

УДК 681.121.84

## ВИБІР ВЕРХНЬОЇ ГРАНИЦІ ПЕРЕПАДУ ТИСКУ ДИФМАНОМЕТРА ПІД ЗАДАНІ ПАРАМЕТРИ ДІАФРАГМИ ТА ТРУБОПРОВОДУ

© Лесовой Леонід, Кузик Володимир 2013

Національний університет "Львівська політехніка", кафедра автоматизації теплових і хімічних процесів,  
вул. Устияновича, 5, Львів, 79013, Україна

*Наведено рівняння для визначення перепаду тиску на діафрагмі та розроблено алгоритм вибору верхньої границі перепаду тиску диференціального манометра.*

*Приведено уравнение для определения перепада давления на диафрагме и разработан алгоритм выбора верхней границы перепада давления дифференциального манометра.*

*The article describes the equation for determining the pressure drop across the orifice plate and algorithm selection upper limit differential pressure differential manometer.*

**Постановка проблеми.** Під час проектування витратомірів змінного перепаду тиску та встановлених витратомірів на пунктах обліку природного газу виникає задача визначення верхньої границі перепаду тиску дифманометра під задані характеристики стандартного звужувального пристрою та вимірювального трубопроводу під задане максимальне значення витрати природного газу. Розроблення залежності визначення перепаду тиску на стандартному звужувальному пристрої та алгоритму визначення верхньої границі перепаду тиску дифманометра – актуальне завдання під час проектування таких витратомірів.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Аналіз показав, що Пістун, Лесовой і Крук [1] отримали аналітичне рівняння для визначення значення перепаду тиску на стандартному звужувальному пристрої у вигляді

$$Dp = \frac{2 \cdot k \cdot p}{3 \cdot (0.41 + 0.35 \cdot m^2)} \cdot \left( 1 - \cos \left( \frac{1}{3} \cdot \arccos \left( 1 - \frac{13.5 \cdot B_{pd} \cdot (0.41 + 0.35 \cdot m^2)}{k \cdot (a \cdot m)^2} \right) \right) \right), \quad (1)$$

де  $Dp$  – перепад тиску на стандартному звужувальному пристрої;  $p$  – абсолютний тиск газоподібного середовища;  $k$  – показник адіабати газоподібного середовища;  $a$  – коефіцієнт витрати стандартного звужувального пристрою;  $m$  – відносна площа стандартного звужувального пристрою;  $B_{pd}$  – безрозмірний комплекс, який залежить від одиниць вимірювання витрати і визначається за рівняннями, наведеними в [1].

З рівняння (1) визначали перепад тиску на стандартному звужувальному пристрої. Рівняння (1) отримано із застосуванням аналітичної залежності коефіцієнта розширення газоподібного середовища, яке наведене за старим нормативним документом РД 50-213-80 [2].

У 2010 р. в Україні діють національні стандарти України з вимірювання витрати рідких та газоподібних середовищ ДСТУ ГОСТ 8.586.1,2:2009 [3, 4], відповідно до яких змінені всі коефіцієнти та параметри рівняння витрати середовища. Тому, щоб знайти верхню границю перепаду тиску диференціального манометра, необхідно розробити нове аналітичне рівняння для визначення перепаду тиску на стандартному звужувальному пристрої.

Проведеними дослідженнями встановлено, що відносне відхилення між значенням перепаду тиску на стандартному звужувальному пристрої, знайденим з рівняння (1), та значенням перепаду тиску, яке розраховано ітераційно за коефіцієнтами, що входять у рівняння витрати природного газу відповідно до ДСТУ ГОСТ 8.586.1,2:2009 [3,4], може становити 29 %. Таке відносне відхилення неможливе у разі визначення перепаду тиску на стандартному звужувальному пристрої. Тому необхідно розробити нове аналітичне рівняння для розрахунку перепаду тиску на стандартному звужувальному пристрої.

