

## РОЗРАХУНОК ПОПРАВКОВОГО КОЕФІЦІЄНТА, ЯКИЙ ВРАХОВУЄ ТОВЩИНУ ДИСКА ДІАФРАГМИ

© Лесовой Л.В., 2013

Наведено нові рівняння для розрахунку поправкового коефіцієнта, який враховує товщину диска діафрагми, відносної розширеної невизначеності поправкового коефіцієнта, який враховує товщину диска діафрагми та визначені діапазони найменшої допустимої товщини диска діафрагми, для якої вимірювання витрати середовища стає неможливим.

**Ключові слова:** метод змінного перепаду тиску, товщина диска діафрагми, поправковий коефіцієнт.

The new equations for calculating the correction factor, which takes into account of the thickness disk of the orifice-plate, the relative expanded uncertainty of correction factor, which takes into account of the thickness disk of the orifice-plate, and defined limits of the minimum allowable thickness disk of the orifice-plate, for which the measurement of flow medium is impossible, are given in this article.

**Key words:** method of alternating pressure drop, the thickness of the diaphragm disk, correction factor.

### Постановка проблеми

При вимірюванні витрати середовища найбільшого застосування набули витратоміри змінного перепаду тиску зі стандартними звужувальними пристроями, до яких належить і діафрагма. Основним коефіцієнтом рівняння витрати середовища і характеристикою стандартного звужувального пристрою є коефіцієнт витікання діафрагми. Точність його визначення впливає на точність визначення витрати середовища за методом змінного перепаду тиску. Точність визначення коефіцієнта витікання є величина, яка обернено пропорційна відносній розширеній невизначеності коефіцієнта витікання діафрагми. Однією із додаткових складових відносної розширеної невизначеності коефіцієнта витікання діафрагми, які виникають під час експлуатації витратоміра, є відносна розширена невизначеність, яка виникає за рахунок деформації диска діафрагми.

Щоб уникнути виникнення відносної розширеної невизначеності, яка виникає за рахунок деформації диска діафрагми, необхідно ввести у рівняння витрати середовища поправковий коефіцієнт, який враховує товщину диска діафрагми. При цьому зменшиться відносна розширена невизначеність коефіцієнта витікання, а отже, і відносна розширена невизначеність результату вимірювання витрати середовища. Отримання рівняння для розрахунку поправкового коефіцієнта, який враховує товщину диска діафрагми, а також його відносної розширеної невизначеності є актуальною задачею сьогодення.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

При протіканні середовища через діафрагму будь-якого типу на ній виникає перепад тиску  $\Delta p$ , який може за певних значень деформувати диск діафрагми. Товщина диска  $E$  діафрагми, за якої виникатиме деформація, що пов'язана з вигином  $\delta$  диска діафрагми, і значенням якої можна знехтувати, повинна знаходитись в межах [1 – 3]

$$E_{\min} \leq E \leq 0,05D_{20}, \quad (1)$$

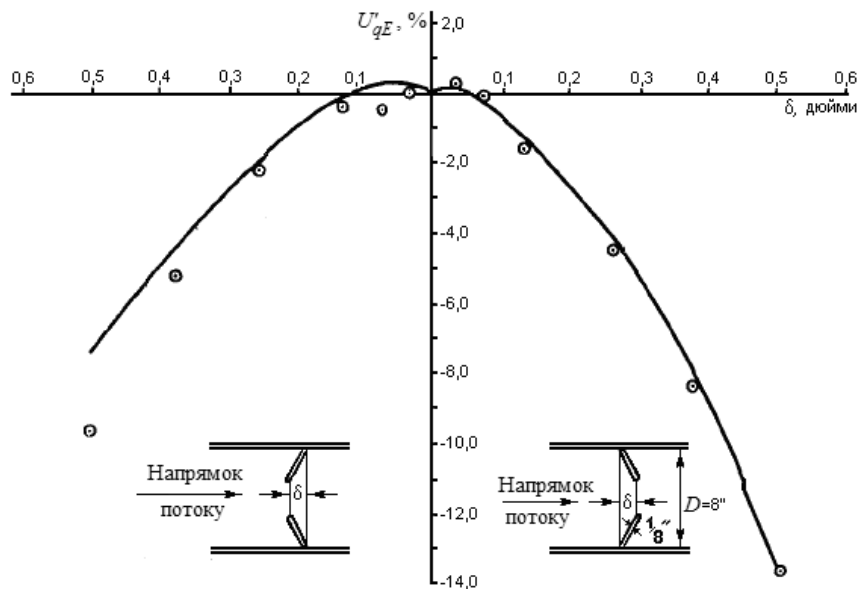
де  $E_{\min}$  – найменша допустима товщина диска діафрагми;  $D_{20}$  – внутрішній діаметр вимірювального трубопроводу при температурі 20 °С.

