

УДК 681.121.84

**УДОСКОНАЛЕННЯ ДЕРЖАВНОГО ПЕРВИННОГО ЕТАЛОНА ОДИНИЦІ ОБ'ЄМУ
ТА ОБ'ЄМНОЇ ВИТРАТИ ГАЗУ****І. С. Петришин, В. С. Воцинський, П. Я. Джочко, Я. В. Безгачнюк, Д. О. Середюк,
В. В. Воцинський, М. С. Андрук***ДП "Івано-Франківський науково-виробничий центр стандартизації, метрології та сертифікації", вул.Вовчинецька, 127, м. Івано-Франківськ, 76007*

В статті наведено результати удосконалення первинного еталона одиниці об'єму та об'ємної витрати газу ДЕТУ03-01-96 і методики дослідження його метрологічних характеристик. Застосовано ефективні технічні рішення для рівномірного переміщення дзвонового мірника, чим забезпечена стабільність відтворення витрати та тиску в підзвоновому просторі. Також удосконалено обчислювальний компонент вимірювальної системи, а саме - програмне забезпечення та контролер для збирання і оброблення вимірювальної інформації при калібруванні еталонних лічильників газу та автоматизації управління органами первинного еталона одиниці об'єму та об'ємної витрати газу. Результатом удосконалення є покращені метрологічні характеристики еталону, ще не поступається кращим зарубіжним аналогам.

Ключові слова: еталон, метрологічні характеристики, витрата газу, лічильники, дзвоновий вимірювач.

В статье приведены результаты усовершенствования первинного эталона единицы объёма и объёмного рас хода газа ГЭТУ03-01-96 и методики исследования его метрологических характеристики. Применены эффективные технические решения для равномерного перемещения колокольного измерителя, чем обеспечена стабильность воспроизведения расхода и давления в подколольном пространстве. Усовершенствован вычислительный компонент измерительной системы – а именно – программное обеспечение и контролер для сбора и обработки измерительной информации при калибровании эталонных счетчиков газа и автоматизации управления органами первичного эталона единицы объёма и объёмного расхода газа. Результатом усовершенствования являются улучшенные метрологические характеристики эталона, которые не уступают лучшим зарубежным аналогам.

Ключевые слова: эталон, метрологические характеристики, расход газа, счетчики, колокольный измеритель.

The results improving primary standard unit of volume and surround gas flow DETU03-01-96 and research methods of its metrological characteristics are presented in presented article. Effective technical solutions applied to even move whichever bell, the stability provided reproduction costs and pressure of the under bell space. Also improved computational component measuring system - namely, software and controller for the collection and processing of measurement data with standard calibration gas meters and automation of management by primary standard unit of volume and surround gas consumption. The result improvement is improved metrological characteristics of the standard, is not inferior to the best foreign analogues.

Keywords: standard, metrological characteristics, gas flow meters, bell sensor.

Забезпечення єдності вимірювань та підвищення їх точності у сфері витратометрії природного газу, зокрема, відтворення і передавання одиниць вимірювання, вимагають поетапного удосконалення вихідних еталонів об'єму та об'ємної витрати газу.

З метою забезпечення визнання на міжнародному рівні національних первинних еталонів, відповідно до вимог [1], а також результатів вимірювань, перевірки та

калібрування, що виконуються відповідними лабораторіями, метрологічні характеристики цих еталонів мають підтверджуватися звіренням з відповідними еталонами інших держав і міжнародними еталонами. Для здійснення звірвання еталонів об'єму та об'ємної витрати газу України використовують технічне забезпечення [2] та методологію звірвання еталонів об'єму і об'ємної витрати газу [3]. Беручи до уваги незворотні процеси

свроінтеграції та завдання перед метрологічною службою України щодо забезпечення виходу на міжнародне визнання національних еталонів, останні підлягають постійному удосконаленню з метою покращення метрологічних характеристик.

Відповідно до плану науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт Мініекноомрозвитку України на 2015 рік та для реалізації Державної програми розвитку еталонної бази на 2011-2015 роки науковцями ТОВ Івано-Франківське СКБ ЗА та ДП "Івано-Франківськстандартметрологія" впродовж 2015 року виконувались роботи з удосконалення Державного первинного еталона одиниці об'єму та об'ємної витрати газу ДЕТУ 03-01-96.

Актуальність наукової роботи полягає в необхідності удосконалення компонентів первинного еталона одиниці об'єму та об'ємної витрати газу та методики дослідження його метрологічних характеристик, зокрема, із застосуванням теорії невизначеності у вимірюваннях, яка у вітчизняній практиці витратометрії природного газу не набула широкого практичного поширення внаслідок дії чинної нормативної документації щодо оцінювання метрологічних характеристик еталонних засобів на базі теорії похибок.

Враховуючи фундаментальні дослідження [2 - 5] та розробки згідно патентів України [6 - 9] нижче приведені результати удосконалення первинного еталона одиниці об'єму та об'ємної витрати газу ДЕТУ03-01-96 і методики дослідження його метрологічних характеристик. Авторами приділено надзвичайну увагу впровадженню технічних рішень для рівномірного переміщення дзвонового мірника, чим забезпечується стабільність витрати, та тиску в підзвоновому просторі а також модернізації обчислювального компоненту вимірювальної системи для калібрування еталонних лічильників газу та автоматизації управління органами первинного еталона одиниці об'єму та об'ємної витрати газу. Удосконалено також блок первинних перетворювачів вимірювальної системи шляхом впровадження високоточних засобів вимірювання.

На рисунку 1 зображена принципова схема удосконаленого еталона об'єму та об'ємної витрати газу дзвонового типу.

