

ТЕОРІЯ ТА ПРАКТИКА СУЧАСНОГО ПРЕЦИЗІЙНОГО ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

УДК 681.121.84:006.057

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ВПЛИВУ ПРИ РОЗРАХУНКУ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ РЕЗУЛЬТАТУ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ ГАЗУ ВИТРАТОМІРОМ З ДІАФРАГМОЮ

Лесовой Л. В., Фединець В. О., Кузик В. А.

Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

E-mail: techinfoflow@yahoo.co.uk

В статті представлено результати дослідження та порівняльний аналіз відносних коефіцієнтів впливу вхідних величин на об'ємну витрату газу, приведену до стандартних умов. Показано, що у стандартах ДСТУ ГОСТ 8.586.2,5:2009 наведено спрощені рівняння для розрахунку відносних коефіцієнтів впливу, що збільшує значення відносної невизначеності результату вимірювання витрати газу. Отримано нові рівняння для розрахунку відносних коефіцієнтів впливу вхідних величин на об'ємну витрату природного газу, приведену до стандартних умов. Встановлено, що основні відносні коефіцієнти впливу приймають менші значення ніж коефіцієнти, рівняння яких наведені у стандартах ДСТУ ГОСТ 8.586.5:2009. Значення коефіцієнтів впливу, отримані за розробленими авторами рівняннями добре узгоджуються із результатами їх розрахунку за рівняннями наведеними в ISO 5168:2005. Отримані аналітичні залежності зменшують відносну сумарну розширену невизначеність результату вимірювання витрати газу на 0,05 %.

***Ключові слова:** вимірювання витрати, діафрагма, витратомір, коефіцієнт впливу, невизначеність.*

Вступ. Постановка задачі

При вимірюванні витрати газу на сьогодні широкого застосування набули витратоміри із стандартною діафрагмою, побудовані на методі змінного перепаду тиску. Цей метод вимірювання витрати газу відомий вже давно, але він постійно вдосконалюється введенням нових аналітичних залежностей коефіцієнтів, що входять у рівняння витрати газу, а рівняння для розрахунку невизначеності результату вимірювання витрати газу та її складових залишаються незмінними. Алгоритми розрахунку такої невизначеності наведені в нових Міжнародних стандартах ISO 5168:2005 [1], ISO 5167-2:2003 [2] і в Національних стандартах України ДСТУ ГОСТ 8.586.2,5:2009 [3, 4]. Але в одних стандартах наведені різниці, а в інших спрощені алгоритми визначення відносної сумарної розширеної невизначеності (невизначеності) результату вимірювання витрати газу, а також її складових, до яких відносяться і відносні коефіцієнти впливу (ВКВ) вхідних величин на витрату газу. Все це змінює значення невизначеності результату вимірювання витрати газу. В зв'язку з цим необхідно провести аналіз існуючих рівнянь та алгоритмів для розрахунку складових невизначеності результату їх вимірювання і отримати їх нові аналітичні залежності. І це питання є актуальним.

Метою цієї статті є розробка нових рівнянь для розрахунку ВКВ вхідних величин на об'ємну витрату газу, до якого відноситься і природний газ (ПГ), приведено до стандартних умов, і уточнити рівняння невизначеності результату вимірювання витрати газу.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

Виходячи з положень теорії невизначеності [1, 4, 5, 6], сумарна розширена невизначеність $U_c(y)$ результату вимірювання фізичної величини y непрямим методом – це величина, яка визначає інтервал навколо результату вимірювання, в межах якого, можна очікувати, міститься більша частина розподілу значень, які з достатньою підставою могли би бути приписані вимірюваній величині. Відносна сумарна розширена невизначеність $U'_c(y)$ – це відношення сумарної розширеної невизначеності до значення оцінки вимірюваної величини y , виражене у відсотках. Значення невизначеності $U'_c(y)$ розраховують за рівнянням [1, 5, 6]

$$U'_c(y) = 100 \frac{U_c(y)}{y} = \sqrt{U'^2_{F1} + \sum_{i=1}^n [\vartheta_{x_i} U'(x_i)]^2}, \quad (1)$$

де U'_{F1} – невизначеність, приписана функціональній залежності визначення величини y ; ϑ_{x_i} – ВКВ i -о параметру x_i на величини y ; $U'(x_i)$ – невизначеність коефіцієнта або іншої вимірюваної величини $x_i \in X$ (X – множина вимірних або визначених за рівнянням величин).