При застосуванні діафрагми з товщиною диска, меншою за  $E_{\min}$ , виникатиме деформація диска діафрагми і додаткова складова  $U'_E$  відносної розширеної невизначеності  $U'_C$  коефіцієнта витікання  $C$  діафрагми, а отже, і додаткова складова відносної розширеної невизначеності  $U'_q$  результату вимірювання витрати середовища. З досліджень, які виконав Норман [4], були отримані експериментальні дані залежності відносної розширеної невизначеності  $U'_{qE}$  результату вимірювання масової витрати  $q_m$  середовища від величини вигину  $\delta$  диска діафрагми. Значення  $U'_{qE}$  розраховують за рівнянням

$$U'_{qE} = 100 \cdot \frac{\Delta q_m}{q_m}, \quad (2)$$

де  $\Delta q_m$  – абсолютна похибка результату вимірювання витрати середовища.

Значення експериментальних точок, наведені на рисунку, Норман одержав для товщини диска діафрагми  $E=0,125$  дюйма, внутрішнього діаметра вимірювального трубопроводу  $D=8$  дюймів та відносного діаметра діафрагми  $\beta=0,75$ . Суцільною лінією на рисунку позначено теоретичне рівняння, колами позначено експериментальні точки.



Значення експериментальних точок

Щоб виключити додаткову складову  $U'_{qE}$  відносної розширеної невизначеності результату вимірювання витрати середовища, необхідно скоригувати рівняння витрати середовища поправковим коефіцієнтом  $K_E$ , який враховує товщину диска діафрагми. Але ніде в нормативних документах [1, 5] або стандартах [2, 3, 6, 7] не введено рівняння для визначення поправкового коефіцієнта  $K_E$ .

Враховуючи вищевикладене, необхідно отримати рівняння для розрахунку поправкового коефіцієнта, який враховує товщину диска діафрагми, а також його відносної розширеної невизначеності.

### Формулювання цілі статті

Метою роботи є розроблення рівняння для розрахунку поправкового коефіцієнта, який враховує товщину диска діафрагми, а також його відносної розширеної невизначеності.

### Виклад основного матеріалу

Як було зазначено вище, товщина диска  $E$  діафрагми, при якій виникатиме деформація і значенням якої можна знехтувати, повинна задовольняти умову (1).

Відповідно до РД50-213-80 [1] найменшу необхідну товщину  $E_{\min}$  діафрагми визначали розрахунково, враховуючи умову механічної міцності її диска, за рівнянням

$$E_{\min} = 43D_{20} \left\{ \frac{1,5\Delta p}{\sigma_B} \left[ 3 + \mu_0 - (1 - \mu_0)m - 2(1 - \mu_0) \frac{m}{1 - m} \ln \left( \frac{1}{m} \right) \right] \right\}^{0,5}, \quad (3)$$

де  $\mu_0$  – коефіцієнт Пуассона матеріалу, з якого виготовлена діафрагма;  $\sigma_B$  – границя міцності у разі розтягнення матеріалу, з якого виготовлена діафрагма, при робочій температурі.

У відповідності до ГОСТ 8.563.1–97 [6] товщина диска діафрагми знаходилась в межах

$$e \leq E \leq 0,05D, \quad (4)$$

де  $e$  – довжина циліндричної частини отвору діафрагми, значення якої знаходиться в межах

$$0,005D \leq e \leq 0,02D; \quad (5)$$

$D$  – внутрішній діаметр вимірювального трубопроводу при робочій температурі.

