DOI: 10.33955/2307-2180(2)2020.3-12 УДК 681.121

ДЕРЖАВНИЙ ПЕРВИННИЙ ЕТАЛОН ОДИНИЦЬ ОБ'ЄМУ ТА ОБ'ЄМНОЇ ВИТРАТИ ГАЗІВ У ДІАПАЗОНІ ТИСКУ ВІД 1 МПА ДО 5 МПА (*PVTt*-15)

State Primary Standard of Gas Volume and Flow Rate Units for the Pressure Range of 1 MPa to 5 MPa (PVTt-15)

CC BY-SA

М. С. Рожнов, кандидат хімічних наук,
заступник директора науково-виробничого інституту,
Ю. В. Кузьменко, кандидат технічних наук,
заступник генерального директора,
Д. М. Мельник, начальник науково-дослідного відділу,
О. С. Левбарг, начальник науково-дослідної лабораторії,
А. М. Рак, заступник начальника відділу,
В. І. Пашун, начальник сектору,
Л. М. Погрібна, провідний науковий співробітник,
ДП «Укрметртестстандарт», м. Київ, Україна,
e-mail: dmytro.melnyk50@gmail.com

M. S. Rozhnov, candidate of chemical sciences,
deputy director of the Research and Production Institute,
Yu. V. Kuzmenko, candidate of technical sciences,
deputy director general,
D. M. Melnyk, head of the research department,
O. S. Levbarg, head of the research laboratory,
A. M. Rak, deputy head of department,
V. I. Pashun, head of sector,
L. M. Pohribna, leading researcher,
SE «Ukrmetrteststandart», Kyiv, Ukraine,
e-mail: dmytro.melnyk50@gmail.com

В Україні вперше створено первинний еталон одиниць об'єму та об'ємної витрати газів, заснований на відтворенні одиниць за методом PVTt та передаванні розміру одиниць через критичні сопла Вентурі в діапазоні тиску від 1 МПа до 5 МПа. Застосування створеного еталона забезпечить метрологічну простежуваність результатів вимірювання об'єму та об'ємної витрати газів за високого тиску в діапазоні витрати до 100 м³/год та калібрування первинних еталонних сопел з діаметром горловини від 0,1 мм до 3 мм.

For the first time in Ukraine a primary measurement standard of gas volume and flow rate units in a pressure range of 1 MPa to 5 MPa has been created. The standard is based on realisation of the units by PVTt principle and units dissemination using critical Venturi nozzles. Gas passing through the nozzle during its calibration fills an evacuated collection tank located downstream the nozzle, and the respective time interval is measured. Mass flow rate is calculated by multiplying the volume of the collection tank by the gas density change and dividing by the tank filling time. Density values are determined by the equation of state and the measured initial and final pressure and temperature values. The structural and functional scheme of the measurement standard is shown in Figure 3. The standard consists of two units. The first unit is intended to realise, keep and transfer the units of gas volume and flow rate. The general view of the block is shown in Figure 4. The unit contains high pressure collection tank, precision water thermostat, vacuum pump, piston gas pressure gauge, flow switch, fine filter, a set of seven Venturi nozzles with diameters from 0.1 mm to 3.0 mm. The second unit is designed to form a stationary gas flow and provide a critical gas flow rate (at the speed of sound) at the nozzle throat. In the case of an elementary reversible adiabatic (isoentropic) process at a critical velocity, the mass flow rate of gas passing through the nozzle is maximally possible. The unit consists of equipment for reducing the pressure from 150 bar to 70 bar and from 70 bar to 10 bar, the heat exchanger and the instruments measuring the pressure and temperature of the gas flow. The created measurement standard will assure metrological traceability of the measurements of gas volume and volume flow rate at high pressures for the flow rate up to 100 m³/h and calibration of the primary reference nozzles with a throat diameter from 0.1 mm to 3 mm.

Ключові слова: *витрата газу, еталон витрати, метод PVTt, сопло Вентурі, ланцюг простежуваності.*
Keywords: *gas flow rate, flow rate standard, PVTt method, Venturi nozzle, traceability chain.*

Прилади для вимірювання об'єму та об'ємної витрати газів (зокрема, природного газу) широко застосовують для комерційного обліку газів та під час виробництва продукції в різних галузях економіки. На сьогодні чинною є ієрархічна структура (повірочна схема), що встановлює підпорядкованість еталонів, які беруть участь у передаванні одиниць об'єму та об'ємної витрати газів тільки за атмосферного тиску [1]. Ієрархічну структуру очолює Державний первинний еталон одиниць об'єму газу (кубічний метр, м³) та об'ємної витрати газу (кубічний метр на годину, м³/год), до складу якого входять еталонні установки дзвонового типу та комплекс допоміжних засобів вимірювальної техніки. Діапазони значень, які відтворює еталон, становлять: для об'єму газу — від 0,4 м³ до 1,0 м³ і для об'ємної витрати газу — від 4 м³/год до 200 м³/год.

Більшість промислових витратомірів працює за тиску від 2 бар до 50 бар, й їхня допустима відносна похибка повинна бути в межах ± 1,5 % [2].

