прямолінійних ділянок ВТ достатньої довжини не завжди можливе, а також має високу вартість реалізації; застосування кондиціонерів потоку призводить до збільшення втрат тиску. Слід відмітити, що встановлення кондиціонера потоку не знімає повністю питання вибору довжини прямолінійних ділянок ВТ, оскільки для УЗВ із встановленим кондиціонером також необхідно витримати певну мінімальну їх довжину. Отже актуальними залишаються пошук інших підходів які б забезпечували високу точність вимірювання витрати

спотворених потоків плинних енергоносіїв без суттєвих змін в конфігурації ВТ та конструкції УЗВ.

В даній роботі пропонується вирішувати окреслені питання математичним шляхом. В якості моделей спотвореного потоку рекомендується застосовувати емпіричні функції швидкості професора L.A. Salami [2]. Застосування функцій Salami для вирішення задач ультразвукової витратометрії розглянуто в багатьох закордонних [3-6] та вітчизняних [7-10] наукових працях.

В [7] авторами цієї статті з використанням математичного апарату функцій Salami досліджено як один із способів усунення впливу спотворень структури потоку на точність вимірювання витрати УЗВ збільшення кількості їх акустичних каналів (АК); поточна стаття є логічним продовженням цих досліджень. Тому в цій роботі авторами **поставлено за мету** дослідити вплив зміни просторової орієнтації УЗВ (по відношенню до МО) на похибку вимірювання витрати в умовах спотворень структури потоку.

Виклад основного матеріалу. Як відомо, потік плинного середовища через виробничі ВТ циліндричної форми має спотворену структуру потоку. Причиною такої ситуації є те, що ВТ мають в своєму складі (вмонтовані в трубопровід) різноманітне регулююче обладнання, запірну арматуру, МО різного типу (коліна, група колін, трійники, дифузори, конфузори), фільтри і так далі, які служать джерелами спотворень профілю швидкості потоку (його структури) [1, 2].

Для дослідження потоків із спотвореною структурою професором L.A. Salami в результаті обробки численних експериментальних даних [2], було створено 23 профілі швидкості спотвореного потоку. Серед них Р4, Р8, Р11, Р12, Р13, Р14 дуже схожі на профілі швидкості потоку після МО типу «коліно» та його модифікацій; Р6, Р9, Р17 та Р19 нагадують профіль швидкості, який утворюється після струминовипрямляча у формі сітки. Багатоядерні профілі такі як Р5, Р10, Р16, Р20, Р21, Р22 і Р23 були знайдені для імітації складних профілів швидкості після циркуляційних теплообмінників, які часто зустрічаються на ВТ [2].

В роботі [7] авторами розроблено методику дослідження додаткової похибки вимірювання витрати багатоканальних хордових УЗВ зумовленої спотворенням структури потоку. Оскільки в цій роботі буде досліджено й інші типи УЗВ (із діаметральними та комбінованими схемами розташування АК), виконаємо узагальнення цієї методики. Етапи узагальненої методики досліджень:

1. Визначення геометричних характеристик УЗВ (тип схеми розташування АК; кількість АК та координати їх просторового розташування).

В роботі досліджено три типи схем розташування АК: діаметральні (див.рис.1,а); хордові 2, 3 та 4 каналні (неефективність дослідження хордових УЗВ із кількістю АК більше за 4 описана авторами в [7]) (див.рис.1,б); Δ-схема (див.рис.1,в).