Допускалося для  $0,05 \leq D < 0,064$  товщину диска діафрагми приймати 3,2 мм, що становить для  $D=0,05$  м величину  $0,064D$ . У цьому випадку слід уникати застосування діафрагм з  $\beta > 0,36$ .

Якщо довжина  $e$  циліндричної частини отвору діафрагми є меншою за  $E_{\min}$ , то за значення мінімальної товщини диска діафрагми приймають значення  $E_{\min}$ , яке відповідно до ГОСТ 8.563.1–97 [6] розраховували, враховуючи умову відсутності її деформації під дією перепаду тиску на діафрагмі при робочій температурі, за рівнянням

$$E_{\min} = D \left[ \frac{3\Delta p_B}{\sigma_T} (0,681 - 0,651\beta) \right]^{0,5}, \quad (6)$$

де  $\sigma_T$  – границя текучості матеріалу, з якого виготовлена діафрагма, при робочій температурі;  $\Delta p_B$  – верхня межа перепаду тиску на діафрагмі;  $\beta$  – відносний діаметр отвору діафрагми, значення якого розраховується за рівнянням

$$\beta = \frac{d}{D}, \quad (7)$$

$d$  – діаметр отвору діафрагми при робочій температурі.

Під дією перепаду тиску на діафрагмі її диск може деформуватись, що призводить до виникнення додаткової відносної розширеної невизначеності  $U'_E$  коефіцієнта витікання.

Якщо ж товщина диска діафрагми менша від допустимої товщини  $E_{\min}$ , розрахованої за рівнянням (6), то до відносної розширеної невизначеності коефіцієнта витікання арифметично додають додаткову складову  $U'_E$  відносної розширеної невизначеності коефіцієнта витікання, яка визначається за рівнянням [6]

$$U'_E = \frac{\Delta p_B}{E_y} \left( \frac{D}{E} \right)^2 \left( a \frac{D}{E} - b \right), \quad (8)$$

де  $E_y$  – модуль пружності матеріалу, з якого виготовлена діафрагма;

$$a = \beta(13,5 - 15,5\beta); \quad (9)$$

$$b = 117 - 106\beta^{1,3}. \quad (10)$$

У рекомендаціях ISO/TR 9464 [7] з застосування ISO 5167-2:2003 [2] наведено рівняння для розрахунку додаткової складової відносної розширеної невизначеності результату вимірювання витрати середовища, яка виникає за рахунок деформації диска діафрагми, у вигляді

$$U'_{qE} = 100 \frac{\Delta q_m}{q_m} = - \frac{\Delta p_B}{E_y} \left( \frac{D'}{E} \right)^2 \left( a \frac{D'}{E} - b \right), \quad (11)$$

де  $D'$  – внутрішній діаметр опори вхідного торця діафрагми у вузлі її кріплення при робочій температурі середовища (значення цього діаметра може дорівнювати значенню внутрішнього діаметра вимірювального трубопроводу перед вхідним торцем діафрагми).

У табл. 1 наведені значення додаткової складової  $U'_{qE}$  відносної розширеної невизначеності результату вимірювання витрати середовища, яка виникає за рахунок деформації диска діафрагми, розрахованої для марки сталі 12X18H10T за рівнянням (11). Для розрахунку були застосовані такі вихідні дані: модуль пружності  $E_y = 198 \cdot 10^9$  Па [8]; внутрішній діаметр опори вхідного торця діафрагми у вузлі її кріплення при температурі середовища  $20^\circ\text{C}$   $D' = 0,6$  м; верхня межа перепаду тиску на діафрагмі  $\Delta p_B = 63000$  Па; значення відносного діаметра  $\beta$  від 0,1 до 0,75; значення товщини диска діафрагми  $E$  від 0,013 м до 0,0283 м.