© Рожнов М. С., Кузьменко Ю. В., Мельник Д. М., Левбарг О. С., Рак А. М., Пашун В. І., Погрібна Л. М., 2020

Таблиця 1. Первинні еталони одиниці об'ємної витрати газу за високого тиску, засновані на методі PVTt

Table 1. Primary standards of the gas volume flow-rate unit at high pressure based on the PVTt method

№ з/п	Розміщення еталона	Джерела	Рік уведення в експлуатацію та реконструкції	Діапазон тиску, бар	Витрата, м³/год	Розширена невизначеність, %	Об'єм накопичувальної ємності, л	Робочі гази
1	*PVTt* 26 м³, *NIST*, США	[5]	1960, 1997, 2002	1...8	54...4600	0,13	26000	Природний газ, повітря
2	*PVTt* 34 *L*, *NIST*, США	[6]	2002	1...70	0,06...6	0,03...0,045	34	Безпечні гази
3	*PVTt* 677 L, *NIST*, США			1...8 1...17	0,6...9 0,6...120	0,02...0,05	677	Безпечні гази, природний газ
4	*PVTt-Piscine LNE-LADG*, *Alfortville*, Франція	[7]	1970	6...55	9...90000	0,15...0,18	2070	Природний газ
5	*PVTt-M6*, *LNE* м. Пуатьє, Франція	[8]	2008	3...60	6...10800	0,15	100, 2500	Природний газ, повітря, азот
6	*IITKGP*, *Kharagpur*, *India*	[9]	1999	1...7,5	до 45	0,1	2000	Повітря
7	*CMS*, *Hsinshu*, Тайвань	[10]	2013	2...10	0,006...18	0,1	2, 30, 500	Безпечні гази
8	*NMIJ*, Японія	[11]	2013	2...10	0,1...18	0,17	11000	Повітря
9	*NIM*, *Zhenjiang*, КНР	[12]	2015	1...6	0,2...1600 (P = 1 бар) 0,5...400 (P = 6 бар)	0,067	30000, 34000	Повітря

Таблиця 2. Первинні еталони одиниці об'ємної витрати газу за високого тиску, засновані на об'ємометричному та гравіметричному методах

Table 2. Primary standards of the gas volume flow-rate unit at high pressure based on the volumetric and gravimetric methods

№ з/п	Розміщення еталона	Джерела	Рік уведення в експлуатацію та реконструкції	Діапазон тиску, бар	Витрата, м³/год	Розширена невизначеність, %	Принцип дії	Робочі гази
1	РПДУ-41 ПГ, ВАТ «ДНІПРОГАЗ», м. Дніпро, Україна	[13]	1989	до 15	500 — 150000	0,3	Поршень діаметром 80 см, довжина 18 м, з 4-х частин *V* = 0,5 м³	Природний газ, повітря
2	*Pigsar*™, *Dorsten*, Germany	[14]	1993	14...50	8 — 6500	0,16	Поршень діаметром 250 мм, змінний об'єм	Природний газ
3	*Cesame LNE Quest*, Пуатьє, Франція	[15]	2000	1...40	0,01 — 4	0,2	Поршень у закритій петлі	Природний газ, повітря
4	ГЭТ 118-2013, ВНИИР, Казань, Росія (установка ЭУ-4)	[16]	2013	до 10	10 — 2300	0,11	Ваги з понтоном. Ємність для газу 1 м³	Природний газ, повітря
5	ДП «Івано-Франківськстандартметрологія», Україна	[17]	2014	до 16 бар	4 — 200	0,2	Дві поршневі секції діаметром 20 см; *L* = 2 м	Природний газ, повітря

Насправді експлуатаційна похибка цих витратомірів у 2-3 рази перевищує паспортну. Розбіжності в результатах вимірювань кількості газу за допомогою лічильників за робочих умов, та тиску до 50 бар і за умов повірки, тобто за атмосферного тиску, призводять до суттєвих втрат природного газу під час його постачання й використання і не дають можливості перейти до обліку природного газу з урахуванням його теплоти згоряння. Тільки за перше півріччя 1996 р. невраховані втрати природного газу в Україні становили 4,2 млрд. м^3, тобто понад 6 % від кількості розподіленого газу [3].

Рис. 1. Міжнародна ієрархічна схема для засобів вимірювань витрати газу за тиску до 50 бар
Fig. 1. An international hierarchical scheme for the instruments measuring gas flow rates at pressures up to 50 bar

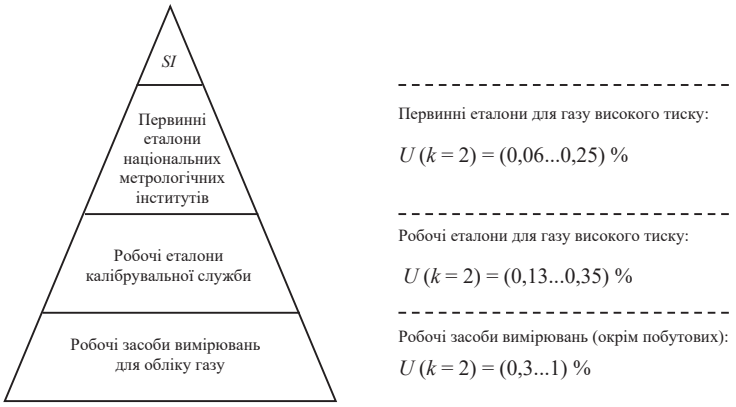

Рис. 2. Міжнародний ланцюг метрологічної простежності результатів вимірювань об'ємної витрати газу за тиску до 50 бар
Fig. 2. International metrological traceability chain for the gas volume flow rate measurements at pressures up to 50 bar

У 2001 році постановою Кабінету Міністрів України №1089 від 21.08.01 було затверджено «Концепцію створення єдиної системи обліку природного газу». Передбачені «Концепцією…» роботи з упровадження високоточних сучасних лічильників природного газу та стандартів, гармонізованих з європейськими, частково було виконано. Роботи зі створення спеціальних еталонів об'ємної витрати природного газу за робочих умов та тиску до 5 МПа було відкладено через складність технічних проблем.

