

УДК 681.122

І.С. Петришин, Т.І. Присяжнюк, О.А. Бас

ДП «Івано-Франківськстандартметрологія», Івано-Франківськ

## МАТЕМАТИЧНА ТА МЕТРОЛОГІЧНА МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ПЕРЕДАВАННЯ ОДИНИЦІ ОБ'ЄМУ ГАЗУ ПРИ ВИСОКОМУ ТИСКУ ПОРШНЕВОЮ УСТАНОВКОЮ

Стаття присвячена питанню забезпечення передавання одиниці об'єму газу при високому тиску поршневою установкою. На основі функціональної та монтажної схем розроблено математичну модель процесу передавання одиниці об'єму газу. Проведений метрологічний аналіз із використанням ітеративного методу РУМА. Розраховане значення невизначеності передавання одиниці об'єму газу при високому тиску.

**Ключові слова:** об'єм газу, високий тиск, невизначеність, передавання одиниці, поршнева установка.

### Вступ

В літературі [1] описаний процес відтворення одиниці об'єму газу при високому тиску поршневою установкою та проведений розрахунок невизначеності. **Метою** даної статті є реалізація наступного етапу в ланцюгу накопичення невизначеності – передавання одиниці об'єму газу при високому тиску. Для забезпечення передавання одиниці потрібно розробити фізичну модель процесу (функціональну та монтажну схеми передавання), описати його мате-

матичними залежностями, на основі яких провести метрологічний аналіз.

Розроблена монтажна та функціональна схема передавання одиниці об'єму газу до лічильників, яка наведена на рис. 1. Монтажна схема передбачає розміщення лічильника газу в горизонтальному положенні з прямими ділянками над поршневими секціями з використанням компенсуючих вібровставок. Згідно функціональної схеми проводяться вимірювання абсолютного тиску, перепаду тиску та температури газу в циліндрі та в лічильнику газу.

