

DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2024-1\(93\)-301-307](https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-301-307)
УДК 621.317

Л.О. Чепюк, к.т.н., доц.
І.А. Омельчук, ст. викладач
Т.С. Воронова, асистент
Л.Й. Шавурська, асистент
Н.Ю. Мазурчук, студентка

Державний університет «Житомирська політехніка»

Математичні моделі для розрахунку витрат в інформаційно-вимірювальній системі обліку газу

За допомогою інформаційно-вимірювальних систем можна значно покращити облік витрати газу на нафтогазових підприємствах. Використання для вимірювань ультразвукового методу є досить перспективним. Він дає можливість проводити вимірювання різних речовин без прямого контакту, приймально-передавальні елементи мають високу надійність, тому що немає рухомих частин, діапазон вимірювань теоретично необмежений. Ультразвуковий перетворювач витрат (УЗПВ) – це акустичний перетворювач витрати, що працює в ультразвуковому діапазоні частот, в якому створюється сигнал вимірювальної інформації, що базується на залежності акустичного ефекту в потоці газу від її витрати. Розглянуто класифікацію ультразвукових перетворювачів витрати та варіанти розташування акустичних шляхів УЗПВ, теоретичні основи методу вимірів. Наведено методики розрахунку об'ємної витрати у робочих умовах, масової витрати та об'ємної витрати газу, приведена до стандартних умов, об'ємної витрати та об'єму сухої частини вологого газу, приведених до стандартних умов та розрахунок енерговмісту газу.

Ключові слова: інформаційно-вимірювальна система; ультразвуковий метод вимірювання; вимірювання витрат газу.

Актуальність теми. Використання інформаційно-вимірювальних систем дає змогу покращити облік витрати газу. З усіх відомих методів вимірювання витрат детально вивчено, відпрацьовано і доведено до стандартизованих у повному обсязі тільки метод змінного перепаду тиску. В останні роки тенденції розвитку техніки вимірювання витрат дозволяють вважати ультразвуковий метод одним із кращих. Це стало можливим завдяки безконтактному вимірюванню будь-яких речовин, надійності приймально-передавальних елементів, відсутності рухомих частин, і, теоретично, необмеженому діапазону вимірювань.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори. Методи вимірювання витрати та кількості газу розглянуто у роботах М.П. Андрієшин [1], Є.С. Пістун [2]. Ультразвуковий метод обліку витрат газу розглянуто у роботах [4, 5, 8–10].

Метою статті є аналіз математичних моделей для розрахунку витрат в інформаційно-вимірювальній системі обліку газу.

Викладення основного матеріалу. У [6] сформульовано вимоги до методів вимірювання витрати газу та до автоматичного визначення витрати й об'ємної кількості газу. У [7] виконана оцінка точності вимірювання об'єму природного газу інформаційно-вимірювальною системою обліку газу. Для вимірювання витрати газу обраний ультразвуковий метод.

Принцип вимірювань за допомогою ультразвукового перетворювача витрати (УЗПВ) заснований на тому, що ультразвуковий імпульс, спрямований уздовж потоку, поширюється швидше за ультразвуковий імпульс, що спрямований проти потоку [7].

Ультразвукові перетворювачі витрати розрізняють за:

- методами вимірювань середньої швидкості вздовж акустичного шляху [7];
- видом (відбитим або прямим є промінь), кількістю та розміщенням ультразвукових каналів;
- улаштуванням та способами монтажу перетворювача електроакустичного (ПЕА).

УЗПВ можуть бути одноканальними або багатоканальними (однопроменевими або багатопроменевими).

Одноканальні витратоміри застосовують для вимірювання витрати газу з розвиненим профілем швидкості і у випадках, коли не потрібна висока точність.

Багатоканальні витратоміри дозволяють мінімізувати ефекти, викликані розподілом швидкостей потоку і числом Рейнольдса Re . Вони мають високу надійність, якщо електронна схема пристрою обробки сигналів забезпечує дублювання або коригування алгоритму розрахунку при виході з експлуатації одного або ряду ПЕА.