**Формулювання цілі.** Отримати рівняння для визначення перепаду тиску на стандартному звужувальному пристрої, як функцію параметрів діафрагми, вимірювального трубопроводу та витрати природного

газу, а також на підставі цього рівняння розробити алгоритм вибору верхньої границі вимірювання перепаду тиску дифманометра.

**Виклад основного матеріалу.** Відповідно до національного стандарту України ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009 [2] розрахунок значення об'ємної витрати  $q_c$  природного газу, приведеної до стандартних умов, здійснюють за рівнянням

$$q_c = \frac{P}{4} \cdot b^2 \cdot D^2 \cdot C \cdot E \cdot e \cdot K_u \cdot K_n \sqrt{2 \cdot Dp \frac{p \cdot T_c}{r_c \cdot p_c \cdot T \cdot K}}, \quad (2)$$

де  $D$  – внутрішній діаметр вимірювального трубопроводу за робочої температури;  $b$  – відносний діаметр діафрагми;  $C$  – коефіцієнт витікання діафрагми;  $E$  – коефіцієнт швидкості входу;  $e$  – коефіцієнт розширення газоподібного середовища;  $K_u$  – поправковий коефіцієнт, який враховує шорсткість внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу;  $K_n$  – поправковий коефіцієнт, який враховує притуплення вхідного канта діафрагми;  $r_c$  – густина газоподібного середовища за стандартних умов ( $p_c = 101325 \text{ Па}$  і  $T_c = 293.15 \text{ К}$ );  $T$  – термодинамічна температура газоподібного середовища;  $K$  – коефіцієнт стискуваності газоподібного середовища.

Для того, щоб отримати рівняння розрахунку перепаду тиску  $Dp$  на діафрагмі, необхідно виділити з рівняння (2) безрозмірний комплекс, який залежить від вхідних величин та відносного діаметра звужувального пристрою і не залежить від перепаду тиску на діафрагмі. З рівняння (2) знайдено цей безрозмірний комплекс  $B$

$$B = \frac{8 \cdot r_c \cdot p_c \cdot T \cdot K}{T_c} \cdot \left( \frac{q_c}{p \cdot C \cdot E \cdot K_u \cdot K_n \cdot b^2 \cdot p \cdot D^2} \right)^2. \quad (3)$$

Запишемо коефіцієнти, які входять в рівняння (3), для визначення безрозмірного комплексу  $B$ .

Коефіцієнт витікання діафрагми  $C$  характеризує відношення дійсного значення витрати газоподібного середовища до його теоретичного значення, його визначають за рівнянням Reader-Harris/Gallagher [4]

$$C = 0.5961 + 0.0261 \cdot b^2 - 0.216 \cdot b^8 + 0.000521 \cdot \left( \frac{10^6 \cdot b}{Re} \right)^{0.7} + (0.0188 + 0.0063 \cdot A) \cdot b^{3.5} \cdot \left( \frac{10^6}{Re} \right)^{0.3} +$$

$$+ (0.043 + 0.08 \cdot e^{-10 \cdot L_1} - 0.123 \cdot e^{-7 \cdot L_1}) \cdot (1 - 0.11 \cdot A) \frac{b^4}{1 - b^4} - 0.031 \cdot (M'_2 - 0.8 \cdot M_2'^{1.1}) \cdot b^{1.3} + M_3, \quad (4)$$

де

$$A = \left( \frac{19000 \cdot b}{Re} \right)^{0.8}; \quad M'_2 = \frac{2 \cdot L'_2}{1 - b};$$

$$M_3 = \begin{cases} 0 & \text{для } D \geq 0.07112(2.8'') \\ 0.011 \cdot (0.75 - b) \cdot \left( 2.8 - \frac{D}{0.0254} \right) & \text{для } D < 0.07112(2.8'') \end{cases};$$

Значення коефіцієнтів  $L_1$  та  $L'_2$  залежать від способу відбору тиску на діафрагмі і розраховують відповідно за рівняннями:

– для діафрагм з кутовим способом відбору перепаду тиску

$$L_1 = L'_2 = 0;$$

– для фланцевого способу відбору перепаду тиску

$$L_1 = L'_2 = \frac{0.0254}{D};$$

– для діафрагм із трирадіусним способом відбору перепаду тиску

$$L_1 = 1; \quad L'_2 = 0.47.$$

Коефіцієнт швидкості входу  $E$  визначають за формулою [3]

$$E = \frac{1}{\sqrt{1 - b^4}} \quad (5)$$

Рівняння для розрахунку значення поправкового коефіцієнта  $K_n$ , який враховує притуплення вхідного канта діафрагми, представлено залежністю [4]

$$K_n = \begin{cases} 1 & \text{для } r_c / b / D \leq 0.0004 \\ 0.9826 + (r_c / b / D + 0.0007773)^{0.6} & \text{для } r_c / b / D > 0.0004 \end{cases}, \quad (6)$$

де  $r_c$  – поточний радіус притуплення вхідного канта діафрагми, який розраховують за рівнянням [4]

$$r_c = a - (a - r_n) \cdot e^{-\frac{t}{3}},$$

де  $a$  – коефіцієнт, який залежить від типу середовища і набуває значень, що дорівнюють:  $a = 0.000195$  – для газу і  $a = 0.00019$  – перегрітої пари;  $r_n$  – початковий радіус вхідного канта діафрагми;  $t$  – проміжок часу експлуатації діафрагми з моменту виміру початкового радіуса  $r_n$ .

Рівняння для розрахунку значення поправкового коефіцієнта  $K_u$ , який враховує шорсткість внутрішньої

поверхні вимірювального трубопроводу, подано залежністю [4]

$$K_u = \begin{cases} 1 & \text{для } Ra_{\min} < Ra < Ra_{\max} \\ 1 + 5.22 \cdot b^{3.5} \cdot (1 - I^*) & \text{для } Ra \leq Ra_{\min} \text{ і } Ra \geq Ra_{\max} \end{cases}, \quad (7)$$

де  $\lambda$  і  $\lambda^*$  – коефіцієнти тертя, значення яких розраховані за дійсного числа  $Re$  і еквівалентної шорсткості трубопроводу, що дорівнюють її дійсному значенню  $R_u$  і допустимому значенню  $R_u^*$ , відповідно.

Значення  $\lambda$  і  $\lambda^*$  розраховують за формулою

$$I = \left\{ 1.74 - 2 \cdot \lg \left[ \frac{2 \cdot R_u}{D} - \frac{37.36 \cdot \lg(k_D - k_R \cdot \lg(k_D + 3.3333 \cdot k_R))}{Re} \right] \right\}^{-2},$$

де

$$k_D = 0.26954 \cdot \frac{R_u}{D};$$

$$k_R = \frac{5.035}{Re};$$

$$R_u^* = \begin{cases} p \cdot Ra_{\max} & \text{для } Ra > Ra_{\max} \\ p \cdot Ra_{\min} & \text{при } Ra < Ra_{\min} \end{cases},$$

де  $Ra_{\max}$  – максимальне допустиме значення середнього арифметичного відхилення профілю шорсткості внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу;  $Ra_{\min}$  – мінімальне допустиме значення середнього арифметичного відхилення профілю шорсткості внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу.

Значення  $Ra_{\max}$  обчислюють за рівнянням [4]

$$10^4 \cdot \frac{Ra_{\max}}{D} = \begin{cases} 0.718866 \cdot b^{-3.887} + 0.364 & \text{для } Re \leq 10^4 \text{ та } b < 0.65 \\ A_0 \cdot b^{A_1} + A_2 & \text{для } Re > 10^4 \text{ та } b < 0.65 \\ A_0 \cdot 0.65^{A_1} + A_2 & \text{для } Re > 10^4 \text{ та } b \geq 0.65 \end{cases},$$

де  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$  – коефіцієнти, які залежать від числа  $Re$  і розраховуються як

$$A_i = \sum_{k=0}^3 B_k \cdot [\lg(Re)]^k,$$

де  $B_k$  – постійні коефіцієнти, значення яких наведено в [4].