Еталон складається із ємності з рідиною 1, у якій розміщений дзвін 2, котрий зрівноважений противагою 3, з'єднаною гнучким тросом 4 через вхідний шків 5 і компенсуючий шків 6, які розміщені на верхній рамі каркасу 7, крім того дзвін 2 переміщається по вертикальних

направляючих елементах в виді лінійного валу 8 з підшипниками 9, закріплених на стійках каркасу 7, що є одним із елементів удосконалення. На дзвоні 2 закріплена на кронштейні 10 контрольна лінійка 11 з прорізами на відстані мірної довжини, яка зв'язана з фотодатчиком 12. Еталон має ділянку трубопроводу 13 з клапаном 14 і регуляторами витрат 15, 16 для розміщення лічильника 17, що повіряється. На еталоні встановлені удосконалений датчик переміщення дзвона 18, а також підвищеної точності датчики температури і тиску під дзвоном 19, 20 і на ділянці з лічильником 20, 21, які зв'язані інтерфейсним каналом з удосконаленим контролером збирання і оброблення результатів вимірювання 22 та комп'ютером 23. Переміщення дзвона 2 в верхнє положення здійснюється повітродувкою 24 при відкритому клапані 25.

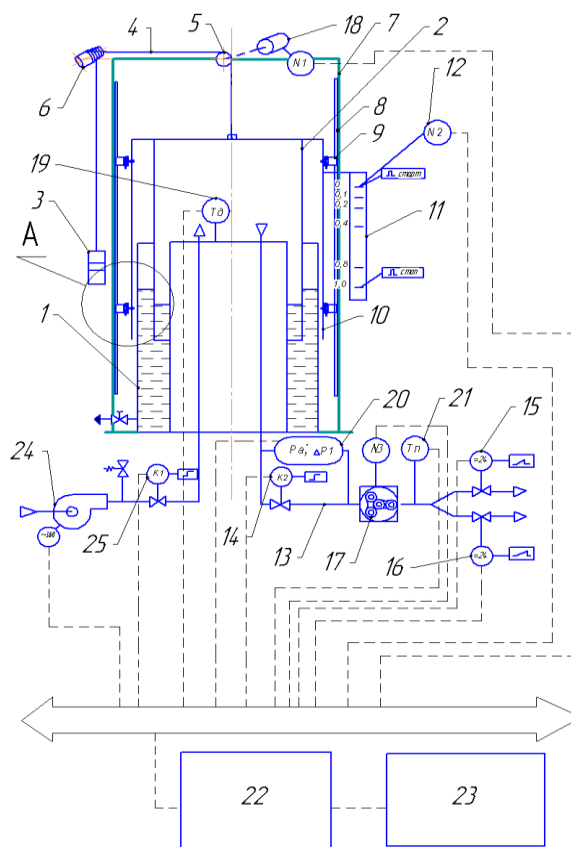


Рисунок 1 – Принципова схема удосконаленого еталона об'єму газу дзвонового типу

Еталон об'єму та об'ємної витрати газу дзвонового типу працює таким чином. Під дзвін 2 закачується повітря повітродувкою 24 при відкритому клапані 25 і закритому клапані 14.

Після підйому дзвона 2 у верхнє положення клапан 25 закривається і відкривається клапан 14 на ділянці 13, внаслідок чого через лічильник 17 проходить повітря, яке витісняється з-під дзвона. Контрольний об'єм повітря визначається відстанню між прорізами на лінійці 11, проходження яких фіксується фотодавачем 12, а переміщення дзвона контролюється давачем 18. Температура і тиск повітря під дзвоном і на ділянці, де встановлений лічильник, вимірюється за допомогою високоточних давачів температури 19, 21 і тиску 20, що дозволяє порівняти об'єм, який проходить через лічильник з контрольним об'ємом дзвона. Електричні сигнали від всіх давачів еталона надходять у модифікований контролер збирання і оброблення результатів вимірювання 22 і обробляються за допомогою комп'ютера 23.

Важливим удосконаленням є встановлення системи клімат-контролю в приміщенні. Градієнт температури навколишнього середовища біля еталона контролюється давачами температури, які розміщені в зонах дзвона та вимірювальної ділянки. Його значення не перевищує 0,1 С завдяки встановлення системи клімат-контроль в приміщенні державного первинного еталона.

Іншим важливим технічним рішенням вдосконалення є створення кінематичної системи переміщення дзвона з допомогою направляючих елементів.

На рисунку 2 зображені вертикальні направляючі елементи у вигляді лінійного валу 8 з лінійними підшипниками 9 з'єднані з кронштейном 10 дзвона через пружні елементи 26. Відмінністю конструкції еталона є те, що вал датчика переміщення дзвона встановлений на одній осі з валом вхідного шківів, а лінійні підшипники направляючих елементів з'єднані з кронштейном дзвона через пружні елементи.

Пружні елементи виконують роль компенсаторів тангенціальних зусиль між кронштейном дзвона і лінійними валами направляючих, які присутні в результаті неточностей встановлення лінійного вала. В результаті забезпечується рівномірний рух дзвона при пропусканні контрольного об'єму і стабільний тиск під дзвоном, що в свою чергу забезпечує точне відтворення контрольного об'єму та об'ємної витрати газу. До відмінності роботи дзвона також належить те, що вал датчика переміщення дзвона встановлений на одній осі з валом вхідного шківів, через який тросом передається переміщення дзвона, тобто інформація по переміщенню дзвона передається безпосередньо на датчик переміщення, чим і забезпечується висока точність відтворення контрольного об'єму.

