

МЕТРОЛОГІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕТАЛОНА ПЕРЕДАВАННЯ ОДИНИЦІ ВИТРАТИ ПРИРОДНОГО ГАЗУ НА БАЗІ ВИТРАТОМІРА ЗМІННОГО ПЕРЕПАДУ ТИСКУ

© Середюк О.Є., 2008

Розглянуті технічне рішення і результати метрологічних досліджень еталона витрати газу на базі витратоміра змінного перепаду тиску. Обґрунтована можливість його застосування в державній повірній схемі для засобів вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу як еталона передавання.

The technical solution and the results of metrological researches for the standart on the base of flowmeters of variable pressure differential is considered. The possibility of its use in the state verification scheme for devices of measureing volume and realization of natural gas volume as for transfer standard is grounded too.

Постановка проблеми. Нові технології використання природного газу, які спрямовані на вирішення питань його економного та раціонального використання, неможливі без застосування нових точніших засобів обліку, зокрема, лічильників і витратомірів газу. Це зумовлює необхідність вдосконалення їх метрологічного забезпечення.

Одним із способів розв'язання цієї задачі є застосування еталонних засобів з природним газом як робочим середовищем. Цим можна досягнути істотного підвищення точності робочих засобів витратовиміральної техніки.

Нова редакція Державного стандарту України у галузі витратометрії газу [1] передбачає застосування у повірній схемі еталонів передавання (ЕП) як окремого виду засобів вимірювання. Актуальність і складність вирішення цієї проблеми ґрунтується на тому, що нова редакція вказаної повірної схеми передбачає використання державного еталона одиниці об'єму та об'ємної витрати газу ДЕГУ 03-01-96 з повітрям як робочим середовищем, а застосування державного спеціального еталона або вихідного еталона з функціонуванням на природному газі в цій повірній схемі не передбачено. Тому, враховуючи необхідність забезпечення єдності вимірювань у цій сфері, актуальним є розроблення і метрологічні дослідження нових видів ЕП, які відповідали би чинній повірній схемі і забезпечували їх функціонування на природному газі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Аналіз літературних джерел показав, що як ЕП здебільшого застосовують мобільні (трансферні) засоби, які конструктивно реалізовані на турбінних чи роторних лічильниках газу [2] або витратомірах критичного витікання газу [3]. Однак передавання ними одиниці об'єму передбачають використання одного виду робочого середовища, найчастіше повітря. Такий підхід передбачає перерахунок градуювальної характеристики еталонних засобів з повітря на природний газ або непрямий метод метрологічної атестації повірних установок, що може внести методичну похибку під час визначення метрологічних характеристик засобів обліку природного газу. Крім того, виготовлення турбінних чи роторних лічильників газу потребує реалізації новітніх теоретико-експериментальних досліджень на стадії їх проектно-конструкторських розробок і відповідного рівня технологічного устаткування під час виготовлення. Цими факторами у поєднанні з відсутністю відповідного фінансування пояснюється використання у вітчизняній практиці для цієї мети закордонних засобів [2], а також застосування згідно з проектом закордонних ЕП під час створення метрологічного центру НАК "Нафтогаз України" у м. Боярці [4].

Повідомлення в інформаційних джерелах щодо застосування ЕП на базі критичних сопел в Україні автору статті не відомі, оскільки вітчизняні практичні напрацювання метрологічної

атестації критичних сопел передбачають застосування еталона масової витрати газу, який свого часу був створений в м. Казані у Всесоюзному НДІ витратометрії (тепер “ФГУП Всероссийский НИИ расходомерии”), і передача одиниці витрати здійснювалася безпосередньо від нього, зокрема і під час розроблення ЕП [5].

Серед найпоширеніших засобів, які знаходять застосування під час обліку природного газу, є витратоміри змінного перепаду тиску (ВЗПТ), які через істотності методичних похибок застосовуються переважно як робочі засоби вимірювальної техніки (ЗВТ) [6,7]. Водночас відомі результати застосування зразкових діафрагм для атестації на природному газі ВЗПТ [8,9], лічильників газу [10,11] і турбінних витратомірів [12]. Поряд з цим в роботі [13] акцентується на перевагах практичного застосування ВЗПТ і на базі досвіду їх градування за допомогою установок вищої точності, зокрема вагових, або на базі витратомірів з критичними соплами стверджується, що похибку звужуючих пристроїв можна зменшити до рівня $\pm(0,10-0,20)\%$. Завдяки цьому стає можливим їх застосування для “серійних повірок лічильників газу як із звичайними (2,5-4,0), так і з підвищеними (0,1-1,0) класами точності” (термінологія цитованої статті).