На рисунку 1–2 показані як приклади варіанти розташування акустичних шляхів УЗПВ

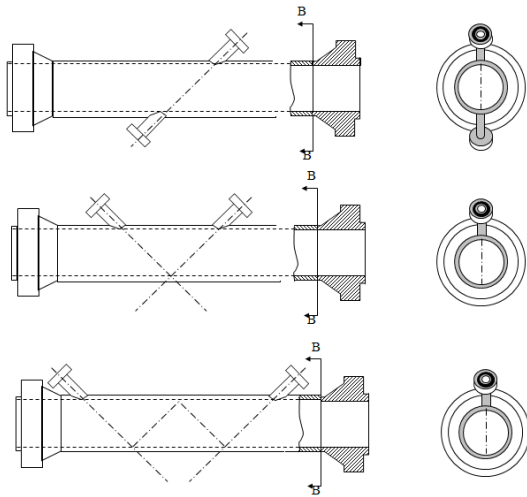


Рис. 1. Однопроменеві УЗПВ

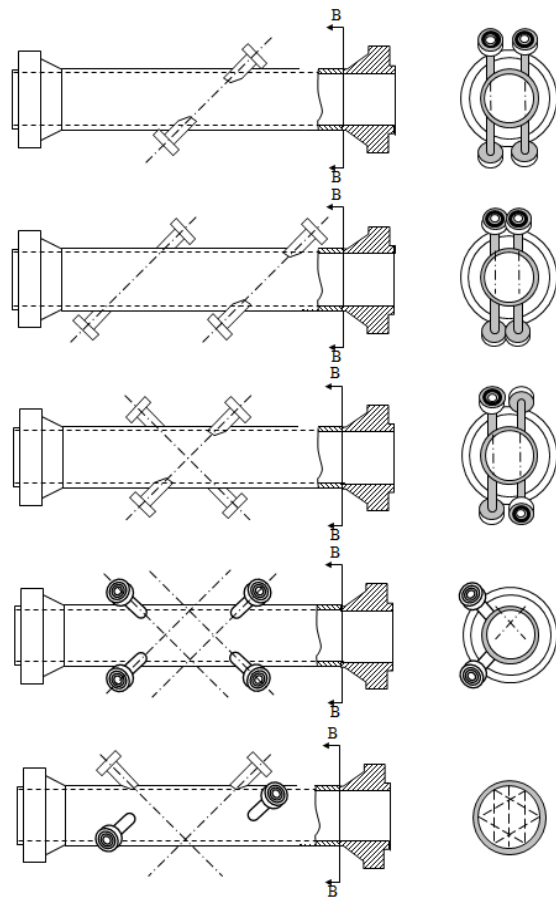


Рис. 2. Багатопроменеві УЗПВ

Промені ультразвукових каналів можуть бути прямими або відбитими (одноразово або багаторазово) від внутрішньої стінки УЗПВ і можуть бути розташовані у діаметральній площині УЗПВ або площинах, що проходять через хорди його перерізу.

Ультразвуковий метод вимірів

Теоретичні основи ультразвукового методу вимірів наведено у [3, 8, 9]. На рисунку 3 наведено схему ділянки вимірювального трубопроводу (ВТ). ПЕА (1) і ПЕА (2) розташовані під кутом ϕ до осі ВТ. Ультразвуковий імпульс (УЗІ) проходить від 1 до 2 через потік газу, спрямований уздовж осі x, як показано на рисунку 3, локальні швидкості якого залежать тільки від координати у.