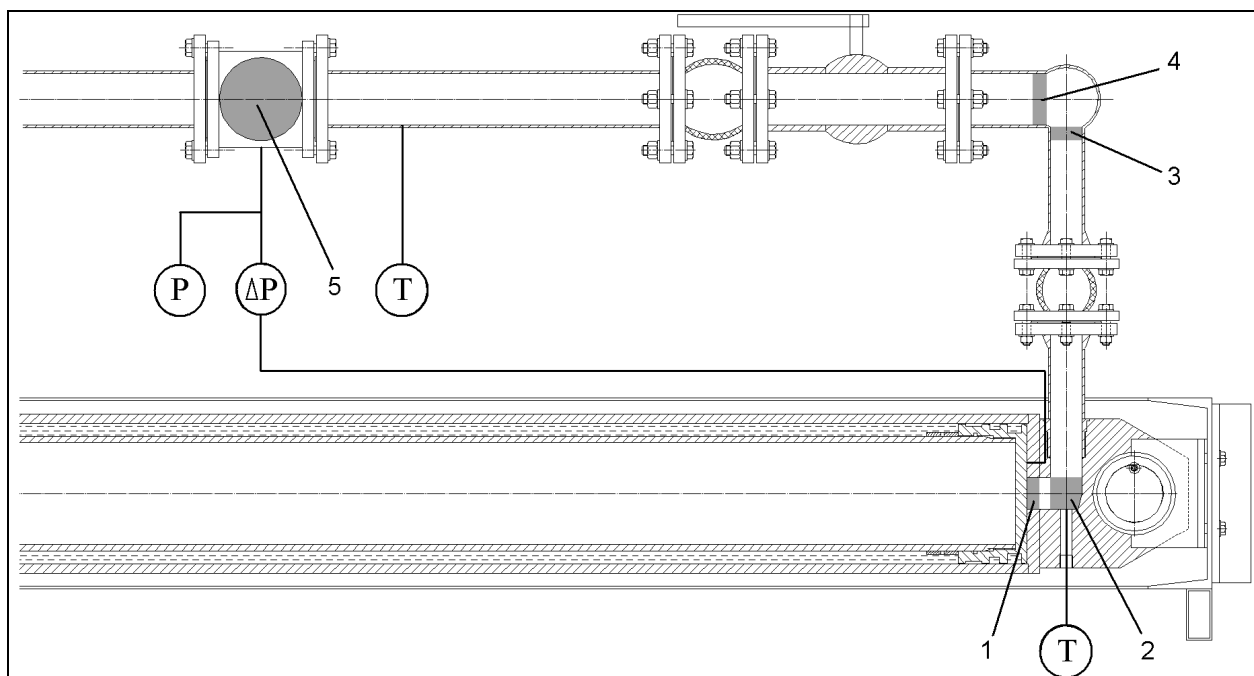


Рис. 1. Схематичне зображення місцевих опорів, що спричиняють втрати тиску:

- 1 – вихід газу при високому тиску з циліндра поршневої секції DN 220 в отвір DN 50,
- 2 – коліно 90° DN 50, 3 – вхід трубопроводу DN 50 у впускний колектор DN 100,
- 4 – вихід з колектора DN 100 в трубопровід прямої ділянки до лічильника газу DN 80,
- 5 – лічильник газу роторного типу

## Математична модель

Для розрахунку сумарних втрат тиску в трубопроводах установки запишемо початкове загальне рівняння Бернуллі для двох перерізів ділянки трубопроводів згідно рис. 1, яке має наступний вигляд:

$$P_1 + \rho_g \cdot g \cdot h_1 + \frac{\alpha_1 \cdot \rho_g \cdot v_1^2}{2} = P_2 + \rho_g \cdot g \cdot h_2 + \frac{\alpha_2 \cdot \rho_g \cdot v_2^2}{2} + P_B, \quad (1)$$

де  $P_1$  – абсолютний статичний тиск в циліндрах поршневої системи, приймаємо

$$P_1 = (1600000 + 101325) \text{ Па};$$

$P_2$  – абсолютний статичний тиск в ділянці трубопроводу після місцевого опору;

$$\rho_g \cdot g \cdot h -$$

гравітаційний тиск, зумовлений висотою стовпа газу  $h$  та його густиною  $\rho_g$ ;

$$\frac{\alpha \cdot \rho_g \cdot v^2}{2} -$$

динамічний (швидкісний) напір, спричинений швидкістю газу  $v$  з коефіцієнтом кінетичної енергії  $\alpha$ , який для турбулентного потоку складає

$$\alpha = (1,02 - 1,04) [2];$$

$P_B$  – втрати тиску при переході з перерізу 1 в переріз 2, які визначаються за такою залежністю:

$$P_B = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho_g \cdot v^2}{2} + \xi \cdot \frac{\rho_g \cdot v^2}{2} \quad (2)$$

де  $\lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho_g \cdot v^2}{2}$  – втрати тиску по довжині ділянки трубопроводу з довжиною  $l$  і діаметром  $d$  в залежності від коефіцієнта гідравлічного тертя  $\lambda$ ;

$\xi \cdot \frac{\rho_g \cdot v^2}{2}$  – доданок, який характеризує втрати тиску через місцевий опір в залежності від коефіцієнта місцевого опору  $\xi$ .

Оскільки розрахунки проводяться для одного циліндра поршневої секції, а конструкцією установки передбачено чотири паралельно встановлені циліндри з поршневими розділювачами [1], тому максимальне значення об'ємної витрати газу  $5,56 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$  необхідно розділити на чотири, в результаті, об'ємна витрата газу в одному циліндрі рівна  $1,38 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ .

Для позиції 1, рис. 1 втрати тиску будуть спричинені раптовим звуженням потоку газу, який виходить з циліндра  $d_1 = 220 \text{ мм}$  в отвір  $d_2 = 50 \text{ мм}$ . Проведемо для даної ділянки розрахунок втрат тиску згідно формул (1) та (2). З рис. 1 видно, що доданки гравітаційного тиску в правій і лівій частині рівня-

ня (1) скоротяться, оскільки центри перерізів знаходяться на однаковій висоті відносно площини порівняння. Згідно формули (2) необхідно визначити коефіцієнт місцевого опору  $\xi$  для раптового звуження потоку. Із [2] відомо, що коефіцієнт  $\xi$  визначається за наступним співвідношенням:

$$\xi_1 = \left( 1 - \frac{d_2^2}{d_1^2} \right), \quad (3)$$

який для даного перерізу складає  $\xi = 0,475$ .