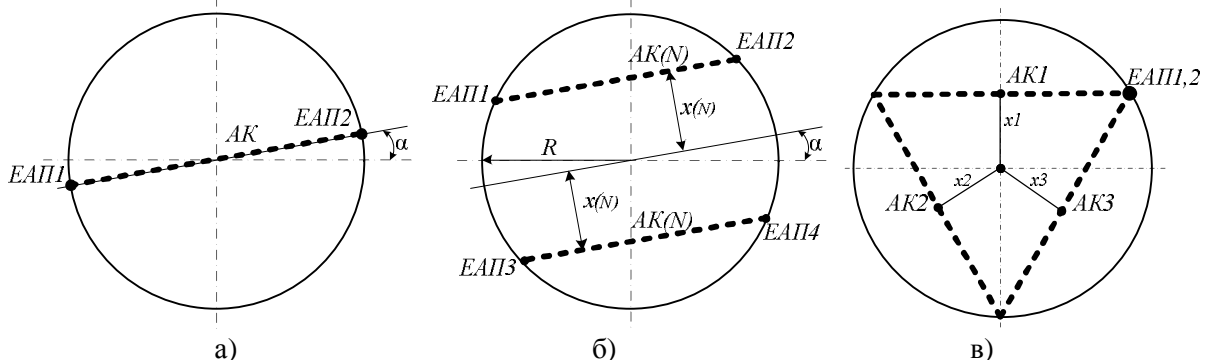


Рис.1. Схеми розташування АК УЗВ: а) діаметральна; б) хордова; в) Δ-схема;
 N – кількість АК; α – кут нахилу УЗВ відносно горизонтальної площини; R – радіус ВТ;
 ЕАП – електроакустичний перетворювач; x – координата розташування АК УЗВ

Координати розташування хордових АК УЗВ (рис.1,б) вибрано згідно класичного числового методу інтегрування Гауса-Якобі [5]:

$$x(N=2)=[0,5000 \quad -0,5000]*R;$$

$$x(N=3)=[0,7071 \quad 0 \quad -0,7071]*R;$$

$$x(N=4)=[0,8090 \quad 0,3090 \quad -0,3090 \quad -0,8090]*R;$$

Координати розташування АК Δ-схеми рівні $x_{1,2,3} = 0,5*R$. Початковий кут інсталяції такого УЗВ вибраний так, що кути нахилу АК Δ-схеми відносно горизонтальної площини рівні:

$$\alpha(AK1) = 0^\circ;$$

$$\alpha(\text{AK2}) = 135^\circ;$$

$$\alpha(\text{AK3}) = 225^\circ.$$

2. Розрахунок еталонних значень нормованої об'ємної витрати потоку на базі функцій Salami згідно формули [2, 6]:

$$q_{\text{SAL}} = \int_0^{2\pi} \left(\int_0^1 r \cdot v_{\text{SAL}}(r, \theta) dr \right) d\theta. \quad (1)$$

де: v_{SAL} – функція Salami; r, θ – радіальна та кутова координата точки функції швидкості Salami [2].

В даній роботі використано функцію Salami P13 аналітичний запис якої має наступний вигляд [4]:

$$v_{\text{SAL}} = (1-r)^{\frac{1}{7}} - \frac{e^{0,1\pi}}{2} r(1-r)^{\frac{1}{9}} e^{-0,2\theta} \sin \theta. \quad (2)$$

Використовуючи формули (1) та (2) знайдено еталонне значення нормованої об'ємної витрати потоку на базі функцій Salami P13: $q_{\text{SAL}}(\text{P13}) = 2,4366$. Графічне представлення функцій Salami P13 наведено на рис.2.

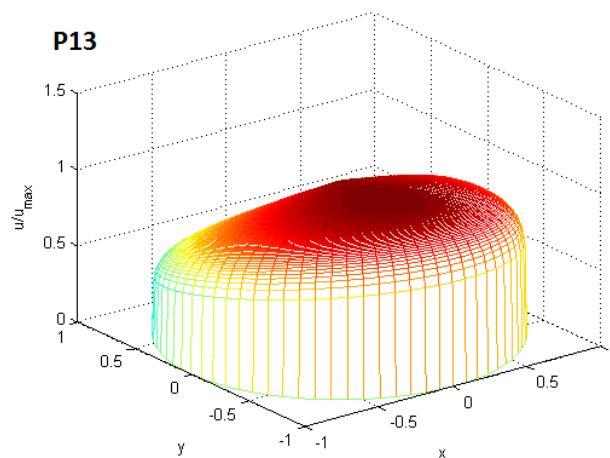


Рис.2. 3D профіль функції Salami P13

3. Розрахунок значення об'ємної витрати УЗВ на базі функцій Salami виконується в залежності від типу схеми розташування АК.