Значення  $Ra_{\min}$  обчислюють з рівняння [4]

$$10^4 \cdot \frac{Ra_{\min}}{D} = \begin{cases} 7.1592 - 12.387 \cdot b - (2.0118 - 3.469 \cdot b) \cdot \lg(Re) + \\ + (0.1382 - 0.23762 \cdot b) \cdot [\lg(Re)]^2 & \text{для } b < 0.65; \\ -0.892353 + 0.24308 \cdot \lg(Re) - 0.0162562 \cdot [\lg(Re)]^2 & \text{для } b \geq 0.65 \end{cases}$$

Якщо в результаті розрахунку одержано значення

$$10^4 \cdot \frac{Ra_{\max}}{D} \geq 15, \text{ то приймають } Ra_{\max} = 15 \cdot 10^{-4} \cdot D.$$

Якщо в результаті розрахунку отримане значення

$$10^4 \cdot \frac{Ra_{\min}}{D} \leq 0, \text{ то приймають } Ra_{\min} = 0.$$

Значення  $10^4 \cdot \frac{Ra_{\max}}{D}$  заокруглюють до двох зна-

чущих цифр, якщо  $1 < 10^4 \cdot \frac{Ra_{\max}}{D} < 15$ , і до однієї цифри

після коми, якщо  $10^4 \cdot \frac{Ra_{\max}}{D} \leq 1$ , а значення  $10^4 \cdot \frac{Ra_{\min}}{D}$

заокруглюють до трьох цифр після коми.

Підставивши рівняння (3) у рівняння (2) і спростивши його, отримаємо рівняння, з якого можна знайти значення перепаду тиску на стандартному зужувальному пристрої

$$e^2 \cdot \frac{Dp}{p} = B. \quad (8)$$

Відповідно до [4] запишемо рівняння коефіцієнта розширення  $e$  природного газу, що враховує зміну питомого об'єму природного газу, який протікає через діафрагму

$$e = 1 - (0.351 + 0.256 \cdot b^4 + 0.93 \cdot b^8) \cdot \left( 1 - t^{\frac{1}{k}} \right). \quad (9)$$

де

$$t = 1 - \frac{Dp}{p} \quad (10)$$

Підставляючи рівняння (9) для визначення коефіцієнта розширення  $e$  газоподібного середовища у рівняння (8), отримаємо

$$\left[ 1 - (0.351 + 0.256 \cdot b^4 + 0.93 \cdot b^8) \cdot \left( 1 - \left( 1 - \frac{Dp}{p} \right)^{\frac{1}{k}} \right) \right]^2 \cdot \frac{Dp}{p} = B \quad (11)$$

Як бачимо з рівняння (9), отримати аналітичний розв'язок для визначення перепаду тиску неможливо. Щоб отримати аналітичний розв'язок рівняння (9),

розкладемо вираз  $\left( 1 - \frac{Dp}{p} \right)^{\frac{1}{k}}$  у ряд Маклорена [xx]:

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} f^{(n)}(0) \frac{x^n}{n!} = f(0) + f'(0)x + \frac{f''(0)x^2}{2!} + \frac{f^{(n)}(0)x^n}{n!} \quad (12)$$

де  $f(x)$  – функція вигляду  $\left( 1 - \frac{Dp}{p} \right)^{\frac{1}{k}}$ ;  $x = \frac{Dp}{p}$ ;

$f'$ ,  $f''$ ,  $f^{(n)}$  – відповідні часткові похідні функції  $f(x)$

по  $\frac{Dp}{p}$ .