Таблиця 1

**Значення додаткової складової  $U'_{qE}$  відносної розширеної невизначеності результату вимірювання витрати середовища, яка виникає за рахунок деформації диска діафрагми, розрахованої для марки сталі 12X18H10T**

$\beta$	Товщина диска діафрагми $E$ , м									
	0,0130	0,0147	0,0164	0,0181	0,0198	0,0215	0,0232	0,0249	0,0266	0,0283
0,10	0,038	0,033	0,029	0,025	0,022	0,019	0,017	0,015	0,014	0,012
0,15	0,021	0,021	0,020	0,018	0,017	0,015	0,014	0,012	0,011	0,010
0,20	0,005	0,010	0,012	0,012	0,012	0,011	0,011	0,010	0,009	0,009
0,25	-0,008	0,001	0,005	0,007	0,008	0,008	0,008	0,008	0,007	0,007
0,30	-0,019	-0,007	-0,001	0,002	0,004	0,005	0,006	0,006	0,006	0,006
0,35	-0,027	-0,013	-0,006	-0,001	0,001	0,003	0,004	0,004	0,004	0,004
0,40	-0,034	-0,018	-0,009	-0,004	-0,001	0,001	0,002	0,003	0,003	0,003
0,45	-0,038	-0,021	-0,012	-0,006	-0,003	-0,001	0,001	0,002	0,002	0,002
0,50	-0,040	-0,023	-0,013	-0,007	-0,004	-0,002	0,000	0,001	0,001	0,002
0,55	-0,039	-0,023	-0,014	-0,008	-0,004	-0,002	-0,001	0,000	0,001	0,001
0,60	-0,037	-0,021	-0,013	-0,007	-0,004	-0,002	-0,001	0,000	0,001	0,001
0,65	-0,031	-0,018	-0,011	-0,006	-0,003	-0,001	0,000	0,001	0,001	0,001
0,70	-0,024	-0,013	-0,007	-0,004	-0,002	0,000	0,001	0,001	0,001	0,002
0,75	-0,014	-0,007	-0,003	-0,001	0,000	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002

Розв'язавши рівняння (11) відносно  $E$ , отримаємо залежність для визначення найменшої допустимої товщини диска діафрагми як [3]

$$E_{\min} = \frac{D'}{A + B + c}, \quad (12)$$

де

$$A = \sqrt[3]{-\frac{Q}{2} + \left[ \left( \frac{\Theta}{3} \right)^3 + \left( \frac{Q}{2} \right)^2 \right]^{0,5}}; \quad (13)$$

$$B = \sqrt[3]{-\frac{Q}{2} - \left[ \left( \frac{\Theta}{3} \right)^3 + \left( \frac{Q}{2} \right)^2 \right]^{0,5}}; \quad (14)$$

$$c = \frac{b}{3a}; \quad (15)$$

$$Q = -\frac{2}{27} \left( \frac{b}{a} \right)^3 - 100 \frac{\Delta q_m}{q_m} \frac{E_y}{a \Delta p_B}; \quad (16)$$

$$\Theta = -\frac{1}{3} \left( \frac{b}{a} \right)^2; \quad (17)$$

$a, b$  – коефіцієнти, значення яких розраховуються відповідно за рівняннями (9) і (10).

У 1998 р. Рідер-Харріс (Reader-Harris) и Галлахер (Gallagher) запропонували нове уточнене рівняння для розрахунку коефіцієнта витікання для діафрагм, яке було введене в ISO5167-2:2003 [2], а також і в ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009 [3]. Це рівняння має менше значення відносної розширеної невизначеності коефіцієнта витікання без додаткових складових невизначеностей, ніж рівняння Штольца. Тому для зменшення відносної розширеної невизначеності коефіцієнта витікання з додатковою складовою відносною розширеною невизначеністю  $U'_E$  значення  $100 \frac{\Delta q_m}{q_m}$  прийняли

$100 \frac{\Delta q_m}{q_m} = 0,05 \%$ , яке і було введене у коефіцієнт  $Q$  рівняння (16) і в ДСТУ ГОСТ 8.586.2–2005 [3].