Значення ВКВ ϑ_{x_i} обчислюють за рівнянням [1, 4, 6]

$$\vartheta_{x_i} = \frac{\partial y}{\partial x_i} \cdot \frac{x_i}{y}. \quad (2)$$

Проаналізувавши стандарти ДСТУ ГОСТ 8.586.2,5:2009 [3, 4], були визначені вхідні дані, за допомогою яких обчислюють значення об'ємної витрати q_c газу. Виходячи з цього для визначення об'ємної витрати q_c газу, приведеної до стандартних умов, з врахуванням того, наприклад, що для розрахунку коефіцієнта стисливості K ПГ була взята методика Gerg–91 мод. [7], а для показника адіабати k ПГ – методика Кобза [8], і витратоміра із стандартною діафрагмою, можна записати

$$q_c = f(\Delta p, p, T, \rho_c, x_a, x_y, d_{20}, D_{20}, r_n, \tau, R_{ш}), \quad (3)$$

де Δp – перепад тиску на діафрагмі; p – абсолютний тиск газу; T – термодинамічна температура газу; ρ_c – густина газу за стандартних умов (абсолютного тиску газу $p_c = 101325$ Па та термодинамічної температури газу $T_c = 293,15$ К); x_a і x_y – молярна частка відповідно азоту і діоксиду вуглецю у ПГ; d_{20} і D_{20} – відповідно діаметр отвору діафрагми та внутрішній діаметр вимірювального

трубопроводу за температури газу $t = 20^{\circ}\text{C}$; r_{Π} – початковий радіус притуплення вхідного канта діафрагми; τ – час експлуатації діафрагми; $R_{\text{ш}}$ – еквівалентна шорсткість внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу.

Застосовуючи рівняння наведені у [3, 4, 7, 8], запишемо у табл. 1 рівняння ВКВ вхідних величин на об’ємну витрату ПГ, приведену до стандартних умов.

Таблиця 1. Рівняння ВКВ вхідної величини на об’ємну витрату природного газу, приведену до стандартних умов.

| № з/п | Параметр x_i | Коефіцієнт впливу ϑ_{x_i} | № з/п | Параметр x_i | Коефіцієнт впливу ϑ_{x_i} |
|-------|----------------|--|-------|-------------------|---|
| 1 | Δp | $\vartheta_{\Delta p} = \sqrt{0,25 + \left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon}\right)^2}$ | 7 | d_{20} | $\vartheta_d = \frac{2}{1 - \beta^4}$ |
| 2 | p | $\vartheta_p = \sqrt{\left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon}\right)^2 (1 + \vartheta_{kp}^2) + 0,25(1 + \vartheta_{kp}^2)}$ | 8 | D_{20} | $\vartheta_D = \frac{2\beta^4}{1 - \beta^4}$ |
| 3 | T | $\vartheta_T = \sqrt{\left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon}\right)^2 \vartheta_{KT}^2 + 0,25(1 + \vartheta_{KT}^2)}$ | 9 | r_{Π} | $\vartheta_{r_{\Pi}} = \frac{K_{\Pi} - 1}{K_{\Pi}}$ |
| 4 | ρ_c | $\vartheta_{\rho_c} = \sqrt{\left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon}\right)^2 \vartheta_{kp_c}^2 + 0,25(1 + \vartheta_{kp_c}^2)}$ | 10 | τ | $\vartheta_{\tau} = 0$ |
| 5 | x_a | $\vartheta_{x_a} = \sqrt{\left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon}\right)^2 \vartheta_{Kx_a}^2 + 0,25\vartheta_{Kx_a}^2}$ | 11 | R_{\varnothing} | $\vartheta_{R_{\varnothing}} = \frac{K_{\varnothing} - 1}{K_{\varnothing}}$ |
| 6 | x_y | $\vartheta_{x_y} = -0,5\vartheta_{Kx_y}$ | | | |