Втрати тиску по довжині трубопроводу нехтувано малі, оскільки довжина прямої ділянки трубопроводу умовно рівна його діаметру.

Запишемо розрахункову формулу для визначення абсолютного статичного тиску в перерізі 2 ділянки 1:

$$P_2 = P_1 + \frac{\alpha_1 \cdot \rho_g \cdot v_1^2}{2} - \frac{\alpha_2 \cdot \rho_g \cdot v_2^2}{2} - \xi_1 \cdot \frac{\rho_g \cdot v_2^2}{2} = P_1 + \frac{\alpha_1 \cdot \rho_g \cdot v_1^2}{2} - \frac{\rho_g \cdot v_2^2}{2} \cdot (\alpha_2 + \xi_1). \quad (4)$$

Отже тиск  $P_2$ , розрахований згідно формули (4) становить:

$$P_2 = 1701325 + \frac{1,03 \cdot 10,88 \cdot 0,36^2}{2} - \frac{10,88 \cdot 7,07^2}{2} \cdot (1,03 + 0,475) = 1700916 (\text{Па}).$$

Згідно рис. 1 позиція 2, наступним місцевим опором є коліно  $90^\circ$  з однаковим вхідним та вихідними діаметрами  $d_1 = d_2 = 50 \text{ мм}$ . Гравітаційну складову в даному випадку знову скорочуємо, а втрати тиску по довжині трубопроводу нехтуємо. Коефіцієнт місцевого опору для коліна визначається згідно наступного рівняння [2]:

$$\xi_2 = \sin^2 \left( \frac{\Theta}{2} \right) + \cos^2 \left( \frac{\Theta}{2} \right), \quad (5)$$

де  $\Theta$  – кут повороту місцевого опору (коліна).

Для розрахунку абсолютного статичного тиску на виході коліна  $P_3$  застосуємо формулу (4) з відмінністю в тому, що вхідним тиском в коліно буде розрахований тиск  $P_2$ :

$$P_3 = 1700916 + \frac{1,03 \cdot 10,88 \cdot 7,07^2}{2} - \frac{10,88 \cdot 7,07^2}{2} \cdot (1,03 + 1) = 1700644 (\text{Па}).$$

З рис. 1 видно, що наступні втрати тиску спричинені наявністю прямої ділянки трубопроводу з

вібровставкою DN 50. Загальна довжина цієї ділянки складає близько 0,4 м, тому втрати тиску по довжині трубопроводу розраховувати недоцільно, оскільки їхнє чисельне значення буде складати декілька паскаль. Місцевий опір у вигляді вібровставки формально не чинить вплив на формування потоку газу та збільшення витрат тиску в ньому, оскільки довжина вібровставки менша 2D, впливом розширення – звуження потоку можна в першому наближенні знехтувати.

Наступним елементом розрахунку буде визначення абсолютного статичного тиску  $P_4$  на вході трубопроводу DN = 50 мм в загальний колектор DN = 100 мм. Для розрахунку тиску  $P_4$  потрібно визначити коефіцієнт  $\xi_3$  при раптовому розширенні потоку газу. Згідно [2] він визначається за наступною формулою:

$$\xi_3 = \left(1 - \frac{d_1^2}{d_2^2}\right)^2 \quad (6)$$

і для даного випадку складає  $\xi = 0,57$ .