У розвинених країнах єдність вимірювань витрати газів за високого тиску заснована на метрологічній простежуваності результатів вимірювань, яку реалізують через послідовність сопел критичного витікання Вентурі, що відіграють роль еталонних мір витрати [4]. Первинні еталонні сопла калібрують за допомогою первинних еталонів витрати газів, заснованих на використанні трьох методів: *PVTt*, об'ємометричного та гравіметричного. Характеристики найбільш відомих первинних еталонів одиниці об'ємної витрати газу за високого тиску, в яких застосовано метод *PVTt*, подано в таблиці 1 [5—12], об'ємометричний і гравіметричний методи — в таблиці 2 [13—17]. Міжнародну ієрархічну схему для засобів вимірювань витрати газів та міжнародний ланцюг метрологічної простежуваності результатів вимірювань об'ємної витрати газів за тиску до 50 бар подано на рис. 1 і 2 [18].

У ДП «Укрметртестстандарт» створено Державний первинний еталон одиниць об'єму та об'ємної витрати газів у діапазоні тиску від 1 МПа до 5 МПа на основі застосування методу *PVTt*, що забезпечує незалежність витрати від коливань тиску та можливість чітко визначити границі об'єму, який потрібно враховувати. Газ, що проходить крізь сопло під час калібрування, заповнює звакуумований п'єзометр, розміщений на виході сопла, протягом вимірюваного інтервалу часу. Масову витрату розраховують множенням об'єму п'єзометра на зміну густини газу і діленням на час пропускання газу. Зміну густини визначають через рівняння стану та вимірені початкові й кінцеві значення тиску та температури. Структурно-функційну схему еталона показано на рис. 3, специфікацію обладнання та засобів вимірювальної техніки згідно зі структурно-функційною схемою подано в табл. 3.

Еталон складається з двох блоків. Перший блок призначений для відтворювання, зберігання та передавання одиниць об'єму та об'ємної витрати газів. Загальний вид блоку показано на рис. 4.

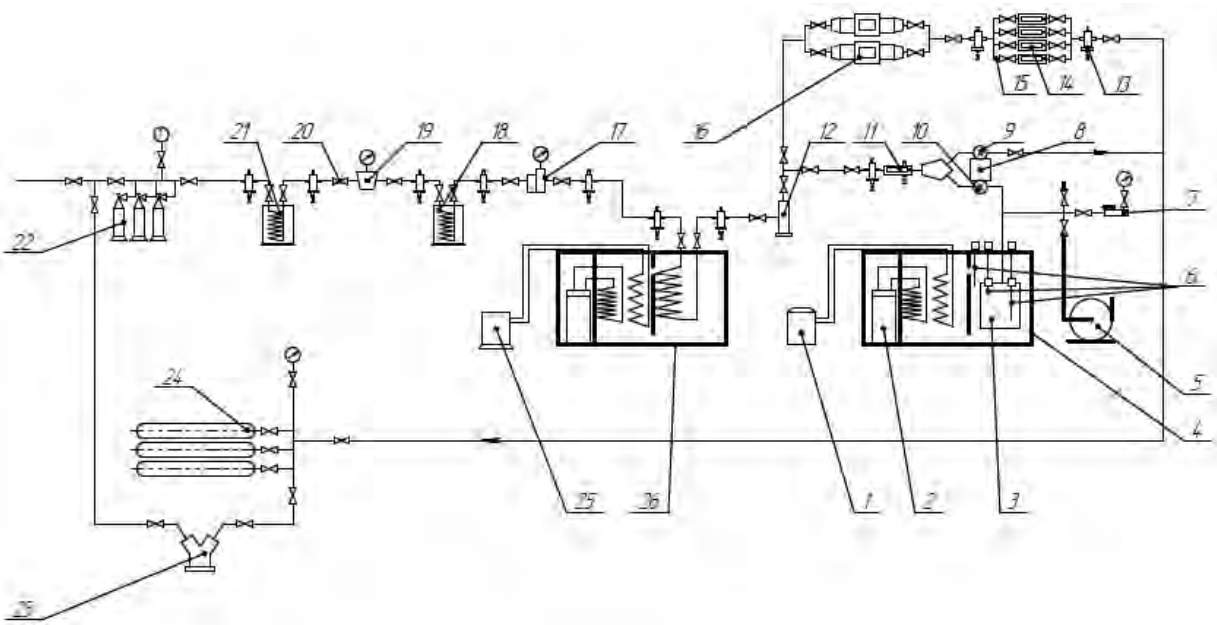

Рис. 3. Структурно-функційна схема первинного еталона одиниць об'єму та об'ємної витрати газів у діапазоні тиску від 1 МПа до 5 МПа
Fig. 3. Structural and functional diagram of the primary standard of gas volume and volume flow rate units at the pressure range from 1 MPa to 5 MPa

Блок містить: п'єзометр високого тиску (рис. 5), термостат водяний прецизійний, вакуумнасос, вантажопоршневий газовий манометр (рис. 6), перемикач потоків, пристрій для калібрування первинних еталонних сопел (рис. 7), фільтр тонкого очищення, набір сопел Вентурі (рис. 8) у складі 7 шт. з діаметрами від 0,1 мм до 3,0 мм.

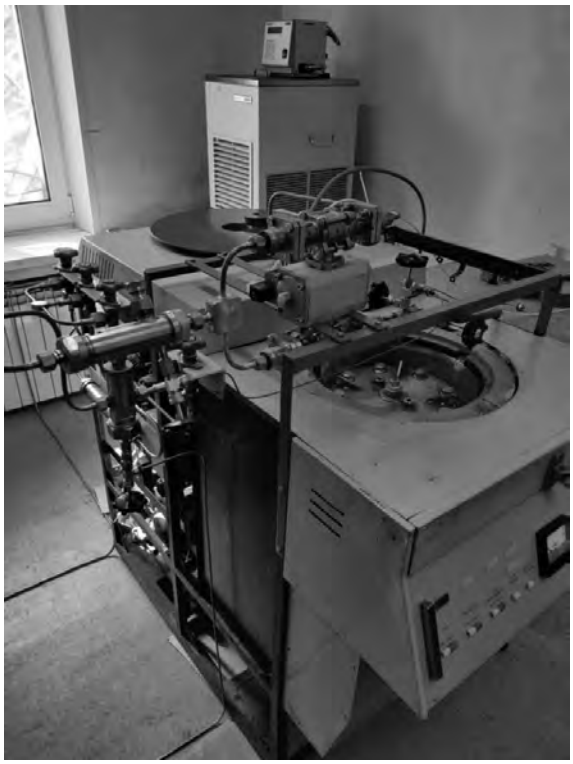

Рис. 4. Блок відтворення, зберігання та передавання розміру одиниць об'єму та об'ємної витрати газів
Fig. 4. Unit intended to realise, keep and transfer the units of gas volume and volume flow rate

