

УДК 658.562:681.121

ВТОРИННИЙ ЕТАЛОН ОДИНИЦЬ ОБ'ЄМУ ТА ОБ'ЄМНОЇ ВИТРАТИ ГАЗУ В ДІАПАЗОНІ МІКРОВИТРАТ НА БАЗІ УСТАНОВКИ ЕКВІВАЛЕНТНОГО ВИТІСНЕННЯ РІДИНИ

І. Петришин, доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник;

Т. Присяжнюк, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник;

О. Бас, науковий співробітник,

ДП «Івано-Франківськстандартметрологія»

Представлено розроблені фізична, математична та метрологічна моделі вторинного еталона об'єму та об'ємної витрати газу в діапазоні мікровитрат. Для його створення за умов обмежених фінансових ресурсів застосовано адаптивну технологію побудови еталонів. З метою фізичної реалізації еталона обрано установку еквівалентного витіснення рідини. Проведено ряд ітеративних удосконалень фізичної моделі, реалізація яких дала можливість усунути більшість недоліків типової конструкції установки. На основі математичної моделі встановлено основні джерела невизначеності вимірювань.

The paper describes the developed physical, mathematical and metrological models secondary standards gas volume and volume flow rate in the range of microrates. To create a standards in terms of financial resources applied adaptive technology of standards. In order physical implementation of standard selected equivalent displacement liquid prover. A number of iterative improvements of the physical model, whose implementation has enabled to eliminate most of the shortcomings of typical construction installation. On the basis of mathematical model established the main sources of uncertainty.

Ключові слова: вторинний еталон, мікровитрати, установка еквівалентного витіснення, дивертор, невизначеність.

Keywords: secondary standard, microflowrates, equivalent fluid displacement prover, diverter, uncertainty.

Зважаючи на невинну тенденцію зростання вартості природного газу, а також на те, що значна частина його споживання за сучасних умов мінімізації витрат промислових споживачів припадає на комунально-побутову сферу, питання достовірності та точності обліку побутовими лічильниками газу в діапазоні мінімальних витрат вимагає до себе підвищеної уваги. Крім того, вимірювання витрат газів в діапазоні від $2,78 \cdot 10^{-7}$ м³/с (1 л/год) необхідне за проведення метрологічної атестації газоаналітичних засобів вимірювальної техніки, виготовлення газових сумішей, повірки та калібрування ламінарних та інших типів витратомірів, у технологічних процесах наплення та епітаксії. Малі витрати газів також контролюються за автоматизації технологічних процесів у хімічній, фармацевтичній та електронній галузях промисловості.

Необхідно відзначити, що на сьогодні установки для повірки лічильників газу не мають можливості отримати одиниці об'єму та об'ємної витрати газу в діапазоні мікровитрат від первинного або вторинних еталонів, оскільки попередня редакція державної повірочної схеми [1] регламентує процедуру передавання одиниці об'ємної витрати від нижньої межі $4,44 \cdot 10^{-6}$ м³/с (16 л/год). Створення вторинного еталона в діапазоні мікровитрат необхідне для можливості проведення міжнародних звірень з іншими країнами, які мають еталони в діапазоні мікровитрат [2],



І. Петришин



Т. Присяжнюк



О. Бас

та розширення кількості СМС-рядків вимірювання одиниці об'ємної витрати газу в базі даних Міжнародного Бюро з мір та вагів.

У ДП «Івано-Франківськстандартметрологія» тому й розроблено технічне завдання на створення вторинного еталона одиниць об'єму газу від 0,003 до 0,016 м³ та об'ємної витрати газу в діапазоні від $2,78 \cdot 10^{-7}$ до $8,33 \cdot 10^{-5}$ м³/с (від 1 до 300 л/год). Верхню межу одиниці об'ємної витрати вибрано з метою забезпечення можливості проведення повірки та калібрування еталонних лічильників барабанного типу, які використовуються в складі установок для повірки побутових лічильників газу.

Щодо питання технічної реалізації еталона, то, з досвіду створення в ДП «Івано-Франківськстандартметрологія» вторинного еталона на базі установки еквівалентного витіснення рідини [3, 4], прийнято рішення взяти за основу аналогічний тип установки. Принцип дії такої установки передбачає використання опосередкованого методу вимірювання об'ємної витрати газу, який полягає в тому, що процес здійснюється через вимірювання одиниць маси і часу, які на певний момент можуть бути вимірені з високою точністю у широкому діапазоні.