Таким чином, згідно формули (4) проведемо розрахунок абсолютного статичного тиску  $P_4$ :

$$P_4 = 1700644 + \frac{1,03 \cdot 10,88 \cdot 7,07^2}{2} - \frac{10,88 \cdot 1,77^2}{2} \cdot (1,03 + 0,57) = 1700897(\text{Па}).$$

Проведені розрахунки показують зміну значення абсолютного статичного тиску від виходу з циліндра до загального впускного колектора. У впускному колекторі сумуються чотири потоки газу з циліндрів, тому на виході колектора DN 100 в трубопроводі DN 80, значення об'ємної витрати газу буде складати  $5,56 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ .

За таких умов знайдемо абсолютний статичний тиск  $P_5$  на вході у трубопровід прямої ділянки до лічильника газу DN 80, тобто на виході колектора DN 100. Розрахунок базується на формулах (3), (4):

$$P_5 = 1700897 + \frac{1,03 \cdot 10,68 \cdot 7,07^2}{2} - \frac{10,68 \cdot 11,05^2}{2} \cdot (1,03 + 0,09) = 1700433(\text{Па}).$$

Оскільки довжина прямої ділянки перед лічильником складає близько 2 м, тому втратами тиску по довжині трубопроводу нехтувати недоцільно. Для розрахунку цих втрат скористаємось першим доданком формули (2), в якій коефіцієнт гідравлічного тертя  $\lambda$  визначається за наступною формулою [3]:

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{68}{\text{Re}} + \frac{k_p}{d}\right)^{1/4}, \quad (7)$$

де  $k_p$  – коефіцієнт еквівалентної шорховатості трубопроводу (для сталевих трубопроводів  $k_p = 1 \cdot 10^{-4}$ );  $\text{Re}$  – число Рейнольдса, яке визначається як  $\text{Re} = \frac{v \cdot d \cdot \rho_g}{\eta}$ , де  $\eta$  – динамічна в'язкість газу.

Отже, коефіцієнт гідравлічного тертя рівний:

$$\lambda = 0,11 \times \left(\frac{68}{\frac{11,05 \cdot 0,08 \cdot 10,88}{10,4 \cdot 10^{-6}} + \frac{1 \cdot 10^{-4}}{0,08}}\right)^{1/4} = 0,02,$$

тоді втрати тиску по довжині прямої ділянки будуть рівні:

$$\Delta P_p = 0,02 \cdot \frac{2}{0,08} \cdot \frac{10,88 \cdot 11,05^2}{2} = 348(\text{Па}).$$

В результаті отримуємо значення сумарних втрат від виходу газу з циліндрів поршневих секцій до входу в лічильник газу, які складають:

$$\Delta P_z = (P_1 - P_2) + (P_2 - P_3) + (P_3 - P_4) + (P_4 - P_5) + \Delta P_p;$$

$$\Delta P_z = 408 + 272 + (-253) + 464 + 348 = 1240(\text{Па}).$$

Згідно рис. 1, позиція 8 показано, що місцевим опором в даному випадку є лічильник газу роторного типу, дослідження якого проводиться на установці. З принципу роботи лічильника зрозуміло, що найбільші втрати тиску будуть саме на лічильнику газу. Для лічильників цього типу втрати тиску  $P_{BL}$  розраховуються згідно наступної формули [4]:

$$P_{BL} = \Delta P_0 \cdot \frac{\rho_g}{\rho_C} \cdot P_L \cdot \left(\frac{q}{q_{\max}}\right)^2 \cdot \left(\frac{293,15}{273,15 + T}\right), \quad (8)$$

де  $\Delta P_0$  – втрати тиску в лічильнику газу, отримані при дослідженні на низькому тиску;

$P_L$  – абсолютний статичний тиск на вході в лічильник, визначається як:

$$P_L - \Delta P_z = 1700085(\text{Па});$$

$\rho_C$  – густина середовища, на якому проводили дослідження на низькому тиску, оскільки густина середовища в установці не міняється, тому

$$\frac{\rho_g}{\rho_C} = 1;$$

$q$  – значення об'ємної витрати газу, при якому визначають втрати тиску;

$q_{\max}$  – максимальна об'ємна витрата лічильника газу;

$T$  – температура газу в установці.