Другий блок призначений для формування стаціонарного потоку газу та забезпечення критичної швидкості потоку газу в горловині сопла (швидкості звуку). За умов елементарного оборотного адіабатичного (ізоентропійного) процесу за критичної швидкості масова витрата газу, що проходить через сопло, є максимально можливою. Блок складається з обладнання для зниження тиску від 150 бар до 70 бар і від 70 бар до 10 бар, теплообмінника

Рис. 5. П'єзометр високого тиску
Fig. 5. High pressure collection tank

Рис. 6. Вантажопоршневий газовий манометр
Fig. 6. Piston gas pressure gauge

Рис. 7. Пристрій для калібрування первинних еталонних сопел
Fig. 7. Device for calibrating primary standard nozzles

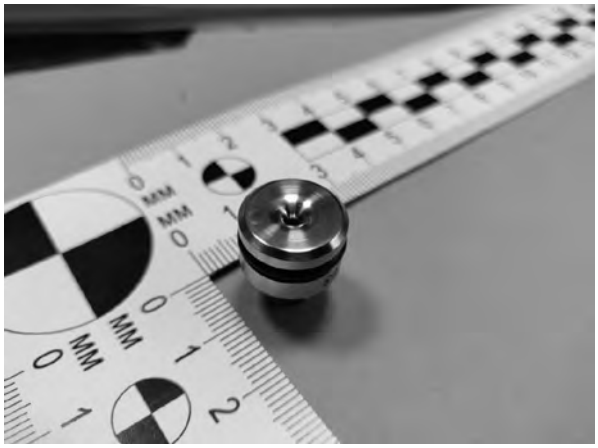

Рис. 8. Сопло Вентурі
Fig. 8. Venturi nozzle

та засобів вимірювання тиску та температури потоку газу.

Як теплообмінник застосовано доопрацьований термостат ТВП-6 зі змійовиком із мідної труби Ø 8 x 6 мм у комплекті з коригувальним циркуляційним термостатом *Lauda* 312 та пристроями для вимірювання температури й тиску на вході та виході потоку.

Щоб забезпечити роботу еталона, було розроблено:

- пристрій для вимірювання з високою точністю температури та тиску газів у трубах Ø8 x 6 мм;
- пристрій для розміщення та, за потреби, швидкої заміни сопел з різними діаметрами горловини під час роботи еталона;
- засіб для калібрування робочих еталонних сопел методом звірення з первинними еталонними соплами за допомогою компаратора (рис. 9);
- методика розрахунку критичних сопел Вентурі;

Таблиця 3. Специфікація обладнання та засобів вимірювальної техніки у структурно-функційній схемі первинного еталона одиниць об'єму та об'ємної витрати газів у діапазоні тиску від 1 МПа до 5 МПа

Table 3. Specification of equipment and measuring instruments in the structural and functional diagram of the primary standard of gas volume and volume flow rate units at the pressure range from 1 MPa to 5 MPa

№	Назва	Технічні та метрологічні характеристики
1	Термостат циркуляційний *Lauda RK8CP*	Робоча температура від мінус 50 до 200 °С. Похибка підтримання температури ± 0,02 °С. Споживана потужність 2,7 кВт. Вага 62 кг
2	Агрегат герметичний холодильний термостата ТВП-6 ВС 1250	Холодопродуктивність 1,25 кВт Споживана потужність 0,7кВт
3	П'єзометр	Місткість 15 л, максимальний тиск 100 бар, зовнішній діаметр 273 мм, товщина стінки 11 мм, довжина 400 мм
4	Термостат водяний прецизійний ТВП-6	Споживана потужність 6,5 кВт. СКВ $5 \cdot 10^{-3}$ °С за температури (20...50) °С. Градієнт $\leq 4 \cdot 10^{-2}$ °С/м
5	Високовакуумна насосна установка *VS35A*	Споживана потужність 0,95 кВт, вакуум $2 \cdot 10^{5}$ мм рт. ст., форвакуум $1 \cdot 10^{3}$ мм рт. ст.