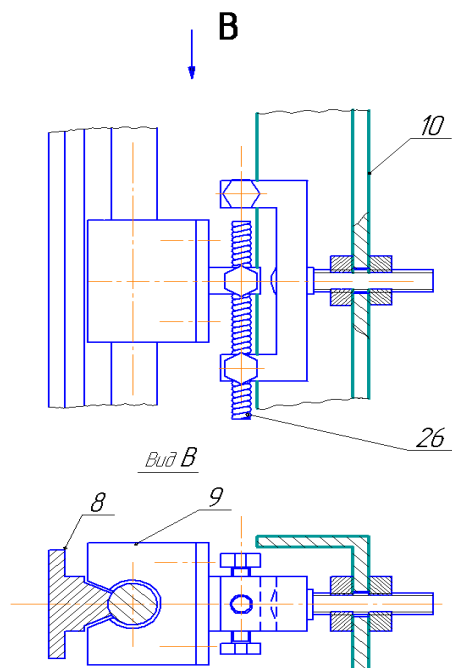


Рисунок 2 – Вертикальні направляючі елементи у вигляді лінійного валу з лінійними підшипниками

Загальний вигляд державного еталона ДЕТУ 03-01-15 приведено на рисунку 3.



Рисунок 3 – Державний первинний еталон одиниці об'єму та об'ємної витрати газу ДЕТУ 03-01-96

На основі проведених удосконалень внесені зміни в методу калібрування еталону, а саме уточнено рівняння вимірювань об'єму та об'ємної витрати газу з врахуванням додаткового об'єму замкової рідини.

Рівняння вимірювань для визначення мірного об'єму має такий вигляд:

$$V = H \left[S_3 + \frac{S_D \cdot S_{PB}}{S_{PB} + S_{P3}} \right] = \frac{H\pi}{4} \left[D_{3B}^2 + \frac{4l_3 D_{3B} + l_3}{1 + \frac{L_1/\pi - 2l_1^2 - D_{3B} + l_3^2}{D_{3B}^2 - (D_{2B} + 2l_2)^2}} \right], \quad (1)$$

де S_1 - площа поперечного перерізу (внутрішнього круга) корпусу,

$$S_1 = \frac{\pi D_{1B}^2}{4} = \frac{\pi(D_{13} - 2l_1)^2}{4} = \frac{\pi L_1/\pi - 2l_1^2}{4}; \quad D_{1B} \text{ та } D_{13} - \text{внутрішній та зовнішній діаметри корпусу, відповідно; } L_1 - \text{зовнішній периметр корпусу; } l_1 - \text{товщина стінки корпусу; } S_2 - \text{площа поперечного перерізу (зовнішнього}$$

круга) витіснювача, $S_2 = \frac{\pi D_{23}^2}{4} = \frac{\pi(D_{2B} - 2l_2)^2}{4};$ D_{23} - зовнішній діаметр витіснювача; D_{2B} - внутрішній діаметр витіснювача; l_2 - товщина стінки витіснювача; S_3 - площа поперечного січення (внутрішнього круга) дзвона, -

$$S_3 = \frac{\pi D_{3B}^2}{4}, \quad D_{3B} - \text{внутрішній діаметр дзвона; } S_D - \text{площа поперечного січення стінки дзвона;}$$

$S_D = \frac{\pi D_{33}^2}{4} - \frac{\pi D_{3B}^2}{4} = \frac{\pi D_{3B} + 2l_3^2}{4} - \frac{\pi D_{3B}^2}{4},$ S_{PB} - площа внутрішньої поверхні замкової рідини, $S_{PB} = S_3 - S_2 = \frac{\pi D_{3B}^2}{4} - \frac{\pi D_{2B} + 2l_2^2}{4};$ S_{P3} - площа зовнішньої поверхні замкової рідини,

$$S_{P3} = S_1 - \frac{\pi D_{33}^2}{4} = \frac{\pi \left(\frac{L_1}{\pi} - 2l_1 \right)^2}{4} - \frac{\pi D_{3B} + 2l_3^2}{4}.$$

Розрахунок НСП та СКВ державного еталона проведено згідно [10], відповідно, до

якого НСП відтворення еталонною одиницею фізичної величини обчислюють за формулою:

$$\Theta = \pm K \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial F}{\partial Y_i} \Delta Y_i \right)^2}, \quad (2)$$

де k - коефіцієнт залежності НСП від вибраної ймовірності при їх рівномірному розподілі, ΔY_i - НСП вимірювання величини Y_i ; $\frac{\partial F}{\partial Y_i}$ -

коефіцієнти впливу величини Y_1 на величину F , що виражається частковою похідною функції:

$$F = f(Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n). \quad (3)$$

СКВ відтворення еталонною одиницею фізичної величини обчислюють за формулою

$$S = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial Y_1} \right)^2 S_1^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial Y_2} \right)^2 S_2^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial Y_n} \right)^2 S_n^2}, \quad (4)$$

де $S_{x1} \dots S_{xn}$ - СКВ результатів вимірювань величин $Y_1 \dots Y_n$ і при прямих вимірювань з багатьма спостереженнями обчислюють за формулою

$$S_i = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n(n-1)}}, \quad (5)$$

де Y_i - результат i -го спостереження, \bar{Y} - середнє арифметичне результатів вимірювань, n - число спостережень.