Відповідно, розрахуємо втрату тиску для максимального значення витрати газу, яку відтворює установка при абсолютному статичному тиску:

$$P_{BL} = 0,325 \cdot (1700,085) \times \left( \frac{5,56 \cdot 10^{-2}}{6,94 \cdot 10^{-2}} \right)^2 \cdot \left( \frac{293,15}{273,15 + 20} \right) = 3,536 \text{ (кПа)}.$$

В результаті отримаємо сумарне значення втрат тиску в установці, яке складає

$$\sum P = 1240 + 3536 = 4776 \text{ (Па)}.$$

Відповідно, з врахуванням значення абсолютного статичного тиску в установці  $P_1$  можна визначити абсолютний тиск в лічильнику газу, який складає

$$P_L = P_1 - \sum P = 1701325 - 4776 = 1696549 \text{ (Па)}.$$

Оскільки розроблена поршнева установка працює на середовищі природний газ при високому статичному тиску, при відтворенні значення максимальної витрати газу  $5,56 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ , час заміру складе 2,738 с. Як зазначено у [5] в поршневих установках такого типу відбувається політропний процес, тобто виконується умова відсутності теплообміну між установкою та навколишнім середовищем в процесі заміру. В даному випадку для розробки математичної моделі процесу передавання одиниці об'єму газу доцільно застосувати базові рівняння політропного процесу зміни об'єму в залежності від тиску та температури газу, які мають наступний вигляд:

$$P_1 \cdot V_1^n = P_2 \cdot V_2^n; \quad (9)$$

$$T_1 \cdot V_1^{(n-1)} = T_2 \cdot V_2^{(n-1)}, \quad (10)$$

де  $V_1$  – контрольний відтворюваний установкою об'єм газу ( $V_1 = 0,152127 \text{ м}^3$ ) [1];

$V_2$  – об'єм газу, що пройшов через лічильник;

$P_2$  – абсолютний статичний тиск газу в лічильнику, рівний розрахованому значенню  $P_L$ ;

$T_1, T_2$  – температура газу в циліндрах поршневих секцій та в лічильнику газу, відповідно.

Коефіцієнт політропи  $n$ , визначається як [6]:

$$n = \frac{c - c_p}{c - c_v} = \frac{i + 2}{i}, \quad (11)$$

де  $c$  – теплоємність газу за даних умов;

$c_p$  – теплоємність газу при постійному тиску (для природного газу  $c_p = 2,2459$ );

$c_v$  – теплоємність газу при постійному об'ємі ( $c_v = 1,7276$ );

$i$  – степінь свободи багатоатомного газу.

З врахуванням степеня свободи  $i = 6$  для багатоатомного газу, коефіцієнт політропи буде рівний

$$n = 1,33.$$

На основі рівнянь (9), (10) виразимо зміну температури в установці за час заміру через зміну тиску, зумовлену втратами, як:

$$T_1 \cdot P_1^{\left(\frac{1-n}{n}\right)} = T_2 \cdot P_2^{\left(\frac{1-n}{n}\right)}. \quad (12)$$

Відповідно, температура газу  $T_2$  в лічильнику буде визначатися як:

$$T_2 = T_1 \cdot \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\left(\frac{n-1}{n}\right)}, \quad (13)$$

і складе для нашого випадку за умови стандартних температурних умов при передаванні одиниці:

$$T_2 = 293,15 \cdot \left( \frac{1696549}{1701325} \right)^{\left(\frac{1,33-1}{1,33}\right)} = 292,96^\circ \text{C}.$$

Згідно отриманих даних проведемо оцінку абсолютної зміни температури в установці за час заміру при максимальному значенні відтворюваної об'ємної витрати газу:

$$\Delta T = T_1 - T_2 = 293,15 - 292,94 = 0,19^\circ \text{C}.$$

За результатами вищенаведених розрахунків можна стверджувати, що зміна температури в установці за час дослідження лічильника газу на максимальній витраті складає

$$\Delta T = 0,19^\circ \text{C},$$

що спричинить зміну вимірюваного лічильником газу об'єму на 0,065 %.