Закінчення таблиці 3

End of Table 3

№	Назва	Технічні та метрологічні характеристики
6	Платинові термометри опору (ПТО)	Діаметр зовнішній 10,2 мм
	6.1 ПТО для вимірювання температури газу в п'єзометрі та води у термостаті	*T* = (15...35) °C, P = 60 бар Похибка (0,001...0,005) °C; *L* = 500 мм — 2 шт., *L* = 80 мм — 3 шт.
	6.2 ПТО для вимірювання температури газу в трубопроводах	*T* = (15...35) °C, P = 150 бар Похибка 0,01 °C; *L* = 120 мм — 10 шт.
	6.3 ПТО для вимірювання температури води в термостаті 4 і теплообмінниках 18, 21, 26	*T* = (15...35) °C, тиск атмосферний Похибка 0,01 °C; *L* = 120 мм — 4 шт.
7	Вантажопоршневий манометр газовий фірми *WIKA*, тип *CPB*-5000	*P* = (0,4...100) бар Похибка (0,008...0,01) %
8	Перемикач потоків на базі кранів *Festo* типу *VZBA DN* 8	Швидкість перемикання потоку 0,035 с
9	Кран фірми *Festo* типу *VZBA*	*P* = 60 бар, *T* = (15...35) °C *DN*8, з поворотним приводом
10	Кран фірми *Festo* типу *VZBA*	*P* = 60 бар, *T* = (15...35) °C *DN*8, з поворотним приводом
11	Пристрій для калібрування еталонних сопел	*P* = (10...50) МПа, *T* = (15...35) °C, діаметр горловин сопел, які підлягають калібруванню, мм 0,1; 0,3; 0,4; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0
12	Фільтр тонкого очищення	*P* = 100 бар, ефективність фільтрації 5 мкм
13	Пристрій для вимірювання температури й тиску газу в трубопроводах	Температура газу (15...95) °C, тиск (10...150) бар. Кількість 10 шт. Внутрішній діаметр трубопроводу 6 мм. Похибка вимірювання тиску 0,05 %, температури — 0,1 °C
14	Пристрій для калібрування сопел у зборі з соплом, яке підлягає калібруванню як робоче еталонне сопло	Діаметр горловин сопел, що підлягають калібруванню, від 0,1 до 3,0 мм
15	Набір пристроїв для калібрування сопел у зборі з первинними еталонними соплами	Номінальні діаметри горловини сопел, мм 0,1; 0,3; 0,4; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0
16	Комплект компараторів витрати — лічильників газу	Роторні та турбінні лічильники газу з діапазоном витрати (5...100) м^3/год за тиску (10...50) бар
17	Редуктор балонний низького тиску	Робочий тиск на виході від 70 бар до 10 бар, пропускна здатність 80 м^3/год
18	Теплообмінник водяний для підігрівання потоку газу перед редуктором низького тиску	Потужність 1,5 кВт. Тиск газу в трубопроводі (10...50) бар
19	Первинний редуктор балонний високого тиску	Робочий тиск на виході від 150 бар до 70 бар, пропускна здатність 80 м^3/год
20	Вентиль КВО регулювальний	Максимальний діаметр прохідного перетину 6 мм, тиск до 150 бар, 40 шт.
21	Теплообмінник водяний для підігрівання потоку газу перед редуктором високого тиску	Потужність 1,5 кВт, тиск газу в трубопроводі 150 бар
22	Джерело газів для формування та підтримання потоку газів	Блок з 10 балонів загальною місткістю 0,4 м^3 з газом під тиском 150 бар
23	Компресор мембранний дотискний з системою осушування газу	Максимальний тиск 150 бар, потужність 7,5 кВт, продуктивність 18 м^3/год за умов усмоктування
24	Газгольдер	Блок з 16 балонів загальною місткістю 1,28 м^3, максимальний тиск 50 бар
25	Термостат циркуляційний *Lauda* 312	Робоча температура від мінус 30 °C до 200 °C. Споживана потужність 2,7 кВт. Вага 30 кг. Похибка підтримання температури ±0,02 °C.
26	Теплообмінник водяний на базі термостата ТВП-6	Споживана потужність 6,5 кВт.

▪ методика дослідження метрологічних характеристик первинного еталона одиниць об'єму та об'ємної витрати газів у діапазоні тиску від 1 МПа до 5 МПа;

▪ методика калібрування первинних еталонних сопел;

▪ методика калібрування робочих еталонних сопел.

Для роботи застосовують чисті гази в балонах під тиском 150 бар. Вихідний потік газу випускають в атмосферу або відводять до газгольдера для повторного використання.

Для підготування газів та визначання їхньої якості застосовують комплекс технічних засобів та засобів вимірювальної техніки, які входять до складу первинного еталона одиниці молярної частки газів (мембранні й поршневі компресори, вакуумні насоси, універсальні блоки очищення й осушування газів, ємності для зберігання підготовлених газів, хроматографи з полум'яно-іонізаційними, кондуктометричними та хемілюмінесцентними детекторами.

Обладнання еталона розміщено у трьох приміщеннях газоаналітичного корпусу загальною площею 45 кв. м. У першому приміщенні розміщено обладнання для формування стаціонарного потоку газів, у другому — обладнання для відтворення одиниці об'єму та об'ємної витрати, у третьому — програмний логічний контролер та засоби автоматизації.

За результатами дослідження впливу температури приміщень і термодинамічних властивостей потоку газів та їх взаємодії на точність калібрування сопел було встановлено їх оптимальні значення.

Температура в приміщеннях повинна бути в межах (15...25) °С, зміна температури протягом 24 год — ± 2 °С. Різниця між температурою повітря у приміщенні та температурою води в термостаті з п'єзометром повинна бути не більшою за 1,5 К.

Під час роботи різниця температури між нижньою та верхньою частинами п'єзометра має бути не більшою за 0,2 °С.

Температурна рівновага між газом, п'єзометром і температурою води в термостаті повинна встановитися після вакуумування п'єзометра протягом 60 хв і витримування протягом 20 хв після цього. Тиск у п'єзометрі повинен бути не більшим за 60 Па ($6 \cdot 10^{-4}$ бар).

Для формування необхідного потоку використовують газ із температурою точки роси, не меншою від мінус 30 °С (відносною вологістю, не більшою за 2 %). Допустимий розмір часток — не більший за 5 мкм.

Час витримки сопел і усієї газової схеми еталона для забезпечення однакової температури перед вимірюванням становить 5 год.