У формулах (табл. 1) наведені такі коефіцієнти: ε – коефіцієнт розширення ПГ; K_{\varnothing} – поправковий коефіцієнт, який враховує шорсткість внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу; K_{Π} – поправковий коефіцієнт, який враховує притуплення вхідного канту діафрагми; $\vartheta_{\Delta p}$, ϑ_p , ϑ_T , ϑ_{ρ_c} , ϑ_{x_a} , ϑ_{x_y} , ϑ_d , ϑ_D , $\vartheta_{r_{\Pi}}$, ϑ_{τ} , і $\vartheta_{R_{\varnothing}}$ – ВКВ відповідно перепаду тиску на діафрагмі, абсолютного тиску ПГ, термодинамічної температури ПГ, густини ПГ за стандартних умов, молярної частки азоту у ПГ, молярної частки діоксиду вуглецю у ПГ, діаметра отвору діафрагми, внутрішнього діаметра вимірювального трубопроводу, початкового радіуса притуплення вхідного канта діафрагми, часу експлуатації діафрагми, еквівалентної шорсткості внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу на об’ємну витрату ПГ, приведену до стандартних умов; ϑ_{kp} , ϑ_{KT} , ϑ_{kp_c} , ϑ_{Kx_a} і ϑ_{Kx_y} – ВКВ відповідно абсолютного тиску ПГ, термодинамічної температури ПГ, густини ПГ за стандартних умов, молярної частки азоту у ПГ та молярної частки діоксиду вуглецю у ПГ на коефіцієнт стисливості ПГ [7]; ϑ_{kp} ,

$\vartheta_{\kappa T}$, $\vartheta_{\kappa \rho_c}$ і $\vartheta_{\kappa x_a}$ – ВКВ відповідно абсолютного тиску ПГ, термодинамічної температури ПГ, густини ПГ за стандартних умов, молярної частки азоту у ПГ на показник адіабати ПГ [8].

Як бачимо з табл. 1 рівняння для визначення ВКВ $\vartheta_{\Delta p}$, ϑ_p , ϑ_T , ϑ_{ρ_c} , ϑ_{x_a} представляють собою геометричну суму аргументів. Це пояснюється тим, що при визначенні ВКВ спочатку розраховували невизначеності коефіцієнтів, що входять у рівняння об'ємної витрати q_c газу, а потім обчислювали невизначеності кожної складової цього коефіцієнта. При цьому не враховувався вплив знаків однакових вхідних величин у різних коефіцієнтах рівняння об'ємної витрати q_c газу. Тому, щоб уникнути цього, необхідно визначити ВКВ вхідних величин, що наведені у рівнянні (3), на об'ємну витрату газу, приведену до стандартних умов, а не окремо для кожного із коефіцієнтів, що входить у рівняння витрати газу. Деякі рівняння ВКВ ϑ_d , ϑ_D , ϑ_{r_n} , ϑ_τ , і ϑ_{R_θ} наведені у спрощеному вигляді.

Це все призводить до завищення значення невизначеності результату вимірювання об'ємної витрати ПГ, приведені до стандартних умов.

Висвітлення основного матеріалу

Уточнення рівняння для розрахунку невизначеності результату вимірювання витрати q_c газу витратомірами із застосуванням стандартних діафрагм здійснювалось у відповідності до методології, наведеної у [9].