Зважаючи на апріорно обмежені фінансові ресурси, постало питання створення вторинного еталона з точністю на рівні кращих міжнародних зразків із застосуванням нових методів та технологій за умов мінімізації економічних витрат. З цією метою застосовано так званий адаптивний метод та технологію побудови еталонів [5]. Суть методу полягає в такому: на основі апріорної інформації, отриманої за результатами аналізу наукових досягнень у певному напрямку досліджень, обирають принцип відтворення одиниць вимірювання та формують базову структурну схему еталона. Методом ітеративного удосконалення структурної, функціональної та принципової схем еталона розробляють його фізичну модель, на основі якої формується математична модель (рівняння вимірювання) і встановлюються джерела невизначеності та її межі.

Для розроблення фізичної моделі вторинного еталона проаналізовано принцип дії установки для відтворення значення об'ємної витрати газу методом еквівалентного витіснення рідини, який полягає у зважуванні маси рідини, яка витісняється еквівалентним об'ємом газу, який пройшов через засіб вимірювання, що повіряється або калібрується. При цьому визначення об'ємної витрати газу проводиться з урахуванням густини рідини та часу її витіснення. Попередній аналіз показав [6], що для установок такого типу залишається проблемою стабіль-

ність відтворення одиниці об'ємної витрати за рахунок зміни гідростатичного тиску рівня стовпа рідини, що витікає, а також обмежений діапазон відтворення витрати. Крім того, зміна рівня рідини в ємності нелінійно впливає на зміну об'ємної витрати. Для виключення цього впливу в установках такого типу застосовується або регулятор витрати [4], або стабілізатор рівня за умови використання ємності з умовно нескінченим діаметром [7].

У процесі розроблення вдосконаленої конструкції установки еквівалентного витіснення рідини авторами запропоновано ефективний метод виключення впливу зміни гідростатичного тиску стовпа рідини під час проведення заміру — стабілізацію рівня рідини у проміжній ємності за допомогою вертикальної трубки стабільного рівня з конусним розширенням у верхній частині. За проектування проливних установок для повірки лічильників води вимогу встановлення ємності зі стабільним рівнем внесено до переліку обов'язкових технічних умов [8]. У ході реалізації в установці еквівалентного витіснення рідини ємності стабільного рівня виникають певні труднощі, оскільки верхня ємність повинна бути герметичною, оскільки за час проведення повірки до неї повинен потрапити об'єм повітря, що пройшов через лічильник газу. Зважаючи на ряд обмежень, технічна реалізація ємності стабільного рівня, запропонована авторами, полягала у застосуванні встановленого в системі циклічного замкненого контура забору мастила з проміжної ємності та подавання його до зливного трубопроводу (рис. 1). Причому цей внутрішній контур має ряд переваг, за його застосування здійснюється безперервна фільтрація мастила в системі та зменшення вертикального градієнта температури за висотою установки. Замкнений контур розроблено як кільцевий трубопровід, вхід і вихід якого розташовані у проміжній ємності; для перекачування мастила встановлено комплект насосів та мастильних фільтрів, а для зменшення градієнта температури — теплообмінник 10 з примусовим повітряним охолодженням.

На наступному етапі конструювання установки для забезпечення динамічного діапазону об'ємної витрати газу, закладеного в технічному завданні, як задавач та регулятор витрати запропоновано використати набір із дев'яти еталонних сопел, попередньо відкаліброваних на значення об'ємних витрат рідини (мастила), які відповідають 2^n л/год, де n — порядковий номер сопла. За такого підбору сопел забезпечується регулювання витрати з дискретністю $2,77 \cdot 10^{-7}$ м³/с (1 л/год).

Значення діаметрів еталонних сопел визначалися розрахунковим шляхом, для визначення діаметра

еталонного сопла застосовано формулу:

$$d = \alpha \cdot \sqrt{4 \cdot q / \pi \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}}, \quad (1)$$

де α — коефіцієнт витікання сопла, який показує співвідношення теоретично розрахованого значення об'ємної витрати рідини до визначеного експериментально; d — діаметр еталонного сопла, м; q — значення об'ємної витрати рідини, м³/с; g — прискорення вільного падіння, м/с²; h — висота від стабільного рівня мастила в проміжній ємності до еталонного сопла, м.