Час проходження УЗІ між ПЕА (1) і (2) [5, 8]:

$$\tau_2 = \frac{L_p}{\left(c_0^2 - \frac{\bar{u}^2 d^2}{X^2} + \frac{\bar{u}^2 d^2}{L_p^2} \right)^{0,5}} + \frac{\bar{u} d}{L_p} \quad (1)$$

Оскільки швидкість газу вносить зворотний ефект на поширення імпульсу в потоці, то час проходження УЗІ від ПЕА (2) до ПЕА (1) [5, 8]:

$$\tau_1 = \frac{L_p}{\left(c_0^2 - \frac{\bar{u}^2 d^2}{X^2} + \frac{\bar{u}^2 d^2}{L_p^2} \right)^{0,5}} - \frac{\bar{u} d}{L_p} \quad (2)$$

Швидкість \bar{u} можна знайти із рівнянь (1) і (2) [5, 8]:

$$\bar{u} = \frac{L_p^2 (\tau_1 - \tau_2)}{2d\tau_1\tau_2} \quad (3)$$

Середня швидкість газу через переріз ВТ [5, 8]:

$$u_a = \frac{1}{A} \iint_A u dA, \quad (4)$$

Середня швидкість газу вздовж акустичного шляху [5, 8]:

$$\bar{u} = \frac{1}{L} \int_L u dL. \quad (5)$$

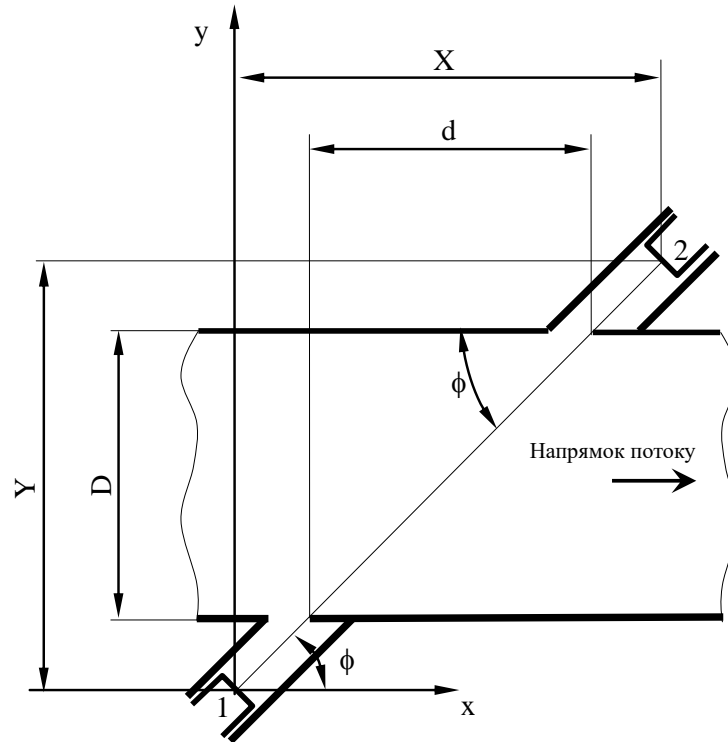


Рис. 3. Схема ділянки вимірювального трубопроводу

Залежність між \bar{u} та u_a [5, 8]:

$$u_a = K_u \bar{u}, \quad (6)$$

де

$$K_u = \frac{\frac{1}{A} \iint_A u dA}{\bar{u} = \frac{1}{L} \int_L u dL}. \quad (7)$$

Для одноканального УЗПВ [5, 8]:

$$K_u = \frac{1}{1,12 - 0,011 \log_{10}(R_e)}. \quad (8)$$

Для ламінарного режиму при рівномірному перебігу газу $K_u = 0,75$.

Середню швидкість газу можна обчислити через значення середніх швидкостей на хордах перерізу ВТ [5, 8]:

$$u_a = \frac{2}{A} \int_{-D/2}^{D/2} \left[\left(\frac{D}{2} \right)^2 - r^2 \right]^{0,5} \bar{u}(r) dr \quad (9)$$

або

$$u_a = \frac{2}{A} \sum_i^n \left[\left(\frac{D}{2} \right)^2 - r_i^2 \right]^{0,5} \bar{u}(r_i). \quad (10)$$

Для багатоканальних УЗПВ [5, 8]:

$$u_a = \frac{2}{A} \sum_i^n w_i \bar{u}(r_i). \quad (11)$$

Значення вагових коефіцієнтів у (11) залежать від числа R_e , кількості акустичних шляхів та їх розташування. При виборі кількості та місця розташування акустичних шляхів потрібно знизити залежність показів витратоміра від числа R_e . Значення вагових коефіцієнтів для різних варіантів кількості та місця розміщення акустичних шляхів наводяться у роботі [4].