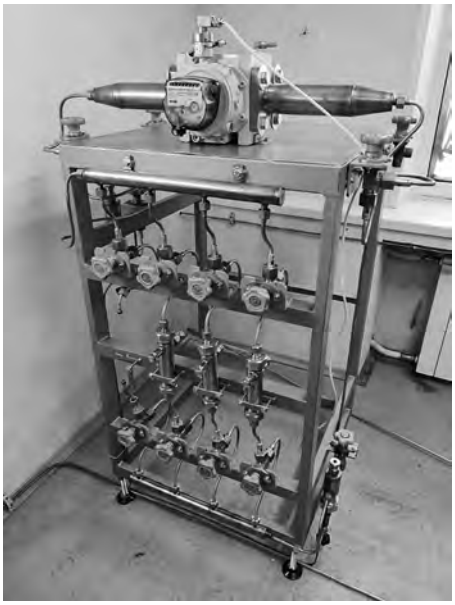

Рис. 9. Засіб для калібрування робочих еталонних сопел
Fig. 9. Device for calibrating working-standard nozzles

Перед вимірюванням вихідна кількість газу пропускається протягом 10 хв. Щоби не враховувати під час вимірювання динамічних функцій, швидкість витрати перед соплом підтримують не вищою за 15 м/с.

Середня температура на вході в сопло під час наповнення п'єзометра повинна бути в діапазоні (18...22) °С. Температура може змінюватися не більше ніж на ± 0,5 °С.

Діапазон об'ємної витрати газів (зведеної до стандартних умов: 20 °С; 101 325 Па), у якому відтворюють, зберігають та передають одиницю вимірювання, становить від 5 м^3/год до 65 м^3/год.

Еталон забезпечує відтворення, зберігання та передавання одиниці вимірювання із середнім квадратичним відхилом результату вимірювання, який не перевищує 0,01 % за 10 незалежних спостережень.

Невилучена систематична похибка не перевищує 0,1 %.

Стандартна невизначеність вимірювання за типом A — u_A = 0,01 %, за типом B — u_B = 0,05 %, сумарна стандартна невизначеність u_C = 0,05 %, розширена невизначеність U = 0,1 % з коефіцієнтом охоплення $к$ = 2 та довірчою ймовірністю p = 0,95).

Нестабільність еталона за рік становить 0,002 %.

Ємність джерела газів (сухого повітря, азоту, природного газу) — 0,4 м^3, максимальний тиск 150 бар; об'єм п'єзометра — 15 л; тиск калібрування від 10 до 50 бар.

Разом зі створенням первинного еталона, основними функціями якого є відтворення розмірів одиниць об'єму та об'ємної витрати різних газів під

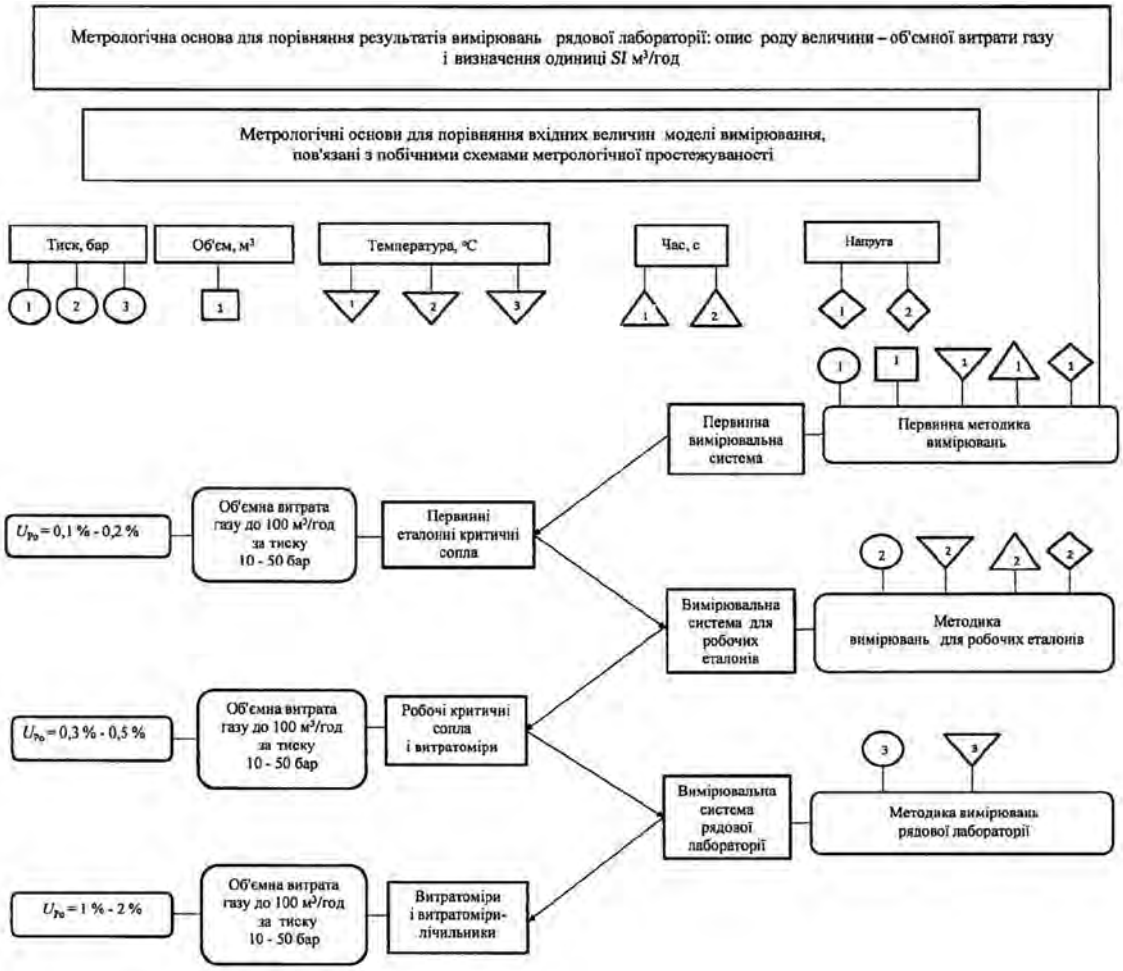

Рис. 10. Проект ланцюга метрологічної простежуваності результатів вимірювань об'ємної витрати газу за тиску від 1 МПа до 5 МПа