Найменшу допустиму товщину диска діафрагми  $E_{\min}$  вибирають як більше значення, розраховане за рівнянням (12) для  $100 \frac{\Delta q_m}{q_m} = 0,05 \%$  або за рівнянням

$$E_{\min} = D' \left[ \frac{3\Delta p_v}{\sigma_T} (0,681 - 0,651\beta) \right]^{0,5}. \quad (18)$$

У табл. 2 наведені значення найменшої допустимої товщини диска діафрагми  $E_{\min}$ , розраховані для марки сталі 12X18H10T за рівнянням (12). Для розрахунку були застосовані такі вихідні дані: границя текучості  $\sigma_T = 225 \cdot 10^6$  Па [8]; модуль пружності  $E_y = 198 \cdot 10^9$  Па [8]; відносна похибка результату вимірювання витрати середовища, яка виникає за рахунок деформації диска діафрагми,  $100 \frac{\Delta q_m}{q_m} = 0,05 \%$ ; внутрішній діаметр опори вхідного торця діафрагми у вузлі її кріплення  $D' = 0,6$  м; значення відносного діаметра  $\beta$  от 0,1 до 0,75; значення верхньої межі перепаду тиску на діафрагмі  $\Delta p_v$  від 1000 Па до 100000 Па. Як видно з табл. 2, значення найменшої допустимої товщини диска діафрагми  $E_{\min}$ , розраховані за методикою, наведеною в ДСТУ ГОСТ 8.586.2–2009 [3], враховують дві властивості (межу текучості  $\sigma_T$  та модуль пружності  $E_y$ ) матеріалу, з якого виготовлена діафрагма.

Таблиця 2

**Значення найменшої допустимої товщини диска діафрагми  $E_{\min}$  (мм),  
розраховані для марки сталі 12X18H10T**

$\beta$	Верхня межа перепаду тиску на діафрагмі, Па									
	1000	2500	4000	6300	10000	16000	25000	40000	63000	100000
0,10	2.53	3.22	3.61	4.32	5.44	6.88	8.60	10.87	13.65	17.19
0,15	2.95	3.81	4.32	4.84	5.40	6.69	8.37	10.58	13.28	16.73
0,20	3.24	4.23	4.81	5.44	6.11	6.84	8.13	10.28	12.91	16.26
0,25	3.45	4.53	5.18	5.87	6.64	7.48	8.31	9.98	12.52	15.77
0,30	3.60	4.74	5.44	6.18	7.02	7.94	8.88	9.91	12.12	15.27
0,35	3.70	4.89	5.62	6.41	7.29	8.28	9.29	10.42	11.71	14.75
0,40	3.77	4.99	5.74	6.55	7.47	8.51	9.57	10.78	12.00	14.21
0,45	3.79	5.03	5.79	6.62	7.57	8.63	9.73	10.99	12.27	13.65
0,50	3.78	5.02	5.78	6.62	7.57	8.65	9.78	11.06	12.39	13.80
0,55	3.73	4.95	5.72	6.55	7.50	8.57	9.70	11.00	12.34	13.78
0,60	3.63	4.83	5.58	6.39	7.33	8.39	9.50	10.78	12.11	13.55
0,65	3.49	4.64	5.36	6.15	7.05	8.07	9.14	10.38	11.67	13.07
0,70	3.28	4.37	5.04	5.78	6.63	7.59	8.59	9.75	10.97	12.27
0,75	2.98	3.97	4.58	5.24	6.00	6.86	7.76	8.80	9.87	11.02

Курсивом позначені значення найменшої допустимої товщини диска діафрагми  $E_{\min}$ , значення яких були розраховані за рівнянням (12), а інші значення – за рівнянням (18).