Об'ємна витрата у робочих умовах

Для одноканального УЗПВ об'ємна витрата газу в робочих умовах пов'язана із середньою швидкістю проходження газу через поперечний переріз УЗПВ таким чином [5, 8]:

$$q_0 = Au_a. \quad (12)$$

Для обчислення значення середньої швидкості газу через поперечний переріз УЗПВ необхідно знати значення поправочного коефіцієнта на розподіл швидкостей [8]:

$$k_u = \frac{q_0}{Au} = \frac{u_a}{\bar{u}}. \quad (13)$$

Таким чином, витрата газу може бути обчислена за виміряною середньою швидкістю потоку газу вздовж акустичного шляху за формулою [5, 8]:

$$q_0 = k_u A \bar{u}. \quad (14)$$

Значення k_u є функцією числа R_e , шорсткості стінок трубопроводу (для турбулентних режимів течії) та розташування акустичного каналу за формулами (7) і (8).

При використанні багатоканального УЗПВ із застосуванням інтегруючої техніки об'ємна витрата може бути обчислена за формулою [5, 8]:

$$q_0 = A \sum_1^n w_i \bar{u}_i, \quad (15)$$

де n – число каналів; \bar{u}_i – середня швидкість газу вздовж i -го каналу:

$$\sum_1^n w_i \bar{u}_i = u_a. \quad (16)$$

Значення вагових коефіцієнтів залежать від кількості та розташування акустичних каналів.

Масова витрата та об'ємна витрата газу, приведена до стандартних умов

Масову витрату газу розраховують за вимірними значеннями об'ємної витрати та виміряною або розрахованою щільністю газу [5, 8]:

$$q_m = q_0 \rho = q_0 \rho_c \frac{p T_c}{p_c T K} = q_0 \rho_c \frac{p T_c Z_c}{p_c T Z}. \quad (17)$$

Об'ємну витрату q_c розраховують шляхом приведення об'ємної витрати q_0 до стандартних умов за формулою [5, 8]:

$$q_c = q_0 \frac{\rho}{\rho_c} = q_0 \frac{p T_c}{p_c T K} = q_0 \frac{p T_c Z_c}{p_c T Z}. \quad (18)$$

Основні рівняння визначення кількості газу

Кількість газу (V_C , V_O , m), що пройшла ВТ за певний період часу τ , з використанням інформації про збільшення обсягу газу, що отримується від УЗПВ, розраховують за рівняннями [5, 8]:

$$V_C = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\rho_i}{\rho_{ci}} \Delta V_{oi} \right) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{p_i T_c}{p_c T_i K_i} \Delta V_{oi} \right) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{p_i T_c Z_{ci}}{p_c T_i Z_i} \Delta V_{oi} \right); \quad (19)$$

$$V_O = \sum_{i=1}^n \Delta V_{oi}; \quad (20)$$

$$m = \sum_{i=1}^n (\rho_i \Delta V_{oi}) = \sum_{i=1}^n \left(\rho_{ci} \frac{p_i T_c}{p_c T_i K_i} \Delta V_{oi} \right) = \sum_{i=1}^n \left(\rho_{ci} \frac{p_i T_c Z_{ci}}{p_c T_i Z_i} \Delta V_{oi} \right), \quad (21)$$

де ΔV_{oi} – збільшення обсягу газу за інтервал часу опосередкування параметрів газу.