Застосовуючи рівняння (1) і (3), запишемо загальне рівняння для розрахунку невизначеності результату вимірювання об'ємної витрати q_c ПГ, для якого, як приклад, була обрана методика визначення коефіцієнта стисливості Gerg–91 мод. [7],

$$U'_{q_c} = \left[U'^2_{F_x} + U'^2_C + (\vartheta_{\Delta p} U'_{\Delta p})^2 + (\vartheta_p U'_p)^2 + (\vartheta_T U'_T)^2 + (\vartheta_{\rho_c} U'_{\rho_c})^2 + (\vartheta_{x_a} U'_{x_a})^2 + (\vartheta_{x_y} U'_{x_y})^2 + (\vartheta_d U'_d)^2 + (\vartheta_D U'_D)^2 + (\vartheta_{r_n} U'_{r_n})^2 + (\vartheta_\tau U'_\tau)^2 + (\vartheta_{R_\theta} U'_{R_\theta})^2 \right]^{0.5}, \quad (4)$$

де U'_C , $U'_{\Delta p}$, U'_p , U'_T , U'_{ρ_c} , U'_{x_a} , U'_{x_y} , U'_d , U'_D , U'_{r_n} , U'_τ , U'_{R_θ} – невизначеність відповідно коефіцієнта витікання діафрагми, результату вимірювань перепаду тиску на діафрагмі, абсолютного тиску ПГ, термодинамічної температури ПГ, густини ПГ за стандартних умов, молярної частки азоту, молярної частки діоксиду вуглецю, діаметра отвору діафрагми, внутрішнього діаметра вимірювального трубопроводу, початкового радіуса притуплення вхідного канта діафрагми, часу експлуатації діафрагми, еквівалентної шорсткості внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу; U'_{F_x} – невизначеність, яка приписана функціональним залежностям визначення коефіцієнта розширення ПГ, показника адіабати ПГ і коефіцієнта стисливості ПГ.

Визначимо ВКВ вхідних величин на об'ємну витрату q_c ПГ, які є складовими рівняння (4) невизначеності результату вимірювання витрати газу.

Для цього, застосовуючи рівняння (2) з врахуванням рівняння (3) та рівнянь для визначення:

- коефіцієнта витікання C діафрагми [3, 7, 11];
- коефіцієнта швидкості входу E [3, 7, 11];
- поправкового коефіцієнта K_ϕ [7, 11], який враховує шорсткість внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу;
- поправкового коефіцієнта K_{Π} [7, 11], який враховує притуплення вхідного канта діафрагми;
- коефіцієнта розширення ε ПГ [3, 7, 11],

запишемо рівняння для визначення об'ємної витрати q_c газу, приведеної до стандартних умов, як

$$q_c = \frac{K_{q_{мзв}}}{\sqrt{\frac{1}{d^4} - \frac{1}{D^4}}} C(d, D) K_{\text{ш}}(d, D, R_{\text{ш}}) K_{\Pi}(d, r_{\Pi}, \tau) \times \quad (5)$$

$$\times [1 - a_\varepsilon(d, D)(1 - \tau_\varepsilon)] \sqrt{\frac{\Delta p p}{\rho_c T K(p, T, \rho_c, x_a, x_y)}}$$

де

$$K_{q_{мзв}} = \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{2T_c}{p_c}};$$

$$a_\varepsilon = 0,351 + 0,256 \cdot \beta^4 + 0,93 \cdot \beta^8;$$

$$\tau_\varepsilon = \left(1 - \frac{\Delta p}{p}\right)^{\frac{1}{\kappa(p, T, \rho_c, x_a)}};$$

$$\beta = \frac{d}{D}.$$

На базі рівнянь (2) і (5) отримаємо рівняння для визначення ВКВ вхідних величин на об'ємну витрату q_c ПГ, приведену до стандартних умов,