З врахуванням умови нерозривності потоку та балансу мас можна провести розрахунок об'єму газу  $V_2$ , що пройшов через лічильник, представлений у вигляді формули приведення об'єму газу до стандартних умов:

$$V_2 = V_1 \cdot \frac{P_1}{P_2} \cdot \frac{T_2}{T_1} \cdot \frac{K_2}{K_1}, \quad (14)$$

де  $K_1, K_2$  – коефіцієнти стискуваності контрольного об'єму газу в циліндрах установки та в лічильнику газу.

Зважаючи на ту особливість, що розроблена поршнева витратовимірювальна установка має можливість працювати на будь-яких неагресивних та інертних газах, з метою уточнення значення приведенного об'єму газу, авторами пропонується синтезувати формулу приведення об'єму газу до стандартних умов та формулу температурного розширення об'єму газу, яка виражається як [6]:

$$V_2 = V_1 \cdot (1 + \beta \cdot (T_2 - T_1)), \quad (15)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт об'ємного розширення газу (його значення для типових газів наведено в табл. 1 [7]).

Отже, після заміни співвідношення температури в формулі (14) на залежність з формули (15), отримаємо уточнену формулу приведення об'єму газу до стандартних умов.

Таблиця 1  
Коефіцієнт об'ємного розширення газів

Середовище	$\beta \cdot 10^{-3}, \text{K}^{-1}$
Азот	3,672
Аргон	3,676
Неон	3,661
Водень	3,664
Повітря	3,665
Гелій	3,660
Двоокис вуглецю	3,726
Окис вуглецю	3,667
Кисень	3,672
Метан	3,678
Етан	3,750
Ацетилен	3,726
Пропан	3,720

Уточнена формула приведення являє собою математичну модель процесу передавання одиниці об'єму газу при високому тиску поршневою установкою і має наступний вигляд:

$$V_2 = V_1 \cdot \frac{P_1}{P_2} \cdot (1 + \beta \cdot (T_2 - T_1)) \cdot \frac{K_2}{K_1}. \quad (16)$$

### Метрологічна модель

На основі рівняння (16) проведемо попередній розрахунок невизначеності передавання одиниці об'єму газу поршневою установкою із застосуванням ітеративного методу PUMA [8]. Розрахунок невизначеності передавання передбачає використання апріорних систематичних даних, отриманих з технічної документації на давачі, які застосовують при передаванні одиниці. Для оцінки впливу кожного компоненту залежності (16), необхідно визначити їхні вагові внески в розрахункову формулу невизначеності передавання. Коефіцієнти впливу визначаються як часткові похідні функції (16), за умови наступних значень змінних  $V_1 = 0,152127 \text{ м}^3$  [1],  $P_1 = 1701325$ ,  $P_2 = 1696549 \text{ Па}$ ,  $T_1 = 293,15 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_2 = 292,96 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\beta$  визначається з табл. 1,  $K_1 = 0,9662$ ,  $K_2 = 0,9663$ . Отже, часткові похідні рівні:

$$\frac{\partial V}{\partial V_1} = \frac{P_1}{P_2} \cdot (1 + \beta \cdot (T_2 - T_1)) \cdot \frac{K_2}{K_1} = 1,002$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial P_1} &= V_1 \cdot \frac{1}{P_2} \cdot (1 + \beta \cdot (T_2 - T_1)) \cdot \frac{K_2}{K_1} = \\ &= \frac{V_1}{P_2} = 8,96 \cdot 10^{-8}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial P_2} &= -V_1 \cdot \frac{P_1}{P_2^2} \cdot (1 + \beta \cdot (T_2 - T_1)) \cdot \frac{K_2}{K_1} = \\ &= -V_1 \cdot \frac{P_1}{P_2^2} = -8,98 \cdot 10^{-8}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial T_1} &= V_1 \cdot \frac{P_1}{P_2} \cdot (1 + \beta \cdot (T_2 - T_1)) \cdot \frac{K_2}{K_1} = \\ &= -V_1 \cdot \beta = -5,61 \cdot 10^{-4}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial T_2} &= V_1 \cdot \frac{P_1}{P_2} \cdot (1 + \beta \cdot (T_2 - T_1)) \cdot \frac{K_2}{K_1} = \\ &= V_1 \cdot \beta = 5,61 \cdot 10^{-4}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial K_1} &= -V_1 \cdot \frac{P_1}{P_2} \cdot (1 + \beta \cdot (T_2 - T_1)) \cdot \frac{K_2}{K_1^2} = \\ &= -\frac{1}{K} = -0,158; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial K_2} &= V_1 \cdot \frac{P_1}{P_2} \cdot (1 + \beta \cdot (T_2 - T_1)) \cdot \frac{1}{K_1} = \\ &= \frac{1}{K} = 0,158. \end{aligned}$$