На рис. 1 наведено гідравлічну схему (а) та конструкцію дивертора (б) вторинного еталона одиниць об'єму газу від 0,003 до 0,016 м³ та об'ємної витрати газу в діапазоні від $2,78 \cdot 10^{-7}$ до $8,33 \cdot 10^{-5}$ м³/с на базі установки еквівалентного витіснення рідини, яка пояснює його принцип дії.

У процесі виготовлення установки суттєво допрацьовано конструкцію дивертора для перенаправлення потоків мастила зі зливної ємності до зважувальної (рис. 1 б). Відомі розроблені конструкції диверторів [9 – 10] для цієї установки мають обмежене застосування. Це обумовлено тим, що установка повинна відтворювати значення об'ємної витрати від $2,77 \cdot 10^{-7}$ м³/с (1 л/год). Отже, у випадку застосування дивертора типової конструкції, за перенаправлення потоку рідини, залишки рідини, маса яких може становити долі грама, які стікають за стінкою ди-

вертора, можуть внести суттєву похибку до результату вимірювання. Тому виготовлений у такому виді дивертор використовується як комплексне рішення, яке забезпечує одночасно вирішення кількох завдань. Дивертор з'єднано з гребінкою еталонних сопел установки за допомогою дев'яти гідравлічних шлангів у відповідності з кількістю еталонних сопел. Еталонні сопла встановлено у гребінці перпендикулярно до зливного трубопроводу з метою зменшення та стабілізації швидкісного напору. Таке технічне рішення, на відміну від типових [11], зумовлює формування струменя потоку не безпосередньо перед дивертором, а у верхній частині гідравлічного шланга. У типовій схемі дивертора авторами виявлено недоліки, оскільки за перенаправлення потоку дивертор повинен сприйняти швидкісний напір потоку, наслідком чого є потрапляння мастила за межі дивертора. Удосконалений дивертор виконано із трьох розподілених елементів: одного рухомого та двох нерухомих. Рухомий елемент дивертора є комплектом гідравлічних шлангів 12, на вході яких встановлено еталонні сопла 11, а на виході — зливні патрубки 13, причому патрубки закріплено на квадратній рамі 14, рух якої забезпечує встановлений двопозиційний симетричний електромагнітний привід 15. Використання гідравлічних шлангів як пружних елементів дало можливість реалізувати

переміщення рухомої частини дивертора. Два нерухомі елементи дивертора 16, 17 закріплені й є складовими частинами зважувальної 4 та зливної 3 ємностей, у результаті чого, за перемикання дивертора і перенаправлення потоку зі зважувальної ємності до зливної, залишки мастила на стінці елемента 16 дивертора містяться безпосередньо у зважувальній ємності.

Отже, реалізовано перехід від умовно високого тиску у проміжній ємності 1, який забезпечений стовпом рідини постійного рівня 10, до низького тиску на виході сопел 11 установки. Таке рішення забезпечує умову неперервності потоку, відсутність швидкісного напору в гідравлічних шлангах дивертора та відсутність розбризкування, тобто залишку мастила на стінках дивертора, що спричиняє недостовірність проведених вимірювань.

Для заповнення проміжної ємності мастилом застосовано типовий шестеренний насос. За його роботи можливі

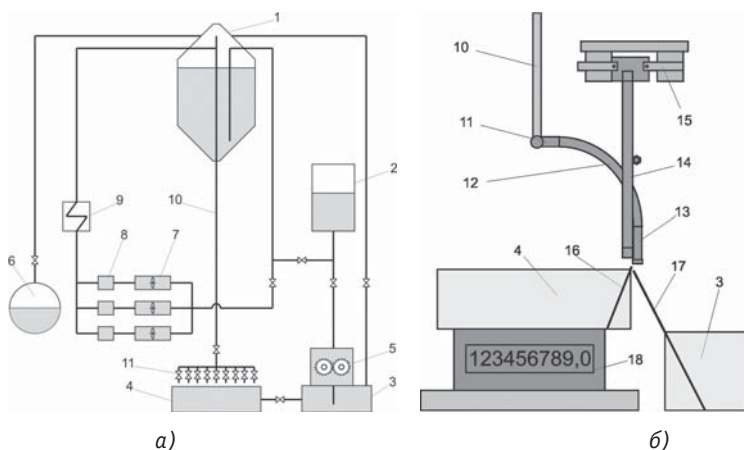


Рис. 1. Гідравлічна схема вторинного еталона (а) та конструкція дивертора (б):