$$\vartheta_{\Delta p} = 0,5 + \left(\frac{1}{\tau_\varepsilon^\kappa} - 1\right) \frac{1 - a_\varepsilon - \varepsilon}{\kappa \varepsilon}; \quad (6)$$

$$\vartheta_p = 0,5(1 - \vartheta_{Kp}) - \frac{1 - a_\varepsilon - \varepsilon}{\varepsilon} \left[\left(\frac{1}{\tau_\varepsilon^\kappa} - 1\right) \frac{1}{\kappa} - \vartheta_{Kp} \ln(\tau_\varepsilon) \right]; \quad (7)$$

$$\vartheta_T = \frac{1 - a_\varepsilon - \varepsilon}{\varepsilon} \vartheta_{\kappa T} \ln(\tau_\varepsilon) - 0,5(1 + \vartheta_{\kappa T}); \quad (8)$$

$$\vartheta_{\rho_c} = \frac{1 - a_\varepsilon - \varepsilon}{\varepsilon} \vartheta_{\kappa \rho_c} \ln(\tau_\varepsilon) - 0,5(1 + \vartheta_{\kappa \rho_c}); \quad (9)$$

$$\vartheta_{x_a} = \frac{1 - a_\varepsilon - \varepsilon}{\varepsilon} \vartheta_{\kappa x_a} \ln(\tau_\varepsilon) - 0,5 \vartheta_{\kappa x_a}; \quad (10)$$

$$\vartheta_{x_y} = -0,5 \vartheta_{\kappa x_y}; \quad (11)$$

$$\vartheta_d = \frac{2}{1 - \beta^4} + \vartheta_{C\beta} + \vartheta_{\varepsilon\beta} + \vartheta_{K_m\beta} + \vartheta_{K_n d}; \quad (12)$$

$$\vartheta_D = - \left(\frac{2\beta^4}{1 - \beta^4} + \vartheta_{C\beta} + \vartheta_{\varepsilon\beta} + \vartheta_{K_m\beta} \right); \quad (13)$$

де

$$\vartheta_{\varepsilon\beta} = -(1,024\beta^4 + 7,44\beta^8)(\varepsilon^{-1} - 1)a_\varepsilon^{-1};$$

$$\vartheta_{K_\phi\beta} = 3,5(1 - K_\phi^{-1});$$

$$\vartheta_{C\beta} = \left\{ 0,0522\beta^2 - 1,728\beta^8 + 0,0003647 \left(\frac{10^6\beta}{\text{Re}} \right)^{0,7} + \right. \\ \left. + \beta^{3,5} \left(\frac{10^6}{\text{Re}} \right)^{0,3} \left[0,0658 + 0,02709 \left(\frac{19000}{\text{Re}} \right)^{0,8} \right] \right\} \frac{1}{C};$$

$$\vartheta_{K_n d} = \begin{cases} -\frac{0,6r_\kappa}{r_\kappa + 0,0007773d} \left(1 - \frac{0,9826}{K_\Pi} \right) & \text{для } \frac{r_\kappa}{d} > 0,0004 \\ 0 & \text{для } \frac{r_\kappa}{d} \leq 0,0004 \end{cases}.$$

ВКВ ϑ_{r_i} і ϑ_τ визначаються за рівняннями, наведеними у [10], а ϑ_{R_ϕ} – за рівнянням, наведеним у [11].

Невизначеність U'_{F_x} , яка приписана функціональним залежностям визначення коефіцієнта розширення ПГ, показника адіабати ПГ і коефіцієнта стисливості ПГ, розраховуватиметься за рівнянням

$$U'_{F_x} = \sqrt{\left(3,5 \frac{\Delta p}{p\kappa} \right)^2 + \left[\frac{1 - a_\varepsilon - \varepsilon}{\varepsilon} \ln(\tau_\varepsilon) U'_{F_\kappa} \right]^2} + 0,25 U'_{F_\kappa}{}^2, \quad (14)$$

де U'_{F_κ} – невизначеність, яка приписана функціональній залежності визначення

показника адиабати ПГ, значення якої приймають таким, що дорівнює 2 % [8]; U'_{FK} – невизначеність, яка приписана функціональній залежності визначення коефіцієнта стисливості ПГ за методом Gerg–91 мод. [7].