Коефіцієнти впливу по кожному вимірюваному параметру еталону об'єму та об'ємної витрати газу визначають шляхом диференціювання алгоритму, що описує зміну об'єму під дзвоном від вище наведених та вимірюваних параметрів.

$$\frac{\partial V}{\partial H} = \frac{\pi A}{4};$$

$$\frac{\partial V}{\partial l_1} = - \frac{\pi \cdot l_3 \cdot D_{3B} - l_3 \cdot \left(8l_1 - 4 \frac{L_1}{\pi} \right) H}{B^2 \cdot D};$$

$$\frac{\partial V}{\partial L_1} = - \frac{2 \cdot l_3 \cdot H \cdot D_{3B} - l_3 \cdot \left(\frac{L_1}{\pi} - 2 \cdot l_1 \right)}{B^2 \cdot D};$$

$$\frac{\partial V}{\partial l_2} = \frac{H \cdot \pi \cdot l_3 \cdot D_{3B} - l_3 \cdot C \cdot (-4 \cdot D_{2B} - 8 \cdot l_2)}{B^2 \cdot D^2};$$

$$\frac{\partial V}{\partial D_{2B}} = \frac{H \pi l_3 D_{3B} - l_3 C (-2 D_{2B} - 4 l_2)}{B^2 D^2};$$

$$\frac{\partial V}{\partial l_3} = H \frac{\pi}{4} \left(\frac{8l_3 - 4D_{3B} + \frac{4 D_{3B} - l_3 - 4l_3}{B}}{+ \frac{4l_3 C D_{3B} - l_3 \cdot 8l_3 - 4D_{3B}}{B^2 D^2}} \right);$$

$$\frac{\partial V}{\partial D_{3B}} = H \frac{\pi}{4} \left(\frac{\frac{2 D_{3B} - 2l_3}{\pi} + \frac{4l_3}{\pi B}}{+ \frac{4l_3 D_{3B} - l_3}{B^2} \left[\frac{2D_{3B}}{\pi^2 D} + \frac{2C D_{3B} - 2l_3}{\pi D^2} \right]} \right).$$

Таким чином НСП відтворення одиниці об'єму газу розраховується за наступною формулою:

$$\Theta_V = \pm 1,1 \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial H} \Theta_{H_{PE}} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial D_{3B}} \Theta_{D_{PE}} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial l_3} \Theta_{l_{PE}} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial D_{2B}} \Theta_{D_{PE}} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial l_1} \Theta_{L_{PE}} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial l_2} \Theta_{l_{PE}} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial l_1} \Theta_{l_{PE}} \right)^2}, \quad (6)$$

де $\Theta_{L_{PE}}, \Theta_{l_{PE}}, \Theta_{H_{PE}}, \Theta_{D_{PE}}$ – похибки засобів виміральної техніки, що застосовуються при метрологічному контролю відповідних геометричних розмірів державного еталона.

НСП відтворення одиниці об'єму газу складається із:

1) похибки вимірювання периметру корпусу та дзвона ΔL_{PE} , яка рівна ціні поділки мікроскопа МПБ (0,05 мм);

2) похибки вимірювання товщини стінки корпусу Δl_{PE} , яка рівна похибці ультразвукового товщиноміра УТ-31 (0,01 мм);

3) похибки вимірювання переміщення ΔH_{PE} , яка визначається похибкою мікроскопа універсального (0,01 мм), що застосовуються при ДМА системи переміщення дзвону;

4) похибки вимірювання діаметра витіснювача ΔD_{PE} , яка визначається похибкою нутроміра (0,025 мм).

СКВ відтворення одиниці об'єму газу розраховується за наступною формулою:

$$S_V = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial H} S_H \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial D_{3B}} S_{D_{3B}} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial l_3} S_{l_3} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial D_{2B}} S_{D_{2B}} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial l_1} S_{l_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial l_2} S_{l_2} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial l_1} S_{l_2} \right)^2}, \quad (7)$$

де $S_H, S_{l_1}, S_{l_2}, S_{D_{2B}}, S_{l_3}, S_{D_{3B}}, S_{l_2}$ – максимальне значення оцінки СКВ результатів вимірювання відповідних параметрів.

Згідно закону газового стану, об'єм, що передається на вхід досліджуваного ЗВТ об'єму газу, обчислюють за формулою:

$$V = V_0 \cdot \frac{P_0 \cdot T}{P \cdot T_0}, \quad (8)$$

де $V_0; P_0; T_0$ – значення об'єму, тиску та температури під дзвоном; $V; P; T$ – значення об'єму, тиску та температури перед досліджуванним ЗВТ об'єму газу.

Для обчислення НСП та СКВ передачі розміру одиниці об'єму газу розраховують коефіцієнти впливу, що є похідними об'єму по змінним $V_0; P_0; T_0; P; T$.

$$\frac{\partial V}{\partial V_0} = \frac{P_0 T}{P T_0}, \quad \frac{\partial V}{\partial P_0} = \frac{V_0 T}{P T_0}, \quad \frac{\partial V}{\partial P} = -\frac{V_0 P_0 T}{P^2 T_0},$$

$$\frac{\partial V}{\partial T_0} = \frac{-V_0 P_0 T}{P T^2}, \quad \frac{\partial V}{\partial T} = \frac{V_0 P_0}{P T_0}.$$

Таким чином НСП передачі розміру одиниці об'єму газу розраховують за наступною формулою:

$$\Theta_{PV} = \pm 1,1 \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial V_0} \Theta_V \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial P_0} \Theta_{P_{PE}} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial P} \Theta_{P_{PE}} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial T_0} \Theta_{T_{PE}} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial T} \Theta_{T_{PE}} \right)^2}, \quad (9)$$

де Θ_V – НСП відтворення одиниці об'єму газу, $\Theta_{P_{PE}}, \Theta_{T_{PE}}$ – похибки ЗВТ, що використовувались при МА відповідних вимірвальних каналів.