Кількість газу (V_C , V_O , m), що пройшла трубопроводом за певний період часу τ , з використанням інформації про витрату газу за робочих умов, що отримується від УЗПВ, розраховують за такими рівняннями [5, 8]:

– при дискретному інтегруванні функцій у часі τ з інтервалами дискретизації $\Delta \tau_i$

$$V_C = \sum_{i=1}^n (q_{0i} \frac{\rho_i}{\rho_{ci}} \Delta \tau_i) = \sum_{i=1}^n (q_{0i} \frac{p_i T_c}{p_c T_i K_i} \Delta \tau_i) = \sum_{i=1}^n (q_{0i} \frac{p_i T_c Z_{ci}}{p_c T_i Z_i} \Delta \tau_i); \quad (22)$$

$$V_O = \sum_{i=1}^n (q_{0i} \Delta \tau_i); \quad (23)$$

$$m = \sum_{i=1}^n (q_{0i} \rho_i \Delta \tau_i) = \sum_{i=1}^n (q_{0i} \rho_{ci} \frac{p_i T_c}{p_c T_i K_i} \Delta \tau_i) = \sum_{i=1}^n (q_{0i} \rho_{ci} \frac{p_i T_c Z_{ci}}{p_c T_i Z_i} \Delta \tau_i); \quad (24)$$

– при дискретному інтегруванні функцій у часі τ з рівномірним інтервалом дискретизації $\Delta \tau$

$$V_C = \Delta \tau \sum_{i=1}^n (q_{0i} \frac{\rho_i}{\rho_{ci}}) = \Delta \tau \sum_{i=1}^n (q_{0i} \frac{p_i T_c}{p_c T_i K_i}) = \Delta \tau \sum_{i=1}^n (q_{0i} \frac{p_i T_c Z_{ci}}{p_c T_i Z_i}); \quad (25)$$

$$V_O = \Delta \tau \sum_{i=1}^n q_{0i}; \quad (26)$$

$$m = \Delta \tau \sum_{i=1}^n (q_{0i} \rho_{ci}) = \Delta \tau \sum_{i=1}^n (q_{0i} \rho_{ci} \frac{p_i T_c}{p_c T_i K_i}) = \Delta \tau \sum_{i=1}^n (q_{0i} \rho_{ci} \frac{p_i T_c Z_{ci}}{p_c T_i Z_i}); \quad (27)$$

де

$$\Delta \tau = \frac{(\tau_K - \tau_H)}{n}, \quad (28)$$

n – кількість інтервалів дискретизації протягом часу $(\tau_K - \tau_H)$.

Значення параметрів, що входять до формул (19) ÷ (27), можуть бути результатами обчислень за середніми параметрами, необхідними для їх розрахунку, або прийняті умовно-постійними величинами. Наприклад, величина q_{0i} може бути результатом усереднення кількох вимірів середньої швидкості газу; значення ρ_c та склад газу можуть бути прийняті умовно-постійними величинами.

Об'ємна витрата та об'єм сухої частини вологого газу, приведені до стандартних умов

Розрахунок об'ємної витрати та об'єму сухої частини вологого газу, приведені до стандартних умов, виконують за формулами [5, 8]:

$$q_c = q_0 \left(\frac{\rho_{e2} - f_e}{\rho_c} \right); \quad (29)$$

$$V_C = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\rho_{e2i} - f_{e1}}{\rho_{ci}} \Delta V_{oi} \right); \quad (30)$$

$$V_C = \sum_{i=1}^n (q_{0i} \frac{\rho_{e2i} - f_{e1}}{\rho_{ci}} \Delta \tau_i); \quad (31)$$

$$V_C = \Delta \tau \sum_{i=1}^n (q_{0i} \frac{\rho_{e2i} - f_{e1}}{\rho_{ci}}); \quad (32)$$

де f_e – абсолютна вологість газу, виражена масою водяної пари (у кг) у 1 м³ за робочих умов.