Кінцевий вигляд ряду (12) матиме такий вигляд

$$f\left(\frac{Dp}{p}\right) = 1 - \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{Dp}{p} + \frac{1}{2!} \cdot \left(\frac{1-\kappa}{\kappa^2}\right) \cdot \left(\frac{Dp}{p}\right)^2 + \dots + (-1)^n \cdot \frac{\left(\frac{1}{\kappa} - n + 1\right)!}{n!} \cdot \left(\frac{Dp}{p}\right)^n \quad (13)$$

Виразимо з рівняння (13) ряд, який складатиметься з нульового та першого члена

$$f\left(\frac{Dp}{p}\right) = 1 - \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{Dp}{p} \quad (14)$$

Підставимо ряд (14) у рівняння (11)

$$\left[1 - (0.351 + 0.256 \cdot b^4 + 0.93 \cdot b^8) \cdot \left(1 - \left(1 - \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{Dp}{p}\right)\right)\right]^2 \cdot \frac{Dp}{p} = B \quad (15)$$

Здійснвши спрощення, отримаємо рівняння

$$\left[1 - (0.351 + 0.256 \cdot b^4 + 0.93 \cdot b^8) \cdot \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{Dp}{p}\right]^2 \cdot \frac{Dp}{p} = B \quad (16)$$

Перетворивши рівняння (16), одержуємо кубічне рівняння відносно  $\frac{Dp}{p}$  як

$$\left(\frac{Dp}{p}\right)^3 + A_1 \cdot \left(\frac{Dp}{p}\right)^2 + A_2 \cdot \left(\frac{Dp}{p}\right) + A_3 = 0; \quad (17)$$

$$A_0 = \frac{k}{0.351 + 0.256 \cdot b^4 + 0.93 \cdot b^8}; \quad (18)$$

$$A_1 = -2 \cdot A_0; \quad (19)$$

$$A_2 = A_0^2; \quad (20)$$

$$A_3 = -B \cdot A_2; \quad (21)$$

Виконавши заміну відповідно до [7]

$$Z = \frac{Dp}{p} - \frac{A_1}{3}, \quad (22)$$

зведемо рівняння (17) до канонічного вигляду

$$Z^3 + 3 \cdot q_0 \cdot Z + 2 \cdot q_1 = 0, \quad (23)$$

в якому

$$q_0 = \left(\frac{A_1}{3}\right)^2 \cdot \left(\frac{3 \cdot A_2}{A_1^2} - 1\right); \quad (24)$$

$$q_1 = \left(\frac{A_1}{3}\right)^2 \cdot \left(1 - \frac{4.5 \cdot A_2}{A_1^2} + \frac{13.5 \cdot A_3}{A_1^3}\right). \quad (25)$$

Врахувавши коефіцієнти  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$  та  $A_3$  (18) – (21), визначимо коефіцієнти рівняння (24) та (25):

$$q_0 = -\left(\frac{A_1}{6}\right)^2; \quad (26)$$

$$q_1 = -\left(\frac{A_1}{6}\right)^2 \cdot \left(1 - \frac{13.5 \cdot B}{A_0}\right). \quad (27)$$

Для розв'язку рівняння (23) знайдемо дискримінант [7]

$$D_1 = q_1^2 + q_0^3 \quad (28)$$

який із урахуванням (26) та (27) дорівнюватиме

$$D_1 = -\left(\frac{A_1}{6}\right)^6 \cdot \frac{13.5 \cdot B}{A_0} \cdot \left(2 - \frac{13.5 \cdot B}{A_0}\right) \quad (29)$$

Аналізуючи можливі діапазони зміни вхідних величин в (26), (27) та (29), знаходимо, що  $q_0 < 0$ ,  $q_1 > 0$  і  $D_1 < 0.3$  урахуванням з [7] розв'язком рівняння (23), буде

$$Z = -\left(\frac{A_1}{3}\right) \cdot \cos\left(\frac{1}{3} \cdot \arccos\left(1 - \frac{13.5 \cdot B}{A_0}\right)\right) \quad (30)$$