Запишемо формулу для розрахунку апріорної розширеної невизначеності передавання одиниці об'єму газу при високому тиску за типом В:

$$\begin{aligned} U_{VPB} &= \\ &= \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial V_1} \cdot U_V\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial P_1} \cdot U_P\right)^2 + \\ &+ \left(\frac{\partial V}{\partial P_2} \cdot U_P\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial T_1} \cdot U_T\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial T_2} \cdot U_T\right)^2 + \\ &+ \left(\frac{\partial V}{\partial K_1} \cdot U_K\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial K_2} \cdot U_K\right)^2}, \quad (12) \end{aligned}$$

де  $U_V$  – невизначеність відтворення одиниці об'єму газу при високому тиску;  $U_P$  – невизначеність вимірювання тиску;  $U_T$  – невизначеність вимірювання температури;  $U_K$  – невизначеність розрахунку коефіцієнта стискуваності.

У відсотковому вираженні розширена невизначеність передавання визначатиметься як:

$$U_{VP} = \frac{U_{VPB}}{V} \cdot 100. \quad (13)$$

З [5] отримуємо значення невизначеності відтворення одиниці об'єму газу при високому тиску. Для давачів тиску нормується приведена похибка  $\gamma$ , яка для давача абсолютного тиску РТХ 5072 складає 0,04%, тому необхідно здійснити перехід до невизначеності згідно формули:

$$U = \frac{\gamma \cdot P}{\sqrt{3} \cdot 100}. \quad (14)$$

Таким чином невизначеність вимірювання тиску складає

$$U_P = \frac{0,04 \cdot 1698200}{\sqrt{3} \cdot 100} = 392,64(\text{Па}).$$

Що стосується давачів температури, їхній основний метрологічний параметр – абсолютна похибка вимірювання температури. Для давача ОЕ-TS абсолютна похибка становить 0,1 °С, що в перерахунку на невизначеність складе  $U_T = 0,0578$  °С.

Як відомо з [9] похибка розрахунку коефіцієнта стискуваності визначається за такою формулою:

$$\delta_K = \sqrt{\delta_M^2 + \delta_{vd}^2}, \quad (15)$$

де  $\delta_M$  – похибка розрахунку коефіцієнту стискуваності, яка згідно табл. 1 [9] складає 0,1 %;

$\delta_{vd}$  – похибка вимірювання вхідних даних для розрахунку коефіцієнту стискуваності (в даному випадку тотожна з похибкою еталона одиниці молярної частки компонентів у газових середовищах і складає 0,02 %).

Таким чином, із використанням формули (14) невизначеність розрахунку коефіцієнта стискуваності становить  $U_K = 5,58 \cdot 10^{-4}$ .