З врахуванням цих передумов за участю автора запропонований новий науково-методологічний підхід побудови ЕП в межах чинної Державної повірної схеми, який полягає в створенні ЕП одиниці витрати природного газу на базі ВЗПТ [14], методологія побудови яких розглянута в [15]. Однак для їх практичного впровадження необхідно виконати метрологічні дослідження запропонованого типу ЕП.

Формулювання цілі статті. Метою статті є викладення технічної суті нової конструкції еталона передавання одиниці витрати газу і виконання його метрологічних досліджень для обґрунтування можливості застосування згідно з поставленою метою передавання одиниці вимірювання витрати і об’єму природного газу.

Виклад основного матеріалу. ЕП одиниці витрати природного газу на базі ВЗПТ повинен реалізувати такий алгоритм вимірювання:

$$Q = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{K_{zp} K_k}{\sqrt{1-\beta^4}} d^2 \frac{\sqrt{2\Delta p \cdot \rho_{1z}}}{\rho_z}, \quad (1)$$

де Q – об’ємна витрата природного газу за робочих умов ЕП; K_{zp} – градувальний коефіцієнт ЕП; K_k – коефіцієнт коригування результатів вимірювання ЕП на природному газі; β – відносний діаметр отвору звужувального пристрою, який дорівнює відношенню діаметра отвору d діафрагми до внутрішнього діаметра D вимірювального трубопроводу перед звужувальним пристроєм; Δp – перепад тиску на звужувальному пристрої; ρ_z – густина природного газу за робочих умов під час вимірювання його витрати; ρ_{1z} – густина природного газу перед звужувальним пристроєм ЕП.

Аналіз виразу (1) показує, що кожна із наведених складових вносить свою частку в похибку вимірювання витрати, серед яких найістотнішими можуть бути методичні похибки визначення коефіцієнтів K_{zp} і K_k . Тому під час створення ЕП визначення коефіцієнта K_{zp} здійснюють за допомогою дзвонової витратовимірювальної установки, а коефіцієнта K_k – розрахунковим методом [14].

Під час градування ЕП із застосуванням дзвонової установки як робочого еталона спочатку заповнюється простір під дзвоном 6 (рис.1) від джерела витрати 11 через трубопровід 12 і відкритий клапан 13. При цьому клапан 15 у вихідному трубопроводі 14 є закритим. Після досягнення дзвоном 6 необхідного положення запірний клапан 13 закривається і подача газу від джерела 11 припиняється. Дзвін 6 опиняється у нерухомому зваженому стані. Далі пристроєм задавання витрати 16 задають значення відтворюваної витрати газу і відкривають клапан 15, внаслідок чого дзвін 6 під дією власної ваги починає опускатися і витискувати повітря через звужувальний пристрій 1 ЕП. При цьому за допомогою контрольної лінійки 8 і оптоелектронної

пари 9 вимірювачем BS (поз. 1-1) відлічується контрольний об'єм газу, який відтворюється дзвоном, і час його відтворення хронометром KE (2-1), а блоком 10 збору і обробки інформації одночасно здійснюється збір інформації про значення перепаду тиску Δp (7-1), тиску p (8-1) і температури T (6-1, 6-2) на звужувальному пристрої 1, і тиск (3-1), температуру (4-1, 4-2) і фізичні характеристики робочого середовища робочого еталона. У комплект ЕП входить перетворювач якісних параметрів робочого середовища Q (5-1), які забезпечують визначення показника адиабати (застосовується під час роботи ЕП на природному газі). У разі опускання дзвона 6 до крайнього нижнього положення запірний клапан 15 закривається. Градувальний цикл при цьому закінчується.