Проведеними дослідженнями було встановлено характер зміни ВКВ вхідних величин на об'ємну витрату ПГ, приведену до стандартних умов, визначених за рівняннями (6) ... (13), [10] і [11] та зроблено їх порівняння з ВКВ ϑ_{x_i} , значення яких були обчислені за рівняннями, наведеними у табл. 1. ВКВ ϑ_{x_a} , ϑ_{x_y} можна знехтувати, оскільки їх значення не перевищують 0,003. Найбільше відхилення між значеннями обчисленими за рівняннями наведеними у табл. 1 та рівняннями (6) ... (13), [10] і [11] мають ВКВ $\vartheta_{\Delta p}$, ϑ_p , ϑ_d і ϑ_{R_0} , значення яких показані відповідно на рис. 1.а), 1.б), 1.в) і 1.г).

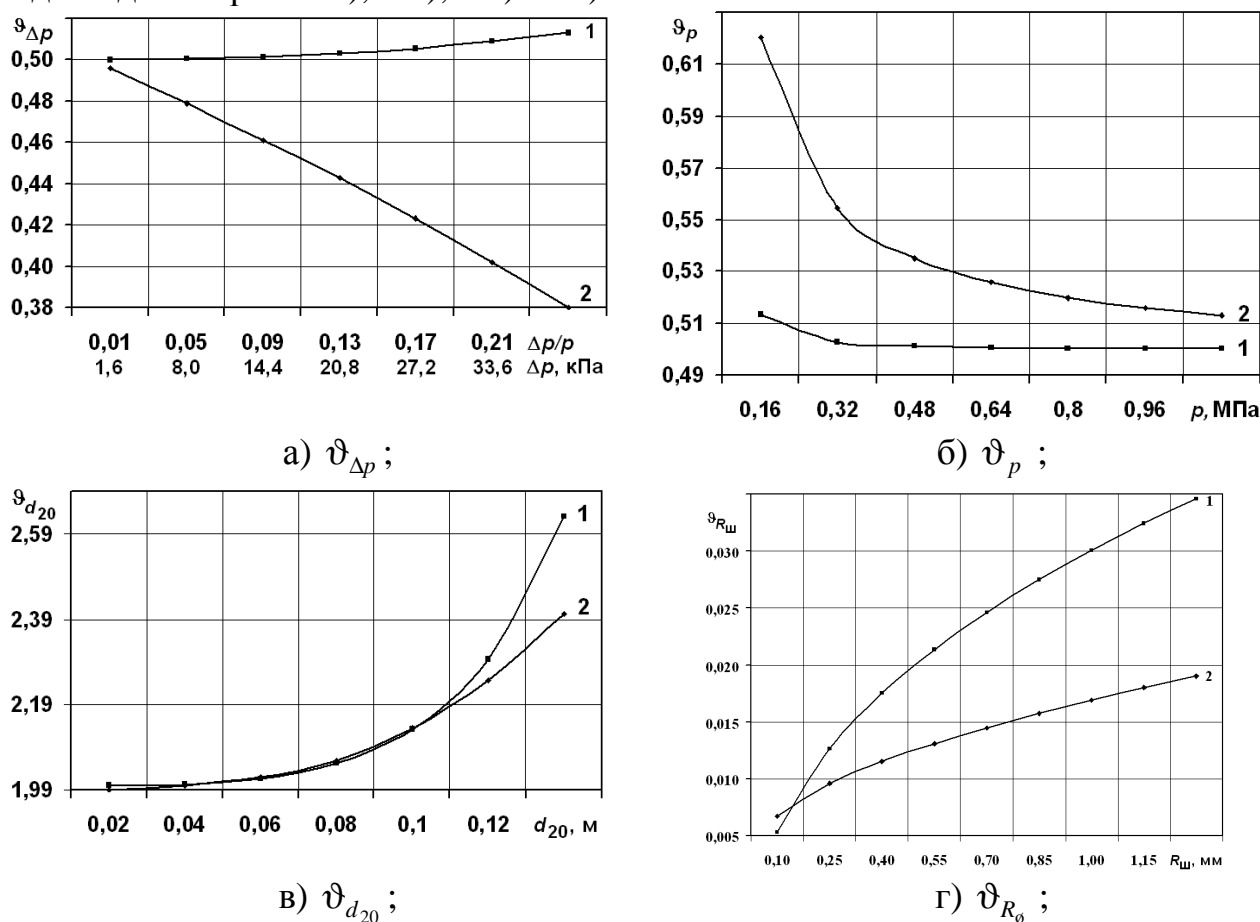


Рис. 1. Відносні коефіцієнти впливу ϑ_{x_i} вхідних величин x_i на об'ємну витрату q_c ПГ: 1 – ВКВ, значення яких обчислені за рівняннями наведеними у табл. 1; 2 – ВКВ, значення яких розраховані відповідно за рівняннями а) – (6), б) – (7), в) – (12) і г) – [11].

Зробимо порівняльний аналіз (табл. 2) значень ВКВ ϑ_{x_i} деяких вхідних величин x_i на об'ємну витрату ПГ, приведену до стандартних умов, розрахованих за рівняннями наведеними в ISO5168:2005 [1], рівняннями наведеними у табл. 1 та за рівняннями (6), (7) і (12), для таких вхідних величин: $\Delta p = 40000$ Па ;

$p = 0,16$ МПа ; $T = 293,15$ К ; $\rho_c = 0,7 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; $x_a = 0,02$; $x_y = 0,01$; $d_{20} = 140$ мм ;
 $D_{20} = 200$ мм ; $r_{\text{п}} = 0,04$ мм ; $\tau = 0$ року ; $R_{\text{ш}} = 0,25$ мм .