Fig. 1. Hydraulic scheme secondary standards (s) and construction of diverter (b)

- 1 — проміжна ємність, 2 — наповнювальна ємність, 3 — зливна ємність, 4 — зважувальна ємність, 5 — гідравлічний насос, 6 — лічильник газу, 7 — насоси для перекачування мастила та подавання до проміжної ємності, 8 — мастильні фільтри, 9 — теплообмінник з повітряним охолодженням, 10 — вертикальний зливний трубопровід стабільного рівня, 11 — секція еталонних сопел, 12 — гідравлічні шланги, 13 — зливні патрубки, 14 — рама дивертора, 15 — двопозиційний симетричний електромагнітний привід, 16, 17 — нерухомі елементи дивертора, 18 — ваги.

поява повітряних бульбашок та приріст температури у процесі наповнення ємності. Для зменшення цих негативних проявів вирішено встановити додаткову наповнювальну ємність 2 (рис. 1 а). Її встановлено в лінії наповнення проміжної ємності мастилом. Наповнювальна ємність за принципом дії є гідравлічним акумулятором [12], тобто вона завжди заповнена повітрям з певним статичним тиском, яке за наповнення ємності стискається і створює додатковий надлишковий тиск. Після перекачування насосом мастила зі зливної ємності до наповнювальної потрібен певний час для його стабілізації. У наповнювальній ємності здійснюється зменшення насичення мастила повітрям, виключається піноутворення та нормується температура мастила, після чого наповнення проміжної ємності здійснюється за допомогою надлишкового тиску наповнювальної ємності. Крім того, наповнювальна ємність у такому виді додатково відіграє роль демпфера пульсацій потоку рідини [13].

На основі фізичної моделі вторинного еталона досліджено впливні фактори та розроблено рівняння вимірювання одиниць об'єму та об'ємної витрати газу. Згідно з принципом дії еталона, на основі балансу мас, об'єм повітря, що перемістився до проміжної ємності V_c , дорівнює об'єму мастила V_M , яке міститься у зважувальній ємності. У такий спосіб, за показаннями прецизійних вагів, можна визначити еквівалентний об'єм мастила V_M , який, з урахуванням виштовхувальної сили за зважування у повітрі згідно з [14] визначається як:

$$V_M = \frac{m_M \cdot \frac{1 - \rho_p / \rho_c}{\rho_M}}{1 - \rho_p / \rho_M}, \quad (2)$$

де m_M — маса робочої рідини (мастила) за показаннями вагів, кг; ρ_c — густина стандартних зважуваних об'єктів, приймається 8000 кг/м^3 [14]; ρ_p — густина робочого середовища (повітря), кг/м^3 ; ρ_M — густина робочої рідини (мастила), кг/м^3 , яка, з урахуванням температурного розширення, визначається як:

$$\rho_M = \rho_{0M} \cdot (1 + \beta \cdot (293,15 - T_M)), \quad (3)$$

де ρ_{0M} — густина робочої рідини (мастила) за $20 \text{ }^\circ\text{C}$, кг/м^3 ; β — коефіцієнт теплового розширення робочої рідини (мастила), $1/\text{K}$; T_M — температура робочої рідини (мастила), К.

Згідно з [15] густина повітря визначається так:

$$\rho_p = \frac{0,0034848 \cdot P_H - 0,009 \cdot \phi \cdot e^{0,061 \cdot (T_H - 273,15)}}{T_H}, \quad (4)$$

де P_H — тиск, Па, T_H — температура, К, ϕ — вологість, %, навколишнього середовища (повітря).

Відповідно, з урахуванням балансу мас повітря, яке облікував еталонний лічильник, та повітря, яке перемістилося до проміжної ємності:

$$V_{\text{ЛПЧ}} \cdot \rho_p = V_c \cdot \rho_p \quad (5)$$

та рівняння приведення об'єму газу до стандартних умов:

$$V_{\text{ЛПЧ}} = V_c \cdot (P_c / T_c) \cdot (T_{\text{ЛПЧ}} / P_{\text{ЛПЧ}}), \quad (6)$$

де P_c — тиск, Па, T_c — температура, К, робочого середовища (повітря) у верхній ємності; $P_{\text{ЛПЧ}}$ — тиск, Па, $T_{\text{ЛПЧ}}$ — температура, К, робочого середовища (повітря) у лічильнику газу.