Перетворимо рівняння (11) до вигляду

$$100 \frac{K_E q_m - q_m}{q_m} = 100(K_E - 1) = -\frac{\Delta p_B}{E_y} \left( \frac{D'}{E} \right)^2 \left( a \frac{D'}{E} - b \right). \quad (19)$$

Застосовуючи рівняння (19) та рівняння для розрахунку найменшої допустимої товщини диска діафрагми (12) та (18), отримаємо рівняння для розрахунку поправкового коефіцієнта  $K_E$ , який враховує товщину диска діафрагми, як

$$K_E = \begin{cases} 1 & \text{для } E \geq E_{\min 1} \text{ і } E \geq E_{\min 2} \text{ і } E \leq 0,05D \\ 1 - \frac{\Delta p_B}{100 E_y} \left( \frac{D'}{E} \right)^2 \left( a \frac{D'}{E} - b \right) & \text{для } E < E_{\min 1} \text{ і } E \geq E_{\min 2} \end{cases}, \quad (20)$$

де  $E_{\min 1}$  – найменша допустима товщина диска діафрагми, яка визначається за рівнянням (12)–(17) для коефіцієнта  $Q$ , значення якого розраховується за рівнянням

$$Q = -\frac{2}{27} \left( \frac{b}{a} \right)^3 - \frac{0,05 E_y}{a \Delta p_B}; \quad (21)$$

$E_{\min 2}$  – найменша допустима товщина диска діафрагми, яка визначається за рівнянням (18).

Якщо товщина диска  $E$  діафрагми є меншою за найменшу допустиму товщину диска діафрагми  $E_{\min 2}$ , яка визначається за рівнянням (18), то таку діафрагму не можна застосовувати під час вимірювання витрати середовища за методом змінного перепаду тиску.

Якщо значення найменшої допустимої товщини диска діафрагми  $E_{\min 2}$  перевищує значення  $0,05D$ , то необхідно зменшити перепад тиску на діафрагмі або вибрати інший матеріал, з якого вона виготовляється, з більшим значенням модуля пружності.

Застосовуючи теорію невизначеності для методу змінного перепаду тиску [9], запишемо рівняння для розрахунку відносної розширеної невизначеності  $U'_{K_E}$  поправкового коефіцієнта, який враховує товщину диска діафрагми, як

$$U'_{K_E} = \left[ \left( \vartheta_{\Delta p_B} U'_{\Delta p_B} \right)^2 + \left( \vartheta_{E_y} U'_{E_y} \right)^2 + \left( \vartheta_{D'} U'_{D'} \right)^2 + \left( \vartheta_{E_B} U'_{E_B} \right)^2 + \left( \vartheta_d U'_d \right)^2 + \left( \vartheta_D U'_D \right)^2 \right]^{0,5}, \quad (22)$$

де  $\vartheta_{\Delta p_B}$ ,  $\vartheta_{E_y}$ ,  $\vartheta_{D'}$ ,  $\vartheta_{E_B}$ ,  $\vartheta_d$ ,  $\vartheta_D$  – відносні коефіцієнти чутливості поправкового коефіцієнта, який враховує вплив товщини диска діафрагми на результат вимірювання витрати середовища, відповідно до верхньої межі перепаду тиску  $\Delta p_B$  на діафрагмі, модуля пружності  $E_y$ , внутрішнього діаметра  $D'$  опори вхідного торця діафрагми у вузлі її кріплення, товщини диска  $E$  діафрагми, діаметра  $d$  отвору діафрагми та внутрішнього діаметра  $D$  вимірювального трубопроводу;  $U'_{\Delta p_B}$ ,  $U'_{E_y}$ ,  $U'_{D'}$ ,  $U'_{E_B}$ ,  $U'_d$ ,  $U'_D$  – відносні розширені невизначеності відповідно результату вимірювання перепаду тиску  $\Delta p_B$  на діафрагмі, модуля пружності  $E_y$ , результату вимірювання внутрішнього діаметра  $D'$  опори вхідного торця діафрагми у вузлі її кріплення, результату вимірювання товщини диска  $E$  діафрагми, результату вимірювання діаметра  $d$  отвору діафрагми та результату вимірювання внутрішнього діаметра  $D$  вимірювального трубопроводу.