Із застосуванням усіх апріорних значень невизначеностей проведемо розрахунок розширеної невизначеності передавання одиниці об'єму газу при високому тиску за типом В:

$$U_{VPB} = \sqrt{\left(1,002 \cdot 3,86 \cdot 10^{-5}\right)^2 + \left(8,96 \cdot 10^{-8} \cdot 392,64\right)^2 + \left(-8,98 \cdot 10^{-8} \cdot 392,64\right)^2 + \left(-5,61 \cdot 10^{-4} \cdot 0,0578\right)^2 + \left(5,61 \cdot 10^{-4} \cdot 0,0578\right)^2 + \left(-0,158 \cdot 5,58 \cdot 10^{-4}\right)^2 + \left(0,158 \cdot 5,58 \cdot 10^{-4}\right)^2} = 1,4 \cdot 10^{-4},$$

$$U_{VP} = \frac{1,4 \cdot 10^{-4}}{0,152127} \cdot 100 = 0,096\%.$$

Отримане значення невизначеності умовно надмірне, оскільки з практичних досліджень можна

стверджувати, що при реальному калібруванні давачів у складі вимірювальних каналів, їхні паспортні дані занижені, тобто їхня систематична складова невизначеності буде меншою, ніж заявлена. Відповідно, розрахунок невизначеності по типу А, тобто випадкової, теж буде проведено після безпосереднього калібрування давачів.

## Висновок

Згідно розроблених фізичної та математичної моделей проведений метрологічний аналіз процесу передавання одиниці об'єму газу лічильникам газу при високому тиску. Розширена невизначеність передавання становить 0,096 %.

## Список літератури

1. Бас О.А. Метрологічні аспекти відтворення поршневими установками одиниці об'єму газу при тиску 1,6 МПа / О.А. Бас // Метрологія та прилади. – 2014. – № 1 (45). – С. 32–41.
2. Френзель Н.З. Гидравлика / Н.З. Френзель. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1956. – 456 с.
3. Гейер В.Г. Гидравлика и гидропривод / В.Г. Гейер, В.С. Дулин, А.Н. Заря. – М.: Недра, 1991.
4. Rotary piston gas meter. Handbook. – Instromet. Gas measurement and control equipment, 2002. – p. 32.
5. Kutin J. Dynamic effects in a clearance-sealed piston prover for gas flow measurements / J. Kutin, G. Bobovnik, I. Bajsic // Metrologia № 48, 2011, p. 123–132.
6. Сивухин Д.В. Общий курс физики. В 5 т. Т II. Термодинамика и молекулярная физика. 5-е изд., испр. / Д.В. Сивухин. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 544 с.
7. Кухлинг Х. Справочник по физике / Х. Кухлинг. – Пер. с нем. 2-е изд. – М.: Мир, 1985. – 250 с.
8. Чалий С. Метод та інформаційна технологія створення еталонів одиниць вимірювання в умовах обмежених ресурсів / С. Чалий, В. Чалий, Т. Ільницька // Стандартизація сертифікація якості. – 2009. – № 2. – С. 34–38.
9. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение коэффициента сжимаемости ГОСТ 30319.2–96 [1997-07-01] Мн, 109с.

Надійшла до редколегії 2.04.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. П.М. Райтер, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ И МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ПЕРЕДАЧИ ЕДИНИЦЫ ОБЪЕМА ГАЗА ПРИ ВЫСОКОМ ДАВЛЕНИИ ПОРШНЕВОЙ УСТАНОВКОЙ

И.С. Петришин, Т.И. Присяжнюк, А.А. Бас

Статья посвящена вопросу обеспечения передачи единицы объема газа при высоком давлении поршневой установкой. На основе функциональной и монтажной схем разработана математическая модель процесса передачи единицы объема газа. Проведенный метрологический анализ с использованием итеративного метода PUMA. Рассчитанное значение неопределенности передачи единицы объема газа при высоком давлении.

**Ключевые слова:** объем газа, высокое давление, неопределенность, передачи единицы, поршневая установка.

## MATHEMATICAL AND METROLOGY MODEL OF THE PISTON PROVER TRANSFER PROCESS HIGH PRESSURE GAS VOLUME UNIT

I.S. Petrushun, T.I. Prisyajnyuk, O.A. Bas

The article focuses on providing piston prover high pressure gas volume unit transfer. On the basis of functional and mounting schemes developed a mathematical model gas volume unit transfer. Metrological analysis using an iterative method PUMA. The calculated uncertainty prover high pressure gas volume unit transfer.

**Keywords:** gas volume, high pressure, uncertainty, unit transfer, the piston prover.