3.1. Для діаметральних УЗВ згідно формули [1]:

$$q_{v.\text{УЗВ}} = \pi R^2 \cdot v_{\text{AP}}. \quad (3)$$

3.2. Для хордових УЗВ згідно формули [1]:

$$q_{v.\text{УЗВ}} = \pi R^2 \cdot \frac{\sum_{i=1}^N v_{\text{AP}}(i)}{N}. \quad (4)$$

3.3. Для УЗВ із Δ -схемою згідно формули [1]:

$$q_{v.\text{УЗВ}} = \pi R^2 \cdot \frac{\sum_{i=1}^N v_{\text{AP}}(i)}{3}. \quad (5)$$

Значення швидкості потоку v_{AP} в (3)-(5) розраховуємо за узагальненою формулою [7, 8]:

$$v_{\text{AK}} = \sum_{i=1}^N \left[\frac{1}{T(i)} \left(\int_0^{\sqrt{R^2-x(i)^2}} v_{\text{SAL}} \left(\sqrt{x(i)^2 + L^2}, \alpha + \arctg \frac{L}{x(i)} \right) dL + \int_0^{\sqrt{R^2-x(i)^2}} v_{\text{SAL}} \left(\sqrt{x(i)^2 + L^2}, \alpha - \arctg \frac{L}{x(i)} \right) dL \right) \right], \quad (6)$$

де: L – довжина АК УЗВ [7]; T – ширина площини в якій лежить i -тий АК УЗВ [7].

4. Усунення гідродинамічної похибки УЗВ.

Одним із способів усунення гідродинамічної похибки УЗВ [1] є введення в рівняння витрати відповідного коефіцієнта наближення вимірної швидкості потоку до теоретично бажаної (еталонної). Формула для розрахунку такого коефіцієнта має вигляд:

$$k = \frac{q_{v.УЗВ}}{q_{v.et}}, \quad (7)$$

де: $q_{v.et}$ – значення витрати розраховане для аналітичної формули неспотвореного потоку. В теорії гідродинаміки [2] така формула зветься законом розподілу. Найбільш розповсюдженим законом розподілу швидкості турбулентного потоку є степеневий закон розподілу швидкості.

Зважаючи на те, що функція Salami включає в себе як неспотворений компонент цей самий степеневий закон розподілу, пропонуємо визначати коефіцієнт k за наступною формулою:

$$k = \frac{q_{v.УЗВ}}{2\pi \cdot \int_0^1 r \cdot (1-r)^n dr}, \quad (8)$$

де: n – показник степеня степеневого закону розподілу швидкості потоку.

Як видно із (2) для функції Salami P13 $n=7$. Для діаметральних УЗВ коефіцієнт k буде зватись коректувальним і позначатиметься k_v . Для хордових УЗВ та УЗВ із Δ -схемою коефіцієнт k зватиметься калібрувальним і позначатиметься k_{cal} . Використовуючи всі вище описані формули визначено наступні значення коефіцієнтів:

$$k_v(N=1) = 0,9333.$$

$$k_{cal}(N=2) = 0,9928;$$

$$k_{cal}(N=3) = 0,9942;$$

$$k_{cal}(N=4) = 0,9988.$$

$$k_{cal}(\Delta) = 0,9928.$$

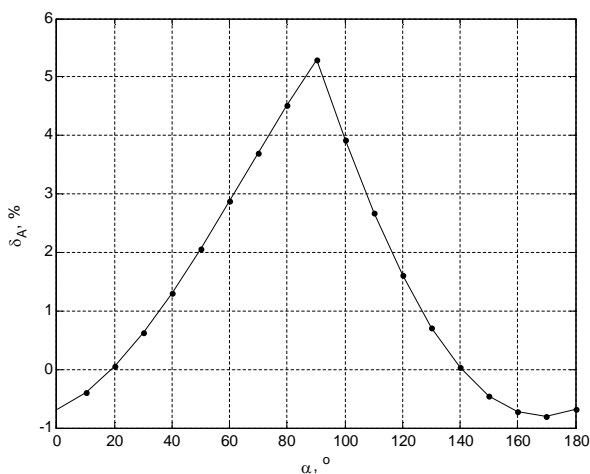
5. Обчислення додаткової похибки зумовленої спотворенням структури потоку у формі функцій Salami (δ_A) виконується за формулою:

$$\delta_A = \frac{k \cdot q_{v.УЗВ} - q_{v.et}}{q_{v.et}} \cdot 100 \quad (9)$$

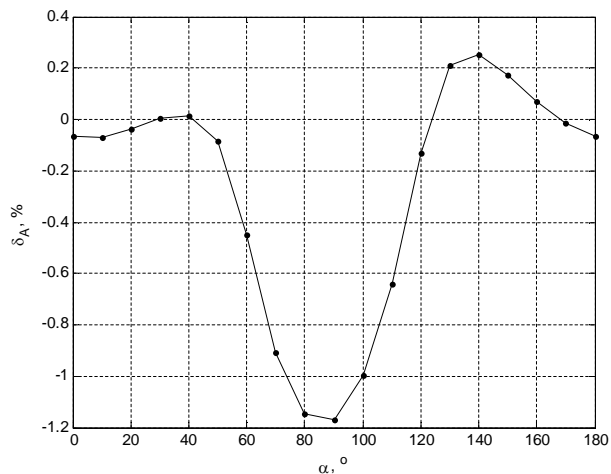
За умову визначення оптимального кута встановлення УЗВ по відношенню до горизонтальної площини (до спотворення структури потоку) прийнято вимоги ISO 17089-1 [1, пп.5.9.3.2] про те, що максимальна додаткова похибка зумовлена спотворенням структури потоку не повинна перевищувати значення 0,3 %:

$$|\delta_{A(\alpha)}^{\max} - \delta_{A(\alpha+1)}^{\max}| < 0,3\% \dots \quad (10)$$

На рис.3 представлено результати дослідження похибки δ_A за розробленою методикою в діапазоні значень кута $\alpha = 0 \dots 180^\circ$.



а) УЗВ (N=1)



б) УЗВ (N=2)