Рівняння вимірювання вторинного еталона одиниць об'єму та об'ємної витрати газу після перетворення (2), нехтуючи доданком $\rho_p^2 / (\rho_c \cdot \rho_M)$, з урахуванням (3) — (6), має вид:

$$V_{\text{ЛПЧ}} = \frac{P_c}{T_c} \cdot \frac{T_{\text{ЛПЧ}}}{P_{\text{ЛПЧ}}} \cdot \frac{m_M}{\rho_{0M} \cdot (1 + \beta \cdot (293,15 - T_M))} \times \left(1 + \frac{\rho_p}{\rho_{0M} \cdot (1 + \beta \cdot (293,15 - T_M))} \right) \times \left(1 - \frac{\rho_{0M} \cdot (1 + \beta \cdot (293,15 - T_M))}{\rho_c} \right). \quad (7)$$

На його основі сформовано метрологічну модель вторинного еталона одиниць об'єму та об'ємної витрати газу.

Для визначення метрологічних характеристик еталона розроблено методіку метрологічної атестації, згідно з якою визначаються довірчі границі похибки $t_\Sigma \cdot S_\Sigma$ передавання одиниць об'єму та об'ємної витрати та невизначеності вимірювання за типами А, В, сумарна та розширена.



Рис. 2. Зовнішній вид вторинного еталона
Fig. 2. The appearance of secondary standard

Визначення характеристик НСП (θ), СКВ (S) та невизначеностей за типом $A(u_A)$ та $B(u_B)$ передавання одиниці об'єму газу вторинним еталоном виконувалося з урахуванням коефіцієнтів впливу, які подані як частинні похідні формули (7), та результатів атестації відповідних каналів вимірювання фізичних параметрів робочого середовища.

Дослідження з метою визначення довірчих границь сумарної похибки та невизначеності передавання розміру одиниці об'єму газу проводилися для значень 0,003, 0,01 та 0,016 м³, а для одиниці об'ємної витрати газу — для значень 2,78 · 10⁻⁷ м³/с (1 л/год) за контрольного об'єму 0,003 м³, 4,44 · 10⁻⁶ м³/с (16 л/год) за об'єму 0,01 м³ та 8,33 · 10⁻⁵ м³/с (300 л/год) за об'єму 0,016 м³. Із множини значень похибок та невизначеностей за кінцеве приймається максимальне значення.

За результатами метрологічної атестації отримано результати, які зведено до таблиці.

На рис. 2 наведено зовнішній вид вторинного еталона одиниць об'єму та об'ємної витрати газу на базі установки еквівалентного витіснення рідини.

До складу вторинного еталона, окрім основних елементів конструкції, входять:

- прецизійні ваги для зважування еквівалентної кількості витісненого малов'язкого та низьковипарованого мастила;
- первинні перетворювачі вимірювань тиску, температури та інтервалів часу;
- секції еталонних сопел для забезпечення відтворення значень об'ємної витрати;
- дослідна лінія для встановлення еталонних лічильників та еталонів порівняння;
- під'єднувальні трубопроводи та запірно-відсічна арматура.

Вторинний еталон обладнано комп'ютерною системою збирання, опрацювання та представлення ін-

Таблиця. Результати досліджень вторинного еталона одиниць об'єму газу від 0,003 до 0,016 м³ та об'ємної витрати газу в діапазоні від 2,78 · 10⁻⁷ до 8,33 · 10⁻⁵ м³/с

Table. Results of research the secondary standard units gas volume from 0,003 to 0,016 m³ and gas flow rate in the range from 2,78 · 10⁻⁷ to 8,33 · 10⁻⁵ m³/s

Параметри (об'єм V , витрата q)	Характеристики						
	θ	S	$t_{\Sigma} \cdot S_{\Sigma}$	u_A	u_B	u_C	U
$V(0,003)$	$3,33 \cdot 10^{-6}$	$1,04 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$1,04 \cdot 10^{-6}$	$1,87 \cdot 10^{-6}$	$7,5 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$
$V(0,01)$	$8,71 \cdot 10^{-6}$	$2,93 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$2,93 \cdot 10^{-6}$	$5,04 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$
$V(0,016)$	$1,37 \cdot 10^{-5}$	$4,62 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$4,62 \cdot 10^{-6}$	$7,941 \cdot 10^{-6}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$
$q(2,78 \cdot 10^{-7})$	$3,29 \cdot 10^{-10}$	$9,56 \cdot 10^{-11}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$9,56 \cdot 10^{-11}$	$1,73 \cdot 10^{-10}$	$7 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$
$q(4,44 \cdot 10^{-6})$	$4,27 \cdot 10^{-9}$	$1,3 \cdot 10^{-9}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-9}$	$2,25 \cdot 10^{-9}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$
$q(8,33 \cdot 10^{-5})$	$8,15 \cdot 10^{-8}$	$2,85 \cdot 10^{-8}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$2,85 \cdot 10^{-8}$	$5,19 \cdot 10^{-8}$	$7 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$

формації для забезпечення автоматизації процесу вимірювання.