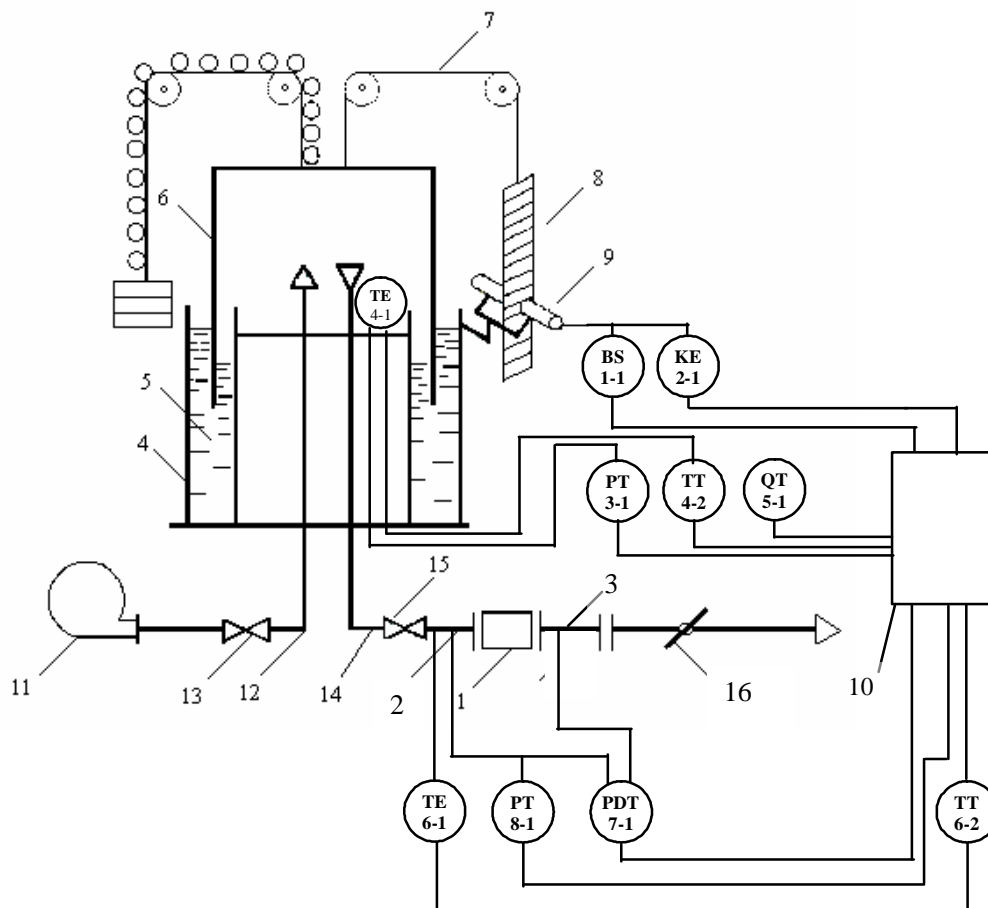


Рис. 1. Функціональна схема градування ЕП за допомогою дзвонової витратовимірювальної установки

Далі вимірювана інформація обробляється у вузлі 10, за допомогою якого здійснюють розрахунок градувального коефіцієнта звужувального пристрою за робочих умов його визначення на еталонній дзвонової установці з використанням алгоритму

$$K_{gp} = Q_{EП} \sqrt{1 - \beta^4} / \left(\frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_n}} \right), \quad (2)$$

де $Q_{EП}$ – об'ємна витрата повітря, яка передана від еталонного засобу (державний, робочий чи інший вид еталона) до ЕП під час його градування; ρ_n – густина повітря перед звужувальним пристроєм ЕП.

Потім повторюють градувальний цикл і визначення градувального коефіцієнта за інших відтворених витрат дзвоновою установкою. Після завершення експериментальних досліджень за алгоритмом (2) здійснюють розрахунок градувального коефіцієнта звужувального пристрою 1 як функції числа Рейнольдса Re .

Під час передавання одиниць вимірювання від ЕП до робочого засобу вимірювання витрати здійснюється монтаж звужувального пристрою 1 з підвідною 2 і відвідною 3 прямолінійними ділянками як цілісного вузла, який градуювався на еталонній дзвоновій установці, послідовно з робочим засобом обліку газу у трубопроводі з можливістю відтворення потоку реального природного газу, наприклад, в байпасній лінії газорегуляторної станції. Далі створюється потік газу через ЕП і робочий засіб, з яких здійснюється збір вимірювальної інформації і її обробка блоком 10. При цьому, використовуючи дані про значення перепаду тиску, параметри і фізичні характеристики робочого середовища на ЕП згідно з методологією [15] визначають коефіцієнт K_K , завдяки чому здійснюється коригування фактичного значення градуювального коефіцієнта ЕП.

Зважаючи, що об'єм повітря, який відтворюється робочим еталоном дзвонового типу в силу дії термогазодинамічних факторів змінюється під час транспортування до ЕП для обчислення параметрів Q_{EP} , ρ_n і числа Re застосовувався такий алгоритм:

$$Q_{EP} = Q_{PE} \frac{P_{PE} T_{EP} z_{EP}}{P_{EP} T_{PE} z_{PE}}, \quad (3)$$

$$Q_{PE} = V_{PE} / \tau, \quad (4)$$

$$\rho_n = \rho_c \frac{P_{EP} T_c z_c}{P_c T_{EP} z_{EP}}, \quad (5)$$

$$Re = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{Q_{EP} \rho_n}{D \mu_n}, \quad (6)$$

де V_{PE} , Q_{PE} – об'єм та об'ємна витрата повітря за робочих умов, які відтворені робочим еталоном відповідно; P_{PE} , T_{PE} , z_{PE} – абсолютні тиск, температура та фактор стисливості повітря за робочих умов робочого еталона відповідно; P_{EP} , T_{EP} , z_{EP} – абсолютні тиск, температура та фактор стисливості повітря за робочих умов ЕП відповідно; P_c , T_c , z_c – значення стандартних умов абсолютного тиску, температури та фактора стисливості повітря за стандартних умов відповідно; τ – час відтворення контрольного об'єму робочим еталоном; D – внутрішній діаметр вимірювального трубопроводу прямолінійних ділянок ВЗПТ; μ_n – коефіцієнт динамічної в'язкості повітря за робочих умов робочого еталона.