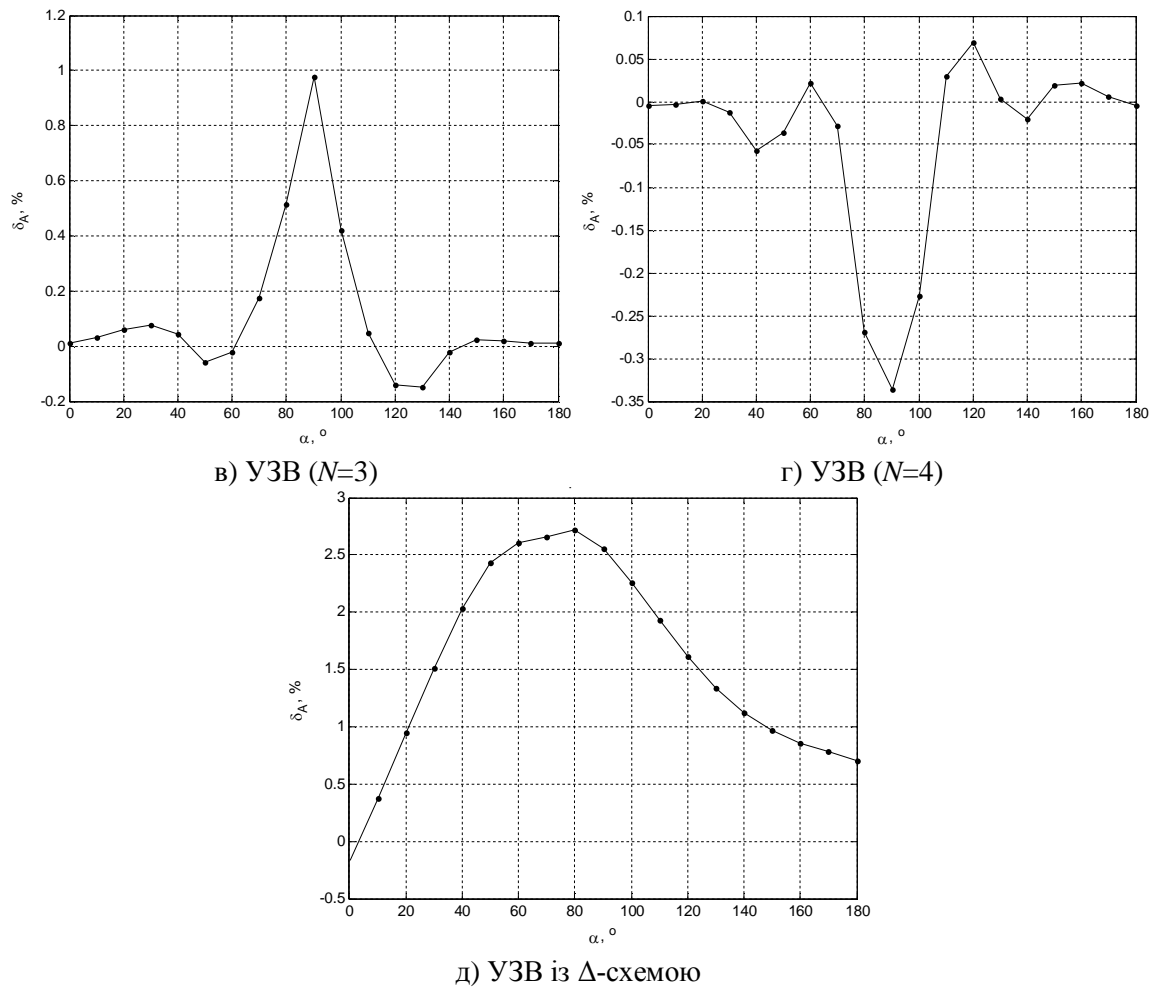


Рис.3. Результати дослідження δ_A для різних типів УЗВ на функції P13

Висновки. Аналізуючи наведені на рис.3 дані, можна стверджувати, що додаткова похибка вимірювання витрати УЗВ зумовлена спотворенням структури потоку залежить не тільки від кількості АК та способу їх розташування, а й від кута повороту витратоміра відносно горизонтальної площини. Так, в одному випадку, підбір кута повороту УЗВ (рис.3,а) відносно горизонтальної площини ($\alpha = 10... 20^\circ$ або $\alpha = 140... 150^\circ$) дозволив зменшити похибку δ_A (на моделі P13) до задовільного рівня в $\pm 0,3\%$. Проте перевищення цих діапазонів значень кута α навпаки спричиняє різке збільшення похибки δ_A в кілька разів; цей ефект зустрічається навіть в багатоканальних УЗВ, і у всіх розглянутих випадках (рис.3) призводить до виходу значення похибки δ_A за нормовані межі в $\pm 0,3\%$.

В результаті можна стверджувати, що подібні дослідження є вкрай важливими на етапі проектування конфігурації ВТ в тих випадках, коли відстань між джерелом спотворення і УЗВ є досить малою. В цьому випадку аналіз просторове розташування УЗВ на базі функцій Salami може в значній мірі сприяти усуненню додаткової похибки вимірювання витрати δ_A .

1. International Organization for Standardization. (2010). ISO 17089-1: Measurement of fluid flow in closed conduits - Ultrasonic meters for gas. Part 1: Meters for custody transfer and allocation measurement. Geneva, Switzerland: ISO.
2. Salami, L.A. (1984). Application of a computer to asymmetric flow measurement in circular pipes. Trans. Inst. Meas. Control, 6, 197-206.
3. Zanker, K.J. (1999, 25-28 October). The effects of Reynolds number, wall roughness, and profile asymmetry on single- and multi-path ultrasonic meters. Paper presented at the Proceedings of XVII International North Sea Flow Measurement Workshop, Oslo, Norway, 117-129.
4. Moore, P.L., Brown, G.J., and Stimpson, B.P. (2000). Ultrasonic transit-time flowmeters modelled with theoretical velocity profiles: methodology. Meas. Sci. Technol., 11, 1802-1811.
5. 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 VI International Conference on IGHEM, Portland Oregon, USA.
6. Duffell, C.J., Brown, G.J., Barton, N.A., and Stimpson, B.P. (2003, 25-28 March). Using optimization algorithms and CFD to improve performance of ultrasonic flowmeters. Paper presented at the Proceedings of II International South East Asia Hydrocarbon Flow Measurement Workshop, Kuala Lumpur, Malaysia.

7. Матіко Ф.Д. Дослідження похибки ультразвукових витратомірів за умов спотвореної структури потоку із застосуванням одноядерних функцій Salami / Ф.Д. Матіко, В.І. Роман // *Метрологія та прилади*. – 2017. – №3(65). – С.36-43.
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 // *Вісник НУ«ЛП» : Автоматика, вимірювання та керування*. – 2004. – №500. – С.131-134.
9. Коробко І.В. Оцінка асиметрії потоку рідини при вимірюванні її витрати та кількості / І.В. Коробко, Я.В. Волинська // *Вісник НТУУ«КПІ» : Серія «Приладобудування»*. – 2013. – №45. – С.91-98.
10. Демідов І. Вимірювання витрати води багатоканальними ультразвуковими витратомірами / І. Демідов, В. Поджаренко // *Вісник НУ«ЛП» : Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація*. – 2003. – №476. – С.76-81.