СКВ передачі розміру одиниці об'єму газу розраховують за наступною формулою:

$$S_{PV} = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial V_0} \right)^2 S_V^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial P_0} \right)^2 S_{P_0}^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)^2 S_P^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial T_0} \right)^2 S_{T_0}^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)^2 S_T^2 + \Delta^2_{v_{XT}} + \Delta^2_{v_p}}, \quad (10)$$

НСП та СКВ відтворення одиниці об'ємної витрати газу розраховують для мінімальної та максимальної витрат, що відтворюються державним еталоном. Об'ємну витрату газу в загальному вигляді обчислюють за формулою:

$$q = V/t, \quad (11)$$

де V – об'єм газу, м³; t – час протікання даного об'єму газу за даної витрати, с. НСП відтворення державним еталоном одиниці

об'ємної витрати газу

$$\Theta_q = 1,1 \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial q}{\partial V} \cdot \Theta_V\right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial t} \cdot \Delta t_q\right)^2}, \quad (12)$$

де $\frac{\partial q}{\partial V}$ та $\frac{\partial q}{\partial t}$ – коефіцієнти впливу; Θ_V – НСП відтворення державним первинним еталоном одиниці об'єму газу; Δt_q – похибка вимірювання часу частотоміром-хронометром, с.

СКВ відтворення державним еталоном одиниці об'ємної витрати:

$$S_q = \sqrt{\left(\frac{\partial q}{\partial t} \cdot S_t\right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial V} \cdot S_V\right)^2}, \quad (13)$$

де S_V – СКВ відтворення державним еталоном одиниці об'єму газу, S_t – СКВ результатів вимірювання часу, с.

У формулі (17) коефіцієнти впливу $\frac{\partial q}{\partial V}$ та $\frac{\partial q}{\partial t}$ обчислюють як похідні функції за параметрами V і t :

$$\frac{\partial q}{\partial V} = \frac{1}{t}, \quad \frac{\partial q}{\partial t} = -\frac{V}{t^2}.$$

Таким чином НСП передачі розміру одиниці об'ємної витрати:

$$\Theta_{\Pi q} = 1,1 \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial q}{\partial V} \cdot \Theta_{\Pi V}\right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial t} \cdot \Delta t_q\right)^2}, \quad (14)$$

СКВ передачі розміру одиниці об'ємної витрати газу:

$$S_{\Pi q} = \sqrt{\left(\frac{\partial q}{\partial t} \cdot S_t\right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial V} \cdot S_{\Pi V}\right)^2}, \quad (15)$$

Розрахунок невизначеності вимірювання відтворення та передавання значень розмірів одиниць об'єму та об'ємної витрати газу державним первинним еталоном проводився з урахуванням результатів вимірювань, отриманих під час проведення його метрологічної атестації, відповідно до вимог ДСТУ–Н РМГ 43:2006. Для розрахунку невизначеності вимірювання по типу В приймається рівномірний закон розподілу вимірних величин, для розширеної невизначеності для довірчої ймовірності $p = 0,95$ приймається коефіцієнт охоплення $k = 2$ згідно ДСТУ 3231:2007.

При оцінці невизначеності вимірювання

геометричних параметрів державного первинного еталона, які є впливовими величинами при відтворенні одиниці об'єму газу та фізичних параметрів (тиск, температура та час), які є впливовими величинами при передаванні одиниць об'єму та об'ємної витрати газу приймається, що отримані чисельні значення СКВ відповідних вимірних параметрів рівні значенню невизначеності вимірювання по типу А:

$$u_{Ax} = S_x, \quad (16)$$

де x – позначення вимірної фізичної величини згідно пункту даної статті.

Відповідно, невизначеність вимірювання по типу В з врахуванням рівномірного закону розподілу при розрахунку для вимірних значень фізичних величин буде визначатися як:

$$u_{Bx} = \frac{\Theta_x}{\sqrt{3}}, \quad (17)$$

де x – позначення вимірної фізичної величини згідно пункту даної методики.

Рівняння вимірювання, що описує процес відтворення розміру одиниці об'єму газу описується вищенаведеною методикою. Отже стандартна невизначеність вимірювання по типу А при відтворенні державним еталоном розміру одиниці об'єму газу визначається з урахуванням СКВ відтворення одиниці об'єму газу, яка описується формулою (7), відповідно:

$$u_{AV} = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial H} u_{AH}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial D_{3B}} u_{AL_3}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial l_3} u_{Al_3}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial l_2} u_{Al_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial L_1} u_{AL_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial l_1} u_{Al_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial D_{2B}} u_{AD_{2B}}\right)^2}, \quad (18)$$

де u_{AH} , u_{Al_1} , u_{AL_1} , $u_{AD_{2B}}$, u_{Al_3} , $u_{AD_{3B}}$, u_{Al_2} – максимальні значення оцінки невизначеності вимірювання по типу А результатів вимірювання відповідних параметрів.

Невизначеність вимірювання по типу В при відтворенні державним еталоном розміру одиниці об'єму газу визначається з урахуванням НСП відтворення одиниці об'єму газу (6) і розраховується як:

$$u_{BV} = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial H} u_{BH_{PE}}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial L_3} u_{BL_{PE}}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial l_3} u_{Bl_{PE}}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial D_{2B}} u_{BD_{PE}}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial L_1} u_{BL_{PE}}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial l_2} u_{Bl_{PE}}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial l_1} u_{Bl_{PE}}\right)^2}, \quad (19)$$

де $u_{BH_{PE}}$, $u_{BL_{PE}}$, $u_{Bl_{PE}}$, $u_{BD_{PE}}$ – невизначеність

вимірювання по типу В засобів вимірювальної техніки, що застосовуються при атестації відповідних геометричних параметрів державного первинного еталона.

Сумарна невизначеність вимірювання при відтворенні одиниці об'єму газу державним первинним еталоном визначається як:

$$u_{CV} = \sqrt{u_{AV}^2 + u_{BV}^2}. \quad (20)$$

Таким чином, розрахунок розширеної невизначеності вимірювання при відтворенні одиниці об'єму газу державним первинним еталоном з урахуванням значення сумарної невизначеності у відносному вираженні матиме наступний вигляд:

$$U_V = \frac{k \cdot u_{CV}}{V} \cdot 100, \quad (21)$$

де V – контрольний відтворюваний об'єм державного первинного еталона.