Таблиця 2. Порівняльний аналіз ВКВ вхідної величини на об'ємну витрату природного газу, приведена до стандартних умов.

| № з/п | Параметр | ϑ_{x_i} , [1] | ϑ_{x_i} , табл. 1 | ϑ_{x_i} , рівняння |
|-------|---|----------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| 1 | Перепад тиску на діафрагмі, Δp , Па | 0,392 | 0,512 | 0,398, (6) |
| 2 | Абсолютний тиск газу, p , Па | 0,606 | 0,510 | 0,605, (7) |
| 3 | Діаметр отвору діафрагми за температури газу $t = 20^\circ\text{C}$, d_{20} , мм | 2,425 | 2,632 | 2,423, (12) |

Як видно з табл. 2, значення ВКВ $\vartheta_{\Delta p}$, ϑ_p і $\vartheta_{d_{20}}$, що були розраховані відповідно за рівняннями (6), (7) і (12) повністю узгоджуються із цими ж ВКВ, значення яких були визначені за різницевиими рівняннями наведеними в ISO5168:2005 [1], що не можна сказати за значення ВКВ, значення яких були обчислені за рівняннями (табл. 1), наведеними у ДСТУ ГОСТ 8.586.5:2009 [4].

Значення невизначеності результату вимірювання об'ємної витрати ПГ, приведеної до стандартних умов, розрахованої за рівнянням (4) з врахуванням (14) становить 1,16 %, а за рівнянням відповідно до ДСТУ ГОСТ 8.586.5:2009 [4] з ВКВ, наведеними у табл. 1, становить 1,21 %, що є більше на 0,05 %. Отже отримані рівняння ВКВ (6) ... (13), [10] і [11], а також рівняння (14) зменшують значення невизначеності результату вимірювання об'ємної витрати ПГ, приведеної до стандартних умов.