Результати градуювання і теоретичних досліджень ЕП

№ досліджуваної витрати	\bar{Q}_{PEi} , м ³ /год	\bar{Re}_i	\bar{K}_{zpi}	$S(\bar{K}_{zpi}) \times 10^{-4}$	\bar{K}_{zpmi}	$S(\bar{K}_{zpmi}) \times 10^{-6}$	δ_{Ki} , %
1	154,019	38426	0,61906	1,09600	0,61138	3,4740	1,256
2	197,439	49198	0,61720	1,53491	0,60977	2,1898	1,219
3	269,344	67044	0,61355	2,45715	0,60750	4,0782	0,995
4	335,981	83480	0,60992	0,68838	0,60549	2,7193	0,732
5	401,544	99419	0,60689	0,52198	0,60341	1,8035	0,577
6	464,315	114994	0,60410	0,42934	0,60123	1,8240	0,479
7	499,298	123796	0,60171	1,37994	0,59988	4,3082	0,305

Метрологічні дослідження виконували на базі дослідного зразка ЕП, який створений за участю автора сумісно з фахівцями управління метрології ВАТ “Івано-Франківськгаз” з використанням двох прямолінійних ділянок трубопроводу умовного діаметра $D_u=100$ мм довжиною по 20 D_u і стандартної діафрагми з середнім значенням діаметра отвора $\bar{d} = 56,002$ мм. У комплект ЕП входить обчислювач витрати і об'єму газу типу ОЕ-22ДМ, який під'єднується до багатопараметричного перетворювача тиску, перепаду тиску і температури типу Fisher Rosemount моделі 3095, укомплектованого первинним перетворювачем температури типу ТСП-1288. Робочим еталоном дзвонового типу для градуювання ЕП застосовувалася установка типу РКДУ-0,44 (ВАТ “Івано-Франківський завод Промприлад”) з границею сумарної відносної похибки передачі одиниці

об'єму газу $\delta_{PE} = \pm 0,16\%$ в діапазоні витрат 10–1000 м³/год. З метою підвищення точності вимірювань виконували індивідуальне калібрування багатопараметричного перетворювача для умов градуювання ЕП на дзвоновому еталоні. Розраховані середні значення для параметрів \overline{Q}_{PEi} , \overline{Re}_i , \overline{K}_{zpi} , \overline{K}_{zpmi} , які наведені в таблиці, стосуються усереднених значень за результатами j -х вимірювань для кожної i -ї витрати ЕП під час його градуювання.

При цьому під час метрологічних досліджень здійснювався розрахунок теоретичного значення градуювального коефіцієнта K_{zpm} як добутка коефіцієнтів витікання звужуючого пристрою C і розширення вимірюваного середовища ε згідно з відомими виразами [6, 7]:

$$C = 0,5961 + 0,0261\beta^2 - 0,216\beta^8 + 0,000521 \left(\frac{10^6 \beta}{Re_D} \right)^{0,7} + (0,0188 + 0,0063A)\beta^{3,5} \left(\frac{10^6}{Re_D} \right) + (0,043 + 0,080e^{-10L_1} - 0,123e^{-7L_1}) \times \quad (7)$$

$$\times (1 - 0,11A) \frac{\beta^4}{1 - \beta^4} - 0,031 (M_2 - 0,8M_2^{1,1}) \beta^{1,3} \varepsilon = 1 - (0,351 + 0,256\beta^4 + 0,93\beta^8) \left[1 - \left(\frac{p_1 - \Delta p}{p_1} \right)^{1/k} \right], \quad (8)$$

де k – показник адиабати повітря; A – параметр, який визначається за формулою

$$A = \left(\frac{19000 \cdot \beta}{Re_D} \right)^{0,8} \quad (9)$$

Параметри L_1 , M_2 , які характеризують метод і місце відбору перепаду тиску, і згідно з [7] для кутового методу їх можна прийняти такими, що дорівнюють нулю.