Проводити розрахунок розширеної невизначеності вимірювання при відтворенні одиниці об'єму газу державним первинним еталоном необхідно для усіх значень контрольного відтворюваного об'єму.

Наступним етапом проводиться розрахунок невизначеності вимірювання при передаванні розмірів одиниць об'єму та об'ємної витрати газу державним первинним еталоном. Відповідно, рівняння вимірювання стану газу при передаванні одиниці об'єму газу описане в даній методиці формулою (8). Таким чином, невизначеність вимірювання по типу А при передаванні державним еталоном розміру одиниці об'єму газу визначається з врахуванням формули (15) для розрахунку СКВ передавання розміру одиниці об'єму газу і складе:

$$u_{AV} = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial V_o}\right)^2 u_{AV}^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial P_o}\right)^2 u_{AP}^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)^2 u_{AP}^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial T_o}\right)^2 u_{AT}^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)^2 u_{AT}^2}, \quad (22)$$

де u_{AV} – невизначеність вимірювання по типу А при відтворенні державним еталоном розміру одиниці об'єму газу (18); u_{AP} , u_{AT} – невизначеність по типу А вимірювання параметрів тиску та температури.

Невизначеність вимірювання по типу В при передаванні державним еталоном розміру одиниці об'єму газу визначається з врахуванням формули розрахунку НСП (14):

$$u_{BIV} = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial V_o} u_{BV}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial P_o} u_{BPPE}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial P} u_{BPPE}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial T_o} u_{BTPE}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial T} u_{BTPE}\right)^2 + u_{V_{\Delta T}}^2 + u_{V_P}^2}, \quad (23)$$

де u_{BV} – невизначеність вимірювання по типу В при відтворенні державним еталоном розміру одиниці об'єму газу (26); u_{BPPE} , u_{BTPE} – невизначеність по типу В вимірювання параметрів тиску та температури; $u_{V_{\Delta T}}$, u_{V_P} – невизначеність по типу В, викликана нестабільністю значень тиску та температури у підзвоновому просторі.

Відповідно, сумарна невизначеність вимірювання при передаванні одиниці об'єму газу державним первинним еталоном визначається як:

$$u_{СПП} = \sqrt{u_{АПП}^2 + u_{ВПП}^2}. \quad (24)$$

Розширена невизначеність вимірювання при передаванні одиниці об'єму газу державним первинним еталоном з урахуванням значення сумарної невизначеності у відносному вираженні матиме наступний вигляд:

$$U_{ПВ} = \frac{k \cdot u_{СПП}}{V_{П}} \cdot 100, \quad (25)$$

де $V_{П}$ – контрольний об'єм державного первинного еталона, який передається лічильнику газу.

Проводити розрахунок розширеної невизначеності вимірювання при передаванні одиниці об'єму газу державним первинним еталоном необхідно для усіх значень контрольного об'єму, який передається лічильнику газу.

Рівняння вимірювання при відтворенні та передаванні розміру одиниці об'ємної витрати газу описане формулою (7).

Невизначеність вимірювання по типу А при відтворенні державним еталоном розміру одиниці об'ємної витрати газу визначається з урахуванням СКВ відтворення одиниці об'ємної витрати газу згідно формули (13):

$$u_{Aq} = \sqrt{\left(\frac{\partial q}{\partial t} \cdot u_{At}\right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial V} \cdot u_{AV}\right)^2}, \quad (26)$$

де u_{AV} – невизначеність вимірювання по типу А при відтворенні державним первинним

еталоном розміру одинці об'єму газу (20); u_{At} – невизначеність по типу А результатів вимірювання часу.

Невизначеність вимірювання по типу В при відтворенні державним первинним еталоном розміру одинці об'ємної витрати газу визначається з врахуванням формули розрахунку НСП (19):

$$u_{Bq} = \sqrt{\left(\frac{\partial q}{\partial V} \cdot u_{BV}\right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial t} \cdot u_{Bt}\right)^2}, \quad (27)$$

де u_{BV} – невизначеність вимірювання по типу В при відтворенні державним первинним еталоном розміру одинці об'єму газу (27); u_{Bt} – невизначеність по типу В результатів вимірювання часу частотоміром-хронометром.

Сумарна невизначеність вимірювання при відтворенні одиниці об'ємної витрати газу державним первинним еталоном рівна:

$$u_{Cq} = \sqrt{u_{Aq}^2 + u_{Bq}^2} \quad (28)$$

Розширена невизначеність вимірювання при відтворенні одиниці об'ємної витрати газу державним первинним еталоном з урахуванням значення сумарної невизначеності у відносному вираженні матиме наступний вигляд:

$$U_q = \frac{k \cdot u_{Cq}}{q} \cdot 100, \quad (29)$$

де q – значення об'ємної витрати газу, яке відтворюється державним первинним еталоном.

Проводити розрахунок розширеної невизначеності вимірювання при відтворенні одиниці об'ємної витрати газу державним первинним еталоном необхідно для максимального та мінімального значень об'ємної витрати газу, які відтворюються державним первинним еталоном.

Наступним етапом буде розрахунок невизначеності передавання розміру одиниці об'ємної витрати газу державним первинним еталоном.

Невизначеність вимірювання по типу А при передаванні державним еталоном розміру одинці об'ємної витрати газу визначається з урахуванням СКВ передавання одиниці об'ємної витрати газу згідно формули (17):

$$u_{AIV} = \sqrt{\left(\frac{\partial q}{\partial t} \cdot u_{At}\right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial V} \cdot u_{AIV}\right)^2}, \quad (30)$$

де u_{AIV} – невизначеність вимірювання по типу

А при передаванні державним первинним еталоном розміру одинці об'єму газу; u_{At} – невизначеність по типу А результатів вимірювання часу.