Результатом проведеної роботи стала атестація еталона комісією за участі представника ННЦ «Інститут метрології», яка надала висновок про можливість затвердження еталона у статусі вторинного. За результатами атестації вторинного еталона підтверджено його заявлені метрологічні характеристики, а саме:

1. Діапазон вимірювання об'єму газу від 0,003 до 0,016 м³, діапазон вимірювання об'ємної витрати газу від 2,78 · 10⁻⁷ до 8,33 · 10⁻⁵ м³/с.
2. Довірчі границі похибки $t_{\Sigma} \cdot S_{\Sigma}$ передавання одиниць об'єму та об'ємної витрати становлять відповідно $t_{\Sigma} \cdot S_{\Sigma V} = 1,5 \times 10^{-3}$ та $t_{\Sigma} \cdot S_{\Sigma q} = 1,5 \times 10^{-3}$.
3. Невизначеності вимірювання:
 - за об'ємом: $u_A = 1 \times 10^{-6}$, $u_B = 1,9 \times 10^{-6}$, $u_C = 7,5 \times 10^{-4}$, $U_V = 1,5 \times 10^{-3}$ з коефіцієнтом охоплення $K = 2$ та довірчою ймовірністю $P = 0,95$;
 - за об'ємною витратою: $u_A = 9,6 \times 10^{-11}$, $u_B = 1,7 \times 10^{-10}$, $u_C = 7 \times 10^{-4}$, $U_q = 1,4 \times 10^{-3}$ з коефіцієнтом охоплення $K = 2$ та довірчою ймовірністю $P = 0,95$.

Комплект документації та необхідні матеріали щодо вторинного еталона одиниць об'єму газу від 0,003 до 0,016 м³ та об'ємної витрати газу в діапазоні від 2,78 · 10⁻⁷ до 8,33 · 10⁻⁵ м³/с направлено до ННЦ «Інститут метрології» для занесення до Реєстру державних первинних і вторинних еталонів одиниць вимірювань.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу: ДСТУ 3383: 2007. — [Чинний від 2007-07-01; на заміну ДСТУ 3383-96]. — К.: Держспоживстандарт України (Metrolohiia. Derzhavna povirochna skhema dlia zasobiv vymirivannia obiemu ta obiemnoi vytraty