Висновки

Проведеним аналізом було встановлено, що у Національних стандартах України ДСТУ ГОСТ 8.586.5:2009 [4] наведено рівняння для розрахунку невизначеності результату вимірювання витрати газу, в якому застосовані спрощені рівняння ВКВ вхідних величин на об'ємну витрату газу, приведена до стандартних умов, що змінює значення невизначеності результату вимірювання витрати газу.

Визначені вхідні величини, за якими необхідно отримати рівняння для обчислення ВКВ цих величин на об'ємну витрату газу, приведена до стандартних умов.

Отримані рівняння (6) – (13) для визначення ВКВ вхідних величин на об'ємну витрату газу, приведена до стандартних умов, повністю узгоджуються з ВКВ, розрахованими за рівняннями у різницевому вигляді, наведеними в ISO 5168:2005 [1], що підтверджує достовірність отримання цих рівнянь.

Отримані нові рівняння (6) – (13) для визначення ВКВ вхідних величин на об'ємну витрату газу, приведену до стандартних умов, більшість з яких приймають менші значення ніж спрощені рівняння наведені у стандартах [3, 4], що зменшує і невизначеність результату вимірювання витрати газу на 0,05 %.

Література

1. Measurement of fluid flow – Evaluation of uncertainty. ISO 5168: 2005.
2. Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full – part 2: orifice plates: ISO 5167-2:2003.
3. Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідин і газів за допомогою стандартних звужуючих пристроїв. Частина 2. Діафрагми. Технічні вимоги. (ГОСТ 8.586.2-2005 (ИСО 5167-2:2003), IDT; ISO 5167-2:2003, NEQ) [Текст]: ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009. – [Чинний від 2010-04-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 2010. – 90 с. – (Національний стандарт України).
4. Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідин і газів за допомогою стандартних звужуючих пристроїв. Частина 5. Методика виконання вимірювань. (ГОСТ 8.586.5-2005, IDT) [Текст]: ДСТУ ГОСТ 8.586.5:2009. – [Чинний від 2010-04-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 2010. – 196 с. – (Національний стандарт України).
5. Пістун Є. П. Нормування витратомірів змінного перепаду тиску / Є. П. Пістун, Л. В. Лесовой. – Львів: Вид-во ЗАТ «Інститут енергоаудиту та обліку енергоносіїв», 2006. – 576 с.
6. Uncertainty of Measurement – Part 3: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement / Third edition - ISO/IEC Guide 98-3:2008 / Switzerland. 2008. – 120 p.
7. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение коэффициента сжимаемости: ГОСТ 30319.2–1996. – [Действующий от 1997-07-01]. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. 1997. – 43 с.
8. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение физических свойств природного газа, его компонентов и продуктов его переработки: ГОСТ 30319.1-1996. – [Действующий от 1997-07-01]. – Минск : Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. 1997. – 20 с.
9. Пистун Е. П. Применение средств вычислительной техники для повышения точности определения расхода, измеряемого по методу переменного перепада давления / Пистун Е. П. // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. - Львов: 1973. – 24 с.
10. Лесовой Л. В. Розрахунок невизначеності поправкового коефіцієнта, який враховує пригнуття вхідного канта діафрагми / Л. В. Лесовой // Метрологія та прилади. – Харків: Вид-тво ВКФ "Фавор", 2010. – № 6. – С. 36 – 39.
11. Лесовой Л. В. Розрахунок невизначеності поправкового коефіцієнта, який враховує шорсткість внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу / Л. В. Лесовой // Методи та прилади контролю якості. – Івано-Франківськ: Вид-во Івано-Франківського держ. техн. ун-ту нафти і газу, 2010. – № 8. – С. 51 – 54.

*Надійшла до редакції
19 березня 2015 року*

© Лесовой Л. В., Фединець В. О., Кузик В. А., 2015