Fig. 10. Draft metrological traceability chain for the measurements of the gas volume flow rate at pressures from 1 MPa to 5 MPa

високим тиском, забезпечення простежуваності результатів вимірювання об'єму і об'ємної витрати газу до основних одиниць системи *SI* та калібрування критичних сопел Вентурі, потрібно створити робочі еталони одиниць об'єму та об'ємної витрати газу за високих тисків для діапазонів від 100 м^3/год і до 6000 м^3/год. Це завдання має, зокрема, і комерційний характер, оскільки на сьогодні в Україні немає робочих еталонів такого типу.

Побудова сучасної системи метрологічної простежуваності результатів вимірювань витрати газів за тиску від 1 МПа до 5 МПа дасть моливість застосовувати витратоміри та лічильники для комерційного обліку газів та природного газу згідно з вимогами [2] та метрологічними характеристиками, заявленими виробниками. Проект ланцюга метрологічної простежуваності у виді послідовності еталонів і калібрувань, через які пов'язують результат вимірювання з первинним еталоном одиниці об'ємної витрати, забезпечить функціювання системи передавання розміру одиниці на основі метрологічної простежуваності результатів вимірювань (рис. 10) [19]. Первинні критичні сопла Вентурі, відкалібровані на первинних еталонах *PVTt*, застосовують, для калібрування робочих еталонних сопел та робочих еталонних витратомірів, які, у свою чергу, застосовують у робочих еталонах для калібрування робочих витратомірів. У ланцюгу метрологічної простежуваності еталонами є критичні сопла, метрологічні характеристики яких встановлюють калібруванням за допомогою первинного еталона *PVTt*.

На рис. 11 показано також проект ієрархічної схеми для засобів вимірювань об'ємної витрати газів за тиску від 1 МПа до 5 МПа [20].

Метрологічні інститути *PTB* (ФРН), *NIST* (США) і *LNE-LADG* (Франція) провели звірення первинних еталонів витрати газу на повітрі та природному газі в діапазоні тиску від 0,9 бар до 42 бар за допомогою чотирьох критичних сопел Вентурі.

Результати вимірювань витрати повітря і природного газу за допомогою сопел узгоджувалися у межах 0,05 % і засвідчили, що критичні сопла, відкалібровані

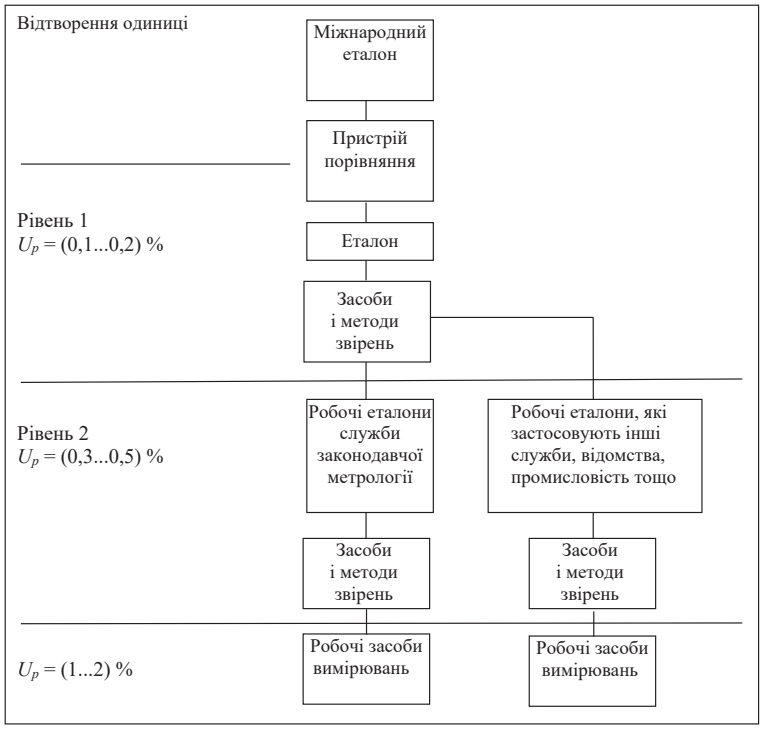

Рис. 11 Проект ієрархічної схеми для засобів вимірювань об'ємної витрати газів за тиску від 1 МПа до 5 МПа
Fig. 11 Draft hierarchical scheme for the instruments measuring gas flow rate at pressures from 1 MPa to 5 MPa

за повітрям як первинні еталонні сопла, можна застосовувати як робочі еталонні сопла на природному газі з невизначеністю, меншою від 0,2 %, за умови, що властивості газу відомі з достатньою точністю. Це відкриває широкі можливості для розвитку системи забезпечення єдності вимірювань витрати природного газу в Україні за тиску до 50 бар.

ВИСНОВКИ

Первинний еталон одиниць об'єму та об'ємної витрати газів, заснований на відтворенні одиниць за методом *PVTt* та передаванні розміру одиниць за допомогою критичних сопел Вентурі у діапазоні тиску від 1 МПа до 5 МПа, в Україні створено вперше.

Науково-технічний рівень розробленого еталона відповідає сучасним досягненням національної та світової науки й техніки. Застосування створеного еталона забезпечить простежуваність результатів вимірюваннь об'єму та об'ємної витрати газів за високого тиску до основних одиниць у діапазоні витрати до 100 м^3/год та калібрування первинних еталонних сопел з діаметром горловини від 0,1 мм до 3 мм. Розроблені пристрої та засоби можна використати для створення установок для калібрування робочих еталонних сопел з діаметром горловини до 13 мм та робочих витратомірів з діапазоном витрати від 100 м^3/год до 6000 м^3/год, що дасть можливість вийти на загальний європейський рівень забезпечення єдності вимірювань витрати газів за тиску до 50 бар.