Відповідно до теорії невизначеності відносний коефіцієнт чутливості  $\vartheta_x$  величини  $y$  до величини  $x$  визначається за рівнянням [9]

$$\vartheta_x = \frac{\partial y}{\partial x} \cdot \frac{x}{y}, \quad (23)$$

де  $\frac{\partial y}{\partial x}$  – часткова похідна величини  $y$  по величині  $x$ .

Застосовуючи рівняння (23), знайдемо рівняння для визначення коефіцієнтів чутливості  $\vartheta_{\Delta p_B}$ ,  $\vartheta_{E_y}$ ,  $\vartheta_{D'}$ ,  $\vartheta_{E_B}$ ,  $\vartheta_d$  і  $\vartheta_D$ :

$$\vartheta_{\Delta p_B} = \frac{\partial K_E}{\partial \Delta p_B} \cdot \frac{\Delta p_B}{K_E} = \begin{cases} 0 & \text{для } E \geq E_{\min 1} \text{ і } E \geq E_{\min 2} \text{ і } E \leq 0,05D \\ \frac{K_E - 1}{K_E} & \text{для } E < E_{\min 1} \text{ і } E \geq E_{\min 2} \end{cases}; \quad (24)$$

$$\vartheta_{E_y} = \frac{\partial K_E}{\partial E_y} \cdot \frac{E_y}{K_E} = \begin{cases} 0 & \text{для } E \geq E_{\min 1} \text{ і } E \geq E_{\min 2} \text{ і } E \leq 0,05D \\ -\frac{K_E - 1}{K_E} & \text{для } E < E_{\min 1} \text{ і } E \geq E_{\min 2} \end{cases}; \quad (25)$$

$$\vartheta_{D'} = \frac{\partial K_E}{\partial D'} \cdot \frac{D'}{K_E} = \begin{cases} 0 & \text{для } E \geq E_{\min 1} \text{ і } E \geq E_{\min 2} \text{ і } E \leq 0,05D \\ \frac{K_E - 1}{K_E} \cdot \frac{3a \frac{D'}{E} - 2b}{a \frac{D'}{E} - b} & \text{для } E < E_{\min 1} \text{ і } E \geq E_{\min 2} \end{cases}; \quad (26)$$

$$\vartheta_{E_B} = \frac{\partial K_E}{\partial E_B} \cdot \frac{E_B}{K_E} = \begin{cases} 0 & \text{для } E \geq E_{\min 1} \text{ і } E \geq E_{\min 2} \text{ і } E \leq 0,05D \\ -\frac{K_E - 1}{K_E} \cdot \frac{3a \frac{D'}{E} - 2b}{a \frac{D'}{E} - b} & \text{для } E < E_{\min 1} \text{ і } E \geq E_{\min 2} \end{cases}; \quad (27)$$

$$\vartheta_d = \frac{\partial K_E}{\partial d} \cdot \frac{d}{K_E} = \begin{cases} 0 & \text{для } E \geq E_{\min 1} \text{ і } E \geq E_{\min 2} \text{ і } E \leq 0,05D \\ \frac{K_E - 1}{K_E} \cdot \frac{(13,5 - 31\beta)\beta \frac{D'}{E} + 137,8\beta^{1,3}}{a \frac{D'}{E} - b} & \text{для } E < E_{\min 1} \text{ і } E \geq E_{\min 2} \end{cases}; \quad (28)$$

$$\vartheta_D = \frac{\partial K_E}{\partial D} \cdot \frac{D}{K_E} = \begin{cases} 0 & \text{для } E \geq E_{\min 1} \text{ і } E \geq E_{\min 2} \text{ і } E \leq 0,05D \\ -\frac{K_E - 1}{K_E} \cdot \frac{(13,5 - 31\beta)\beta \frac{D'}{E} + 137,8\beta^{1,3}}{a \frac{D'}{E} - b} & \text{для } E < E_{\min 1} \text{ і } E \geq E_{\min 2} \end{cases}. \quad (29)$$