У табл.1 також наведені результати обчислень середнього квадратичного відхилення (СКВ) середнього значення експериментально визначеного $S(K_{zpi})$ і теоретично розрахованого $S(K_{zpmi})$ значень градуювального коефіцієнта, а також похибки δ_K визначення цього коефіцієнта двома методами для i -х значень витрати. При цьому застосовували такі формули:

$$S(K_{zpi}) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (K_{zpij} - \overline{K}_{zpi})^2}{n(n-1)}}, \quad (10)$$

$$S(K_{zpmi}) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (K_{zpmij} - \overline{K}_{zpmi})^2}{n(n-1)}}, \quad (11)$$

$$\delta_{Ki} = \frac{\overline{K}_{zpi} - \overline{K}_{zpmi}}{\overline{K}_{zpmi}} \cdot 100\%, \quad (12)$$

де K_{zpij} – значення коефіцієнта K_{zpi} для кожного j -го вимірювання за i -го значення числа Re ; \overline{K}_{zpi} , \overline{K}_{zpmi} – середні значення градуювального коефіцієнта, експериментально визначеного і теоретично розрахованого за результатами n вимірювань для кожної i -ї витрати.

З отриманих результатів очевидно є наявність систематичної похибки δ_K між експериментально встановленим значенням коефіцієнта K_{zpi} і його розрахованим теоретичним значенням K_{zpmi} , яка зростає із зменшенням числа Re . Отримані результати стосуються діапазону

порівняно невеликих чисел Re ($0,4 \cdot 10^5 - 1,2 \cdot 10^5$), що зумовлено технологічними можливостями робочого еталона РКДУ-0,44 і передовсім малими значеннями надлишкового робочого тиску, який не перевищує 5 кПа. Однак цей діапазон є дозволеним для застосування ВЗПТ, оскільки згідно з [6, 7] для $0,1 \leq \beta \leq 0,559$ мінімально допустиме значення становить $Re_{\min} = 5000$.

Виконаємо кількісне оцінювання отриманих метрологічних характеристик дослідного зразка ЕП. При цьому застосуємо концепцію “теорії невизначеності” [16], яку згідно з останніми тенденціями в метрології доцільно використовувати для оцінювання метрологічних характеристик ЕП. Зважаючи, що сьогодні відсутні нормативні документи для оцінювання невизначеності еталонів витрати і об’єму газу, загалом, і ЕП цих одиниць, зокрема, то це потребує нового методологічного підходу. Тому, використовуючи правила формування сумарної похибки еталонів [17] з врахуванням взаємозв’язку похибки і невизначеностей для еталонів у галузі витратометрії газу [18], а також нормативних положень щодо необхідності експериментального визначення для ЕП сумарного середнього квадратичного відхилення результатів звірення його з вихідним еталонном [1], запишемо таку формулу для розрахунку розширеної невизначеності ЕП на базі ВЗПТ:

$$U(K_{zp}) = K_0 \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N U_{Bk}^2}{3} + U_A^2}, \quad (13)$$

де U_{Bk} – невизначеності типу В k -х складових, які формують стандартну невизначеність ЕП; U_A – невизначеності типу А, зумовлені відтворюваністю результатів визначення градуювального коефіцієнта ЕП; K_0 – коефіцієнт охоплення, який формує числове значення розширеної невизначеності для відповідної довірчої ймовірності; N – кількість k -х складових невизначеності типу В.

До невизначеності типу В досліджуваного ЕП зарахуємо невизначеність робочого еталона U_{BE} , який застосовувався для градуювання ЕП, невизначеність апроксимації градуювальної характеристики ЕП U_{BA} і невизначеність U_{BK} розрахунку коефіцієнта коригування K_k .

У свідоцтві про державну метрологічну атестацію робочого еталона РКДУ-0,44 не подається значення невизначеності U_{BE} . Тому, враховуючи результати досліджень взаємозв’язку між невизначеністю і похибкою еталонних витратовимірювальних установок [18], її значення визначимо за формулою

$$U_{BE} = K_{MX} \cdot \delta_{PE}, \quad (14)$$

де K_{MX} – коефіцієнт взаємозв’язку між невизначеністю і похибкою еталонних установок, який знаходиться в межах (0,962–1,2).

Використовуючи найнесприятливіший випадок, отримуємо $U_{BE} = 0,19\%$.

З врахуванням рекомендацій [19] здійснимо апроксимацію градуювальної характеристики ЕП поліномами першого і другого порядків, використовуючи дані табл.1:

$$K_{zp}(Re) = -2 \cdot 10^{-7} Re + 0,627, \quad (15)$$

$$K_{zp}(Re) = -5 \cdot 10^{-14} Re^2 - 2 \cdot 10^{-7} Re + 0,6267. \quad (16)$$

При цьому похибка апроксимації для (15) не перевищує $9,76 \cdot 10^{-3}\%$, а для (16) – $8,55 \cdot 10^{-3}\%$ для всього діапазону чисел Re , більшу з яких приймаємо за значення невизначеності U_{BA} .