Невизначеність вимірювання по типу В при передаванні державним первинним еталоном розміру одинці об'ємної витрати газу визначається з врахуванням формули розрахунку НСП:

$$u_{BIV} = \sqrt{\left(\frac{\partial q}{\partial V} \cdot u_{BIV}\right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial t} \cdot u_{Bt}\right)^2}, \quad (31)$$

де u_{BIV} – невизначеність вимірювання по типу В при передаванні державним первинним еталоном розміру одинці об'єму газу; u_{Bt} – невизначеність по типу В результатів вимірювання часу частотоміром-хронометром.

Сумарна невизначеність вимірювання при передаванні одиниці об'ємної витрати газу державним первинним еталоном рівна:

$$u_{CIV} = \sqrt{u_{AIV}^2 + u_{BIV}^2}. \quad (32)$$

Розширена невизначеність вимірювання при передаванні одиниці об'ємної витрати газу державним первинним еталоном з урахуванням значення сумарної невизначеності у відносному вираженні матиме наступний вигляд:

$$U_{IV} = \frac{k \cdot u_{CIV}}{q} \cdot 100. \quad (33)$$

Проводити розрахунок розширеної невизначеності вимірювання при відтворенні одиниці об'ємної витрати газу державним первинним еталоном необхідно для максимального та мінімального значень об'ємної витрати газу, які відтворюються державним первинним еталоном.

З множини отриманих значень розширеної невизначеності вимірювання при відтворенні та передаванні одиниць об'єму та об'ємної витрати газу державним первинним еталоном за кінцеве значення приймається максимальне значення, яке заноситься в паспорт державного первинного еталона та журнал обробки результатів вимірювань.

Результати проведених досліджень і робіт з удосконалення еталона об'єму газу, на основі висновків отриманих міжвідомчою комісією у складі провідних фахівців представників Мінекономрозвитку України (м.Київ), Національного університету "Львівська політехніка" (м.Львів), Національного Наукового Центру "Інститут метрології"

(м.Харків), ДП"Науково-дослідний інститут метрології вимірювальних управляючих систем" (м.Львів), Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу провела як документальне, так і візуальне оцінювання змін у метрологічних характеристиках еталона, змін у елементах еталона, що проходили удосконалення, модернізацію, використовуюваному програмному забезпеченні. За результатами роботи комісія прийняла рішення щодо затвердження удосконаленого еталона, використання якого в подальшому дасть можливість підвищити точність обліку газу в Україні.

Отримані результати дослідження характеристик державного еталона ДЕГУ за підсумками роботи державної комісії приведені в таблиці 1. Нестабільність еталона за рік становить $1 \cdot 10^{-5}$ ($1 \cdot 10^{-3} \%$).

Програмне забезпечення еталона об'єму газу дзвоного типу дозволяє провести збирання вимірювальної інформації в динамічному режимі, виконати її оброблення та розрахунок характеристик досліджуваних засобів

вимірювання, а також використовувати ці результати для складання протоколів дослідження в різних стандартних форматах (рис. 4). Крім того забезпечує автоматизоване управління еталоном об'єму газу в процесі вимірювальних операцій.

ВИСНОВОК

Науково-технічний рівень еталона відповідає сучасним досягненням розвитку національної та світової науки і техніки в галузі витрати природного газу. За своїми метрологічними і технічними характеристиками еталон не поступається кращим зарубіжним аналогам. Точність відтворення одиниць об'єму та об'ємної витрати газу і точність передавання їх розмірів відповідно до ДСТУ 3383:2015 за допомогою вторинних і робочих еталонів робочим засобам вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу, які застосовують в Україні, відповідають вимогам національної економіки.

Таблиця 1 - Результати дослідження еталона об'єму газу

№	Характеристики	До удосконалення	Після удосконалення
1	Діапазони значень, у яких відтворюють одиниці вимірювання: - об'єму газу - об'ємної витрати газу	від 0,4 м ³ до 1,0 м ³ від $2,77 \cdot 10^{-4}$ м ³ /с до $6,94 \cdot 10^{-2}$ м ³ /с.	від 0,4 м ³ до 1,0 м ³ від $2,77 \cdot 10^{-4}$ м ³ /с до $6,94 \cdot 10^{-2}$ м ³ /с.
2	Відтворення одиниць вимірювання із середнім квадратичним відхилом результату вимірювання за 40 незалежних спостережень який не перевищує для: - об'єму газу - об'ємної витрати газу	$3,5 \cdot 10^{-4}$ $4,0 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$; $2,5 \cdot 10^{-4}$;
3	Невилучена систематична похибка не перевищує для: - об'єму газу - об'ємної витрати газу	$6,0 \cdot 10^{-4}$ $5,7 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-4}$; $4,0 \cdot 10^{-4}$;
4	Невизначеність вимірювання: -об'єму газу за типом А - -за типом В - -сумарна стандартна невизначеність - -розширена невизначеність (0,07%) з коефіцієнтом охоплення $K = 2$ та довірчою ймовірністю $P = 0,95$ - об'ємної витрати газу за типом А - -за типом В - -сумарна стандартна невизначеність - - розширена невизначеність (0,07%) з коефіцієнтом охоплення $K = 2$ та довірчою ймовірністю $P = 0,95$ -	$U_V = 1 \cdot 10^{-3}(0,1\%)$ $U_V = 1 \cdot 10^{-3}(0,1\%)$	$u_{AV} = 2,5 \cdot 10^{-4}$ $u_{BV} = 2,3 \cdot 10^{-4}$ $u_{CV} = 3,5 \cdot 10^{-4}$ $U_V = 7 \cdot 10^{-4}(0,07\%)$ $u_{Aq} = 2,5 \cdot 10^{-4}$ $u_{Bq} = 2,3 \cdot 10^{-4}$, $u_{Cq} = 3,5 \cdot 10^{-4}$; $U_q = 7,0 \cdot 10^{-4}(0,07\%)$