- hazu: DSTU 3383: 2007. — [Chynnyi vid 2007-07-01; na zaminu DSTU 3383-96]. — K.: Derzhspozhyvstandart Ukrainy), 2007. — III, 9 c/s.
2. John D.Wright. What is the «Best» Transfer Standard for Gas Flow? / John D.Wright // Flomeko Conference 11th FLOMEKO 2003. — 2003. — May 12—14. — Groningen, Netherlands.
 3. Петришин І.С. Науково-методологічні та технічні засади забезпечення точності вимірювань витрати природного газу: дис. докт. техн. наук. / Петришин Ігор Степанович. — Івано-Франківськ, (Petryshyn I.S. Naukovo-metodolohichni ta tekhnichni zasady zabezpechennia tochnosti vumiruvan vytraty pryrodnoho hazu: dys. dokt. tekhn. nauk. / Petryshyn Ihor Stepanovych. — Ivano-Frankivsk), 2007. — 381 c/s.
 4. Петришин І.С. Математична та метрологічна моделі вторинного еталона одиниці об'єму та об'ємної витрати газу / І.С. Петришин, Я.В. Безгачнюк // Український метрологічний журнал (Petryshyn I.S. Matematychna ta metrolohichna modeli vtorynnoho etalona odynytsi obiemu ta obiemnoi vytraty hazu / I.S. Petryshyn, Ya.V. Bezghachniuk // Ukrainskyi metrolohichnyi zhurnal). — 2007. — № 2. — С/С. 40—42.
 5. Чалий В. Адаптивна технологія побудови еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі / В. Чалий, Т. Ільницька, С. Чалий // Стандартизація сертифікація якості (Chalyi V. Adaptivna tekhnolohiia pobudovy etalona odynytsi potuzhnosti ultrazvuku u vodnomu seredovyshchi / V. Chalyi, T. Ilynska, S. Chalyi // Standartyzatsiia sertyfikatsiia yakist). — 2009. — № 3. — С/С. 37—43.
 6. Присяжнюк Т.І. Вдосконалення методичних засад та технічних засобів відтворення витрати газу в діапазоні від 0,001 до 0,016 м³/год: дис. канд. техн. наук. / Присяжнюк Тарас Ігорович. — Івано-Франківськ (Prysiashniuk T.I. Vdoskonalennia metodychnykh zasad ta tekhnichnykh zasobiv vidtvorennia vytraty hazu v diapazoni vid 0,001 do 0,016 m³/hod: dys. kand. tekhn. nauk. / Prysiashniuk Taras Ihorovych. — Ivano-Frankivsk), 2013. — 120 c/s.
 7. Top level of metrological services for petrochemical and gas industry — Czech Metrology Institute — Brno. — 2007. — 43p.
 8. ISO 4185:1980/Cor. 1:1993 Measurement of liquid flow in closed conduits — Weighing method: — Geneva.: International Organization for Standardization, 1993. — 26p.
 9. Косач Н.І. Принцип побудови перекидного пристрою еталона одиниць об'ємної та масової витрати рідини / Н.І. Косач // Український метрологічний журнал (Kosach N.I. Pryntsyyp pobudovy perekydnoho prystroiu etalona odynyts obiemnoi ta masovoi vytraty ridyny / N.I. Kosach // Ukrainskyi metrolohichnyi zhurnal). — 2004. — № 2. — С/С. 37 — 41.
 10. Jongerins P.F.M., M.P. van der Beek and J.G.M. van der Grinten. Calibration facilities for industrial gas flow meters in the Netherlands. // Flow Meas. Instrum. — 1993. — №2. — P.p. 77—84.
 11. А.с. 821941 СССР: МКИ G 01F25/00. Перекидное устройство расходомерной установки / К.М. Блажковский, В.Г. Хорошунув. — № 2700961/18-10, заявл. 25.12.78; опубл. 15.04.81, Бюл. № 14. (A.s. 821941 SSSR: MKY G 01F25/00. Perekydnoe ustroistvo raskhodomernoї ustanovky / K.M. Blazhkovskiy, V.H. Khoroshunov. — № 2700961/18-10, zaiavl. 25.12.78; opubl. 15.04.81, Biul. № 14.).
 12. Башта Т.М. Гидропривод и гидропневмоавтоматика. — Москва: Машиностроение (Bashta T.M. Hydropryvod y hydro pnevmoavtomatyka. — Moskva: Mashynostroenye), 1972. — 320 c/s.
 13. ISO/TR 3313:1998 Measurement of fluid flow in closed conduits — Guidelines on the effects of flow pulsations on flow-measurement instruments: — Geneva.: International Organization for Standardization, 1998. — 25p.
 14. Гирі класів E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 та M3. Частина 1. Загальні технічні вимоги та методи випробувань: ДСТУ OIML R111-1:2008 (OIML R111-1:2004, IDT). — [Чинний від 01-01-2010]. — К.: Держспоживстандарт України (Гирі класів E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 та M3. Chastyina 1. Zahalni tekhnichni vumohy ta metody vyprobuvan: DSTU OIML R111-1:2008 (OIML R111-1:2004, IDT). — [Chynnyi vid 01-01-2010]. — K.: Derzhspozhyvstandart Ukrainy), 2010. — 72 c/s.
 15. Умовне значення зважування в повітрі: ДСТУ OIML D28:2008 (OIML D28:2004, IDT). — [Чинний від 01-01-2010]. — К.: Держспоживстандарт України (Umovne znachennia zvazhuvannia v povitri: DSTU OIML D28:2008 (OIML D28:2004, IDT). — [Chynnyi vid 01-01-2010]. — K.: Derzhspozhyvstandart Ukrainy), 2010. — 13 c/s. 

Отримано / received: 19.12.2014.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н. В. Б. Большаковим (Україна).
D. Sc. (Techn.) V.B. Bolshakov, Ukraine, recommended this article to be published.