Коефіцієнт K_k забезпечує коригування експериментально визначеного коефіцієнта K_{zp} стосовно умов функціонування ЕП на природному газі для однакових значень чисел Re . До того ж коефіцієнт коригування K_k враховує вплив зміни виду робочого середовища для фактичних значень показника адиабати k і співвідношення тисків (p_2 / p_1) і методично [15] визначається на базі виразу (8). Тому з врахуванням постійності коефіцієнта β під час функціонування ЕП на повітрі і

природному газі і за умови відсутності кореляційних зв'язків між параметром k і відношенням (p_2/p_1) запишемо таку формулу для розрахунку невизначеності U_{BK} :

$$U_{BK} = \sqrt{\left(\frac{\partial K_{zp}}{\partial k} \cdot U(k)\right)^2 + \left(\frac{\partial K_{zp}}{\partial(p_2/p_1)} \cdot U(p_2/p_1)\right)^2}, \quad (17)$$

де $\frac{\partial K_{zp}}{\partial k}$, $\frac{\partial K_{zp}}{\partial(p_2/p_1)}$ – коефіцієнти впливу для розрахунку невизначеності параметра k і відношення p_2/p_1 відповідно; $U(k)$, $U(p_2/p_1)$ – стандартні невизначеності обчислення k і відношення p_2/p_1 відповідно.

Зважаючи на відсутність апроксимаційної залежності для обчислення коефіцієнта, K_k подамо (17) у такому вигляді:

$$U_{BK} = \sqrt{\left(\frac{\Delta K_{zp}}{\Delta k} \cdot U(k)\right)^2 + \left(\frac{\Delta \epsilon}{\Delta(p_2/p_1)} \cdot U(p_2/p_1)\right)^2} \quad (18)$$

де $\frac{\Delta K_{zp}}{\Delta k}$ – відношення приросту градувального коефіцієнта K_{zp} до зміни показника адіабати k робочого середовища, який зумовив цей приріст; $\frac{\Delta \epsilon}{\Delta(p_2/p_1)}$ – відношення приросту коефіцієнта розширення ϵ до зміни відношення p_2/p_1 робочого середовища, яке зумовило цей приріст.

Значення відношень становлять $\frac{\Delta K_{zp}}{\Delta k} = 0,026$ і $\frac{\Delta \epsilon}{\Delta(p_2/p_1)} = 0,28$, які розраховані для найнесприятливішого випадку з використанням результатів обчислень, наведених в [15] і додатках [7].

Стандартну невизначеність $U(k)$ обчислимо з врахуванням відомої похибки розрахунку показника адіабати $\delta_k = 3\%$ за формулою

$$U(k) = \frac{\delta_k \cdot \bar{k}}{100} = 3,945 \cdot 10^{-2}, \quad (19)$$

де \bar{k} – середнє значення показника адіабати, який для діапазону значень повітря ($k = 1,4$) і вибраного для аналізу мінімального значення для природного газу ($k = 1,23$) становить $\bar{k} = 1,315$.

Стандартну невизначеність $U(p_2/p_1)$ обчислимо з умови врахування подвійного значення відносної похибки (γ %) вимірювання абсолютних тисків p_1 або p_2 . З врахуванням класу точності 0,075 перетворювача Fisher Rosemount і діапазону вимірювання абсолютного тиску 0,25 МПа під час функціонування ЕП отримуємо

$$U(p_2/p_1) = \frac{2 \cdot 0,075 \cdot 0,25 \cdot 10^6}{100} = 375 \text{ Па} \quad (20)$$

У відносних одиницях за мінімального робочого тиску ЕП 0,1 МПа на природному газі отримуємо $U(p_2/p_1) = 375/10^5 = 3,75 \cdot 10^{-3}$. Підстановка числових значень в (15) зумовлює результат $U_{BK} = 0,1467 \cdot 10^{-2}$ або 0,147 %, оскільки середнє значення коефіцієнта $K_k = 1$

Невизначеність U_A обчислюється за формулою:

$$U_{Ai} = \left(S_{\Sigma i} / \bar{K}_{zpi}\right) \cdot 100\%, \quad (15)$$

де U_{Ai} – невизначеність типу А, яка визначена для i -го значення числа Re; $S_{\Sigma i}$ – стандартне відхилення експериментальних значень градувального коефіцієнта ЕП для i -го числа Re, яке числово вибираємо з максимального значення $S(K_{zpi})$, наведених в табл. 1; \bar{K}_{zpi} – середнє значення коефіцієнта K_{zp} для i -го числа Re.