Відносна розширена невизначеність результату вимірювання внутрішнього діаметра  $D'$  опори вхідного торця діафрагми у вузлі її кріплення і вимірювання внутрішнього діаметра  $D$  вимірювального трубопроводу відповідно до [9] приймають значення такі, що дорівнюють

$$U'_{D'} = U'_D = 0,2 \%. \quad (30)$$

Відповідно до [9] відносна розширена невизначеність результату вимірювання товщини  $E$  диска діафрагми визначається за рівнянням

$$U'_{E_B} = \begin{cases} 0,1 & \text{для } D \geq 0,2 \text{ м} \\ \frac{0,02}{D} & \text{для } D < 0,2 \text{ м} \end{cases}. \quad (31)$$

Відносна розширена невизначеність результату вимірювання діаметра  $d$  отвору діафрагми відповідно до [9] приймає таке значення, що дорівнює

$$U'_d = 0,04 \%. \quad (32)$$

Підставивши рівняння (24) – (30) і (32) у рівняння (22), отримаємо рівняння для визначення відносної розширеної невизначеності  $U'_{K_E}$  поправкового коефіцієнта, який враховує товщину диска діафрагми, як

$$U'_{K_E} = \begin{cases} 0 & \text{для } E \geq E_{\min 1} \text{ і } E \geq E_{\min 2} \text{ і } E \leq 0,05D \\ \frac{K_E - 1}{K_E} \sqrt{U_{\Delta p_B}^{\prime 2} + U_{E_y}^{\prime 2} + \frac{\left\{ \left( 3a \frac{D'}{E} - 2b \right)^2 (0,04 + U_{E_B}^{\prime 2}) + 0,0416 \left[ (13,5 - 31\beta)\beta \frac{D'}{E} + 137,8\beta^{1,3} \right]^2 \right\}}{\left( a \frac{D'}{E} - b \right)^2}} & \text{для } E < E_{\min 1} \text{ і } E \geq E_{\min 2} \end{cases} \quad (33)$$

### Висновки

Проведений аналіз рівнянь для розрахунку поправкового коефіцієнта, який враховує товщину диска діафрагми, показав, що таких рівнянь немає в чинних нормативних документах або стандартах. Причому, в деяких стандартах [6, 7] наведені рівняння (8) або (11) для визначення додаткової складової  $U'_{qE}$  відносно розширеної невизначеності результату вимірювання витрати середовища, яка пов'язана з деформацією диска діафрагми. Щоб виключити невизначеність  $U'_{qE}$ , було отримано рівняння (20) для розрахунку поправкового коефіцієнта  $K_E$ , який враховує товщину диска діафрагми. Це рівняння дозволить скоригувати значення витрати середовища у разі застосування діафрагм з меншою за  $E_{\min}$  товщиною її диска. Рівняння (20) розширює метод змінного перепаду тиску у разі застосування таких діафрагм. На основі рівняння (20) і теорії невизначеності було отримано рівняння (33) для розрахунку значень відносно розширеної невизначеності  $U'_{K_E}$  поправкового коефіцієнта, який враховує товщину диска діафрагми. Були визначені діапазони найменшої допустимої товщини диска  $E_{\min}$  діафрагми, для якої застосування діафрагм для вимірювання витрати середовища за методом змінного перепаду тиску стає неможливим.

Отримані рівняння рекомендується ввести у нормативні документи або нові стандарти.

1. Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами: РД 50-213-80. – Офиц. Док. – М.: Изд-во стандартов, 1982. 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. Norman R., Jenson P. Unaccounted-for gas in natural gas transmission systems. Engineering Research Station. British Gas Corporation. 1988. P. 16. 5. Изменение №1 к РД 50-213–80: Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами. – М.: Изд-во стандартов, 1985. 6. Измерение расхода и количества жидкостей и газов методом переменного перепада давления. Диафрагмы, сопла ИСА 1932 и трубы Вентури, установленные в заполненных трубопроводах круглого сечения. Технические условия: ГОСТ 8.563.1–97 ГСИ. – [Действующий от.1998–01–01]. – М.: Изд-во стандартов, 1998 – (Національний стандарт России). 7. Guidelines for the use of ISO 5167:2003. ISO/TR 9464:2008(E). 8. Сорокин В.Г. Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин и др. Под общ. ред. В.Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с. 9. 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).