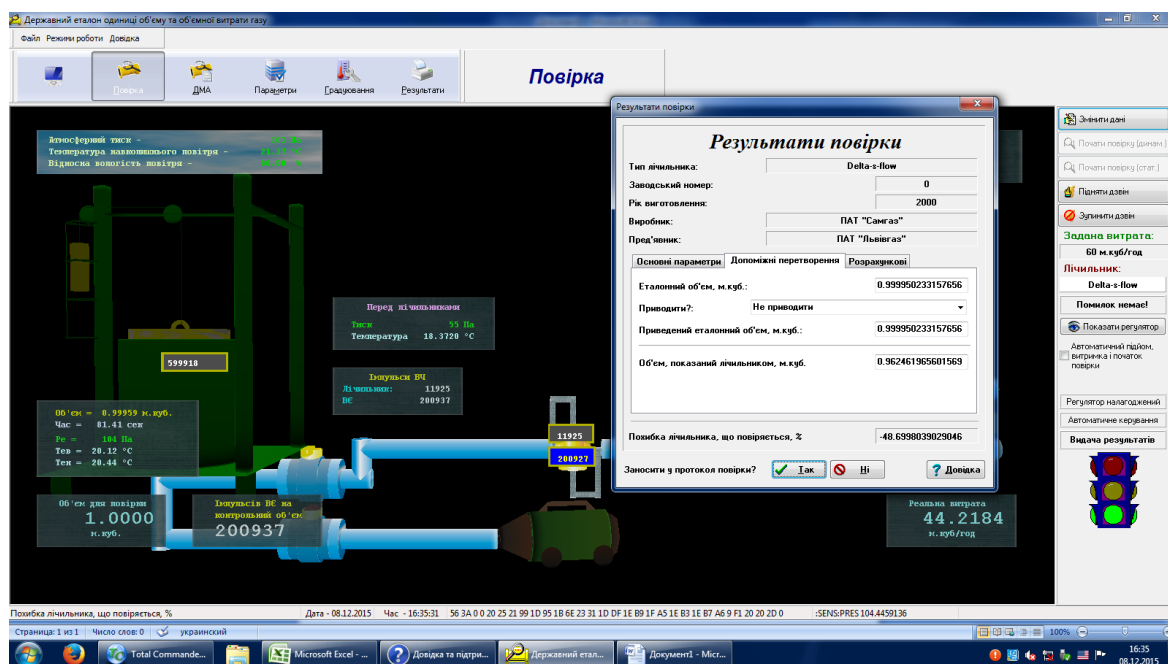


Рисунок 4 – Мнемосхема програмного забезпечення державного первинного еталона одиниці об'єму та об'ємної витрати газу ДЕТУ 03-01-96

Література

1. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» [від 11.02.98 р. № 113: у редакції від 15.06.04 р. № 1765-IV] // Відомості Верховної Ради України. – Офіц. вид. – К. : Парлам. вид-во. – 2004. – № 37. – Ст. 449. – С. 1434-453

2. Петришин І. С. Технічне забезпечення звіряння еталонів об'єму та об'ємної витрати газу / І. С. Петришин, О. Є. Середюк // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах : міжнар. наук.-техн. журнал. – 2001. – № 1. – С. 49-51.

3. Петришин І. С. Методологія звіряння еталонів об'єму і об'ємної витрати газу / І. С. Петришин, О. Є. Середюк // Транспортування, контроль якості та облік енергоносіїв : матер. міжнар. наук.-практ. конфер., м. Львів, 26-29 листопада 1997 р. – Львів, 1998. – С. 206–212.

4. Петришин І.С., Безгачнюк Я.В., Середюк Д.О. Впровадження еталонів передавання в повір очну практику засобів вимірювальної техніки об'єму та об'ємної витрати газу//Український метрологічний журнал. – 2006. – с. 55-59.

5. Петришин І.С., Джочко П.Я., Середюк Д.О., Безгачнюк Я.В. Міждержавні звіряння еталонів одиниць об'єму та об'ємної витрати газу в рамках проекту КОМЕТ 219/SK/00 //Український метрологічний журнал. – 2009,

№3. –с. 41-45.

6. Пристрій для калібрування, метрологічної атестації та повірки сопел критичного витоку. Патент України № 61881, G01F 25/00. / Петришин І.С., Джочко П.Я., Середюк Д.О., Безгачнюк Я.В.. - Бюл. №14, 2011 р.

7.Робочий еталон об'єму газу дзвоного типу, патент України № 60147, G01F 25/00. / Воцинський В.С., Бієнко О.В., Воцинський В.В. -Бюл. №9, 2003 р.

8. Робочий еталон об'єму газу дзвоного типу, патент України № 46253, G01F 25/00. / Воцинський В.С., Воцинський В.В., Іроденко В.В., Лука М.М. - Бюл. № 5, 2002 р.

9. Робочий еталон об'єму газу дзвоного типу, патент України № 76283, G01F 25/00. / Воцинський В.С., Бієнко О.В., Воцинський В.В. - Бюл. № 7, 2006 р.

10. ДСТУ ГОСТ 8.381:2008. Державна система забезпечення єдності вимірювань. Еталони. Способи вираження похибок (ГОСТ 8.381-80)

Поступила в редакцію 18.06.2016 р.

Рекомендували до друку:
докт. техн. наук, проф. Середюк О. Є.,
докт. техн. наук, проф. Костишин В. С.