За результатами розрахунку згідно з (15) максимальне значення невизначеності типу А становить

$$U_{Ai} = (2,475 \cdot 10^{-4} / 0,601) \cdot 100 = 4,08 \cdot 10^{-2} \% .$$

Задаючи довірчу ймовірність $P = 0,95$, приймаємо значення коефіцієнта охоплення $K_0 = 2$ [16]. Тому після підстановки у (13) отримуємо значення розширеної невизначеності ЕП $U(K_{ep}) = \pm 0,289\%$ або у абсолютних одиницях $\pm 0,017$ від числового значення K_{ep} .

На рис. 2 показано графік зміни градуювального коефіцієнта досліджуваного ЕП, на якому також вказані границі розрахованої вище розширеної невизначеності $U(K_{ep})$ і границі похибки δ_m для теоретично обчисленого згідно з (7)–(9) значення градуювального коефіцієнта K_{epm} . При цьому похибку δ_m обчислювали за формулою

$$\delta_m = \sqrt{\delta_c^2 + \delta_\epsilon^2} = \sqrt{0,5^2 + 0,12^2} = \pm 0,514 \% ,$$

де δ_c , δ_ϵ – похибки визначення коефіцієнтів C і ϵ , які розраховані згідно з [7] для конструктивних параметрів ЕП і умов його градуювання.

У абсолютних одиницях границі похибки δ_m становлять $\pm 0,0031$ від числового значення K_{epm} .

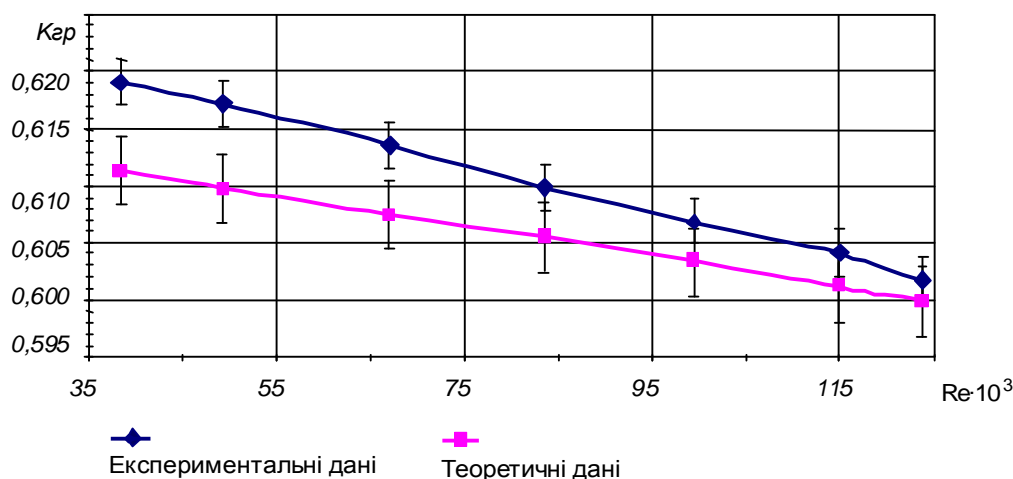


Рис. 2. Градуювальні характеристики ЕП

Зона перекриття похибок на рис.2 свідчить про правильність методичного підходу щодо визначення градуювального коефіцієнта ЕП. При $Re \leq 80 \cdot 10^3$, де відсутня зона перекриття границь похибок, очевидним є вплив систематичної складової методичної похибки для дослідного зразка ЕП. Цю похибку можна усунути індивідуальним градуюванням ЕП, завдяки чому з'являється можливість підвищення точності еталона вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу і застосування його в статусі ЕП.

Висновки

Розроблений ЕП одиниць витрати природного газу на базі ВЗПТ і його метрологічні дослідження обґрунтовують можливість створення нового типу еталонних ЗВТ (ЕП і робочих еталонів), оскільки досліджуваний ЕП з врахуванням оцінених метрологічних характеристик практично відповідає вимогам чинного нормативного документа [1].

Застосування державного чи робочого еталона під час градуювання ЕП забезпечує відповідність розроблених цього типу еталонів чинній повірній схемі [1], а його функціонування на повітрі і природному газі забезпечує досягнення єдності вимірювань під час передачі одиниці вимірювання за умов зміни виду робочого середовища. Водночас застосування для градуювання ЕП робочого еталона вищої точності порівняно із застосованим для метрологічних досліджень

дослідного зразка ЕП у поєднанні з проектуванням оптимальних за конструкцією ВЗПТ відкриває можливості досягнення ще більшої точності запропонованого типу ЕП.