Порядок роботи на еталоні та послідовність розрахунку всіх складників невизначеності еталона буде описано в наступній статті.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. ДСТУ 3383:2015 Державна повірочна схема для засобів вимірювань об'єму та об'ємної витрати газу (DSTU 3383:2015 State verification chart for the instruments measuring gas volume and volume flow rate).
2. International Recommendation OIML 140 Measuring systems for gaseous fuel. Edition 2007 (E).
3. Власюк Я.М., Коробко І.В., Розвиток і становлення ефективних систем обліку і контролю якості природного газу. Нафтогазова галузь України, (Vlasiuk Ya.M., Korobko I.V., Development and establishment of the effective systems for the natural gas accounting and quality control. Naftogazova galuz' Ukrainy). №2/2019, с/р. 36—41.
4. ISO 9300:2005 Measurement of gas flow by means of critical flow Venturi nozzles.
5. Aaron N. Johnson and John D. Wright, NIST, Gas Flowmeter Calibrations with the 26 m^3 PVTt Standard, NIST Special Publication 250-1046, November 25, 2009
6. John D. Wright, Aaron N. Johnson and Michael R. Moldover, Design and Uncertainty Analysis for a PVTt Gas Flow Standard, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, Volume 108, 21—47, Number 1, January-February, 2003.
7. LNE-LADG Altfortville, Gaz de France, Research and development division, Metrology and network Equipment Centre, 2005.
8. J.P.Vallet, C.Windenberger, P.Kewesan, G. Miault, P. Manrot, The conception and the construction of a new High Pressure Primary Facility for Gas, Cesame Exadebit SA LNE Ladg, 2008, France.
9. R. Mascomani, C.B. Suresh and V.Jayaraman, Calibration of Critical Flow Venturi Nozzles Using PVTt Method, Fluid Control Research Institute, Kharagpur, India, December, 15—17, 1999.
10. Ching-Yi Kuo, Wi-Lin Ho, Wen-Ti Lin and Chun-Min Su, A New PVTt Primary Gas Flow Standard at CMS. 9th ISFFM, Arlington, Virginia, April 14 to 17, 2015. Center for Measurement, Industrial Technology Research Institute, Taiwan.

11. Shin-ichi Nakao, Masaki Takamoto, A Study on the Conversion Factor of Sonic Venturi Nozzles. Proc. 2001 NCSL International Workshop & Symposium, 2001.
12. Yi Zhou, The introduction of the Multipurpose PVTt Gas Flow Facility, China, Jiangsu province quality and technical supervision gas flow measurement test center
13. І.С. Петришин, П.Я. Джочко, Т.І. Присяжнюк, В.А. Бас. Технічні аспекти створення еталонної бази для метрологічного забезпечення лічильників газу в експлуатації. Український метрологічний журнал, (I.S. Petryshyn, P.Ya. Dzhochko, T.I. Prysiazhniuk, V.A. Bass. Technical aspects of creating a measurement standards base for metrological support of the gas meters in operation. Ukrainskyi metrologhichnyi zhurnal) 2013, №1, с/р. 50—55.
14. M.Uhrig, P.Schley, M.Jaesehke, D.Vieth, K. Altfeld, I. Kraycin. High-precision measurement and calibration technology as a basis for correct gas billing. E.ON. Ruhzgas AG, 45326 Essen, Germany, 23rd World Gas Conference, Amsterdam, 2006.
15. Cesames Piston Prover test bench for flow calibration. Associated Laboratory for Gas Flow Measurement, 2005.
16. В.М. Красавин, С.В. Раинчик, В.П. Ившин, А.В. Красавин, И.А. Быков, С.С. Лобарев. Исходная эталонная установка государственного первичного эталона единиц объемного и массового расходов газа ГЭТ 118-2006. Процедура калибровки критических сопел. Вестник Казанского технологического университета (V.M. Krasavin, S.V. Rainchik, V.P. Ivshin, A.V. Krasavin, I.A. Bykov, S.S. Lobarev. The reference standard installation of the State Primary Standard of Units of Volume and Mass Gas Flow Rates GET 118-2006. Critical nozzles calibration procedure. Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta) 2013, т.16, № 10, с/р. 285—288.
17. І. Петришин, І. Присяжнюк, О.Бас. Впливні фактори конструктивних особливостей поршневих еталонних витратомірних установок, що працюють за високого тиску. Метрологія та прилади (I. Petryshyn, I. Prysiazhniuk, O. Bass. Influence factors of the design features of the piston standard flow-rate measuring installations operating at high pressure. Metrologia ta prylady) № 5, 2013, с/р. 6—16.
18. PTB and officially-recognized testing Facilities as a key factor in ensuring of correct natural gas flow measurement. Dr. Bodo Mickan, PTB Department 1.4, Working Group 1.43, High Pressure Gas, 2017.
19. Paul De Bievre, Rene Dybkaer, Ales Faigelj and D.Brynn Hibbert, Metrological traceability of measurement results in chemistry: concepts and implementation (IUPAC Technical Report), Pure Appl. Chem. Vol 83, No 10 pp. 1873—1935, 2011.
20. ДСТУ *OIML D*5:2007 Правила розроблення ієрархічних схем для засобів вимірювань (DSTU OIML D5:2007 Principles for the establishment of hierarchy schemes for measuring instruments).

Отримано / received: 18.03.2020.
Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. С.П. Войтенком (Україна).
Prof. S.P. Voitenko, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.