Енерговміст газу визначають за формулою [5, 8]:

$$E_e = \sum_{i=1}^n H_{ci} V_{ci}. \quad (33)$$

Висновки та перспективи подальших досліджень. Розглянуто класифікацію ультразвукових перетворювачів витрати та варіанти розташування акустичних шляхів УЗПВ, теоретичні основи методу вимірів. Наведено методики розрахунку об'ємної витрати у робочих умовах, масової витрати та об'ємної витрати газу, приведені до стандартних умов, об'ємної витрати та об'єму сухої частини вологого газу, приведених до стандартних умов, та розрахунок енерговмісту газу.

Список використаної літератури:

1. Андрійшин М.П. Вимірювання витрати та кількості газу : довідник / М.П. Андрійшин. – Івано-Франківськ : ПП «Сімик», 2004. – 160 с.
2. Пістун Є.С. Нормування витратомірів змінного перепаду тиску / Є.С. Пістун, Л.В. Лесовой. – Львів : ЗАТ «Інститут енергоаудиту та обліку енергоносіїв», 2006. – 576 с.
3. Облік природного газу : довідник / М.П. Андрійшин та ін. – Івано-Франківськ : ПП «Сімик», 2008. – 180 с.

4. Measurement of fluid flow in closed conduits – Clamp-on ultrasonic transit-time meters for liquids and gases : ISO 24062:2023.
5. Measurement of Gas by Ultrasonic Meters Transmission Measurement Committee Operating Section American Gas Association : Report No. 9 / A.G.A. – 1997.
6. Формулювання та аналіз вимог до метрологічного забезпечення інформаційно-вимірювальної системи обліку газу / Ю.О. Подчашинський, В.Д. Тарарак, Л.О. Чепюк та ін. // Технічна інженерія. – 2021. – № 2 (88). – С. 86–94.
7. Оцінка точнісних характеристик ультразвукового методу в інформаційно-вимірювальній системі обліку газу / Ю.О. Подчашинський, Л.О. Чепюк, І.А. Омельчук та ін. // Технічна інженерія. – 2022. – № 2 (90). – С. 108–116.
8. Вимірювання потоку плинного середовища в закритих каналах. Ультразвукові лічильники газу. Частина 1. Лічильники для комерційного обліку та вимірювання в газорозподільчих системах (ISO 17089-1:2019, IDT) : ДСТУ ISO 17089-1:2021.
9. Вимірювання потоку плинного середовища в закритих каналах. Лічильники газу ультразвукові. Частина 2. Лічильники для промислового обліку (ISO 17089-2:2012, IDT) : ДСТУ ISO 17089-2:2018.
10. Мазурчук Н.Ю. Ультразвуковий метод вимірювання витрати газу / Н.Ю. Мазурчук, І.А. Омельчук, Л.О. Чепюк // Тези Всеукраїнської науково-практичної онлайн конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвяченої Дню науки, 16–20, 26 травня. – Житомир : «Житомирська політехніка», 2022. – 60 с.

References:

1. Andriishyn, M.P. (2004), *Vymiriuvannia vytraty ta kilkosti hazu*, dovidnyk, PP «Simyk», Ivano-Frankivsk, 160 p.
2. Pistun, Ye.S. and Lesovoi, L.V. (2006), *Normuvannia vytratimiriv zminnoho perepadu tysku*, ZAT «Instytut enerhoaudytu ta obliku enerhonosiiv», Lviv, 576 p.
3. Andriishyn, M.P. et al. (2008), *Oblik pryrodnoho hazu*, dovidnyk, PP «Simyk», Ivano-Frankivsk, 180 p.
4. *ISO 24062:2023 Measurement of fluid flow in closed conduits – Clamp-on ultrasonic transit-time meters for liquids and gases* (2023).
5. A.G.A. (1997), *Measurement of Gas by Ultrasonic Meters Transmission Measurement Committee Operating Section American Gas Association*, Report No. 9.
6. Podchashynskiy, Yu.O., Tararaka, V.D., Chepiuk, L.O. et al. (2021), «Formuliuvannia ta analiz vymoh do metrolohichnoho zabezpechennia informatsiino-vymiriuvalnoi systemy obliku hazu», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 2 (88), pp. 86–94.
7. Podchashynskiy, Yu.O., Chepiuk, L.O., Omelchuk, I.A. et al. (2022), «Otsinka tochnisnykh kharakterystyk ultrazvukovoho metodu v informatsiino-vymiriuvalnii systemi obliku hazu», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 2 (90), pp. 108–116.
8. *DSTU ISO 17089-1:2021 Vymiriuvannia potoku plymnoho seredovyschcha v zakrytykh kanalakh. Ultrazvukovi lichylnyky hazu. Part 1. Lichylnyky dlia komertsiihnoho obliku ta vymiriuvannia v hazorozpodilchyykh systemakh (ISO 17089-1:2019, IDT)* (2021).
9. *DSTU ISO 17089-2:2018 Vymiriuvannia potoku plymnoho seredovyschcha v zakrytykh kanalakh. Lichylnyky hazu ultrazvukovi. Part 2. Lichylnyky dlia promyslovoho obliku (ISO 17089-2:2012, IDT)* (2018).
10. Mazurchuk, N.Yu., Omelchuk, I.A., Chepiuk, L.O. (2022), «Ultrazvukovy metod vymiriuvannia vytraty hazu», *Tezy Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi on-line konferentsii zdobuvachiv vyshchoi osvity i molodykh uchennykh, prysviachenoi Dniu nauky*, 16–20, 26 travnia, «Zhytomyrska politekhnika», Zhytomyr, 60 p.

Чепюк Ларіна Олексіївна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри метрології та інформаційно-вимірювальної техніки Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні системи;
- цифрова обробка сигналів і відеозображень;
- метрологія, засоби вимірювання;
- системний аналіз складних технічних систем.

Омельчук Ігор Анатолійович – старший викладач кафедри метрології та інформаційно-вимірювальної техніки Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні системи;
- метрологія, засоби вимірювання;
- системний аналіз складних технічних систем.

Воронова Тетяна Станіславівна – асистент кафедри метрології та інформаційно-вимірювальної техніки Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні системи;
- цифрова обробка сигналів і відеозображень;
- системний аналіз складних технічних систем.

Шавурська Людмила Йосипівна – асистент кафедри метрології та інформаційно-вимірювальної техніки Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- комп’ютеризовані інформаційно-вимірювальні системи;
- цифрова обробка сигналів і відеозображень;
- системний аналіз складних технічних систем.

Мазурчук Надія Юрійвна – студентка групи ІВТ-2м Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- комп’ютеризовані інформаційно-вимірювальні системи;
- метрологія, засоби вимірювання;
- системний аналіз складних технічних систем.

Chepiuk L.O., Omelchuk I.A., Voronova T.S., Shavurska L.Yo., Mazurchuk N.Yu.

Mathematical models for calculating costs in the information and measurement system of gas accounting

With the help of information and measurement systems, it is possible to significantly improve gas consumption accounting at oil and gas enterprises. The use of the ultrasonic method for measurements is quite promising. It makes it possible to measure various substances without direct contact, the transceiver elements have high reliability, since there are no moving parts, the range of measurements is theoretically unlimited. The ultrasonic flow transducer (UZPV) is an acoustic flow transducer operating in the ultrasonic frequency range, in which a measurement information signal is created based on the dependence of the acoustic effect in the gas flow on its flow rate. The classification of ultrasonic flow transducers and variants of the arrangement of the acoustic paths of the ultrasonic flow transducers, the theoretical basis of the measurement method, are considered. Methods of calculating volume flow in working conditions, mass flow and volume flow of gas brought to standard conditions, volume flow and volume of the dry part of wet gas brought to standard conditions and calculation of energy content of gas are given.

Keywords: information-measuring system; ultrasonic measurement method; gas flow measurement error.

Стаття надійшла до редакції 20.05.2024.