Впровадженням ЕП на базі ВЗПТ досягається розширення сфери застосування чинної повірної схеми для передавання одиниць вимірювання об'єму і об'ємної витрати на реальному середовищі (природний газ) до робочих еталонів і робочих засобів вимірювальної техніки. Новий вид ЕП після виконання державної метрологічної атестації може бути застосований для звірення робочих еталонів, які працюють на природному газі. Крім того, на базі запропонованого ЕП можуть бути створені робочі еталони нового типу з функціонуванням на природному газі.

Розглянутий ЕП також відкриває нові аспекти для досягнення єдності вимірювань під час створення нових типів повірних схем із розширеною сферою застосування, яка передбачає зміну виду одиниці передавання. Зокрема досліджений ЕП технічно забезпечує передавання одиниці від еталонів об'ємної витрати газу до еталонів і робочих ЗВТ масової витрати природного газу, хоча таке рішення нині не відповідає загальноприйнятій методології і чинним нормативним документам побудови повірних схем.

1. ДСТУ 3383:2007. Метрологія. Державна повірна схема для засобів вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу. – На заміну ДСТУ 3383-96; Чинний з 01.07.07. – К.: Держспоживстандарт України, 2007. – 9 с. 2. Петришин І.С., Безгачнюк Я.В., Середюк Д.О. Впровадження еталонів передавання в повірну практику засобів вимірювальної техніки об'єму та об'ємної витрати газу // Український метрологічний журнал. – 2006. – № 4. – С.55–59. 3. Pursley W.C. The Calibration of Flowmeters // Meas.and Contr. – 1986.– Vol.19.– №5.–P.37–45. 4. Домницький Р. Метрологічний центр НАК «Нафтогаз України» // Метрологія та прилади.– 2007. – №1. – С14– 19. 5. Область применения сопел Лаваля в расходоизмерительной технике / А.П. Герасимов, В.П. Иванов, В.М. Красавин и др. // Измерительная техника. – 2005.– №4. – С.48–52. 6. Пістун Є.П., Лесовой Л.В. Нормування витратомірів змінного перепаду тиску. – Львів: Вид-во ЗАТ “Інститут енергоаудиту та обліку енергоносіїв”, 2006. – 576 с. 7. ISO 5167-2:2003. Измерение потока текучей среды с помощью устройств для измерения перепада давления, помещенных в заполненные трубопроводы круглого сечения. Ч. 2. Диафрагмы. 8. Квочкин В.Ф., Клапцов В.Ф. Тарировочная установка для измерения малых расходов газа // Точное измерение расходов и количеств веществ: Сб. докладов.– М. – Казань: Изд. стандартов.– 1970.– Вып.122(182).– С.102–105. 9. Kemp L.J.Large-Volume Gas Meter Test at Newberry // Pipe Line Ind. – 1968 . – Vol.2. – №6. – P.50–52. 10. Richardson W.B. How to field test large gas meters // Pipe Line Ind. – 1973. – Vol.39. – №1. – P.34–36. 11. Mahr P., Pamp H. Ein Normal -Verfahren mit Wirkdruckgaszähler // Mess.-Steuern-Regeln. –1980.– Band 23.– №4.– S.182–184. 12. Bellinga H. Het ijken van turbinemeters met gas onder bedrijfscondities // Gas (Nederland). – 1975. – №11. – P.316–323. 13. Морозов Ю.Ф., Гудков Д.И. Перспективы и значение повышения точности сужающих устройств для газов с учетом опыта исследований расходомеров с поворотной заслонкой // Измерительная техника. – 2002.– №6. – С.38–41. 14. Пат. 25208, U, Україна, МПК (2006) G01F25/00. Еталон передавання одиниці об'єму, маси та витрати природного газу / О.Є. Середюк, В.П. Рудко, С.А. Чеховський та ін. – №и200704218; Заявл. 16.04.07; Опубл. 25.07.07, Бюл. №11. 15. Середюк О.Є. Методологія побудови еталонів передавання одиниці об'єму природного газу// Український метрологічний журнал. – 2007.– №1. – С.38–41. 16. Захаров І.П. Кукуш В.Д. Теория неопределенности в измерениях.–Харьков: Консум, 2002.– 256 с. 17. ГОСТ 8.381-80 (СТ СЭВ 403-76). Эталоны. Способы выражения погрешностей. – Введен с 01.01.81. – М.: Изд. стандартов, 1980. – 9 с. 18. Середюк О.Є., Чеховський С.А., Винничук А.Г. Техніко-метрологічні засади побудови діагностувальних установок для побутових лічильників газу // Нафтова і газова промисловість. – 2006.– №6. – С.38-42. 19. Семенов Л.А., Сирая Т.Н. Методы построения градуировочных характеристик средств измерений. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 128 с.