Використовуючи (22) та (30), запишемо кінцевий вираз для знаходження відношення перепаду тиску на стандартному звужувальному пристрої до абсолютного тиску газоподібного середовища

$$Dp = \frac{2 \cdot k \cdot p}{3 \cdot (0.351 + 0.256 \cdot b^4 + 0.93 \cdot b^8)} \times \left(1 - \cos\left(\frac{1}{3} \cdot \arccos\left(1 - \frac{13.5 \cdot B \cdot (0.351 + 0.256 \cdot b^4 + 0.93 \cdot b^8)}{k}\right)\right)\right) \quad (31)$$

Отримане рівняння (31) дає змогу безпосередньо визначити для будь-яких вхідних даних, що входять у безрозмірний комплекс  $B$ , відношення  $\frac{Dp}{p}$ , а значить, і значення перепаду тиску  $Dp$  на стандартному звужувальному пристрої.

Алгоритм вибору верхньої границі перепаду тиску  $Dp_e$  дифманометра виконуємо за такими вхідними даними, як:

- поточне значення об'ємної витрати природного газу  $q_c$ , приведеної до стандартних умов, в одній із ниток колектора;
- спосіб відбору перепаду тиску для діафрагми;
- відносний діаметр  $b$  діафрагми;
- поточне значення абсолютного тиску  $p$  природного газу;
- поточне значення температури  $t$  природного газу в °C;
- матеріал, з якого виготовлено діафрагму, або коефіцієнт  $\alpha_{\text{лн}}$  лінійного розширення матеріалу, з якого її виготовлено;

– матеріал, з якого виготовлено вимірювальний трубопровід, або коефіцієнт  $a_{tm}$  лінійного розширення матеріалу, з якого його виготовлено;

– залежно від виду труби, стану внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу і умов його експлуатації, відповідно до [2] вибирають середньо-арифметичне відхилення профілю шорсткості  $Ra$  або еквівалентну шорсткість  $R_{\text{ш}}$ ;

– початковий радіус  $r_n$  вхідного канта діафрагми та проміжок часу експлуатації діафрагми  $t$  з моменту вимірювання початкового радіуса  $r_n$ ;

– густина природного газу  $r_c$  за стандартних умов;

– молярна частка діоксиду карбону  $x_y$  та молярна частка азоту  $x_a$  у природному газі.

Запишемо алгоритм визначення верхньої границі перепаду тиску  $Dp_e$  дифманометра, коли через стандартний звукувальний пристрій проходить природний газ:

1) розраховують значення термодинамічної температури  $T$  природного газу за рівнянням

$$T = t + 273.15; \quad (32)$$

2) обчислюють коефіцієнт стискуваності  $K$  природного газу відповідно до [6];

3) розраховують показник адіабати природного газу  $\kappa$  за рівнянням [5]

$$\begin{aligned} \kappa = & 1.556 \cdot (1 + 0.074 \cdot x_a) - 3.9 \cdot 10^{-4} \cdot T \cdot (1 - \\ & - 0.68 \cdot x_a) - 0.208 \cdot r_c + \left( 10^{-6} \cdot \frac{p}{T} \right)^{1.43} \times \\ & \times \left[ 384 \cdot (1 - x_a) \cdot \left( 10^{-6} \cdot \frac{p}{T} \right)^{0.8} + 26.4 \cdot x_a \right]; \end{aligned} \quad (33)$$

4) відповідно до [5] розраховують динамічну в'язкість природного газу  $m$  за рівнянням

$$m = 3.24 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{\sqrt{T} + 1.37 - 9.09 \cdot r_c^{0.125}}{\sqrt{r_c} + 2.08 - 1.5 \cdot (x_a + x_y)} \cdot C_m; \quad (34)$$

де

$$C_m = 1 + \frac{p_{pr}^2}{30 \cdot (T_{pr} - 1)}; \quad p_{pr} = \frac{p}{p_{pk}}; \quad T_{pr} = \frac{T}{T_{pk}};$$

$$p_{pk} = 2.9585 \cdot 10^6 \cdot (1.608 - 0.05994 \cdot r_c + x_y - 0.392 \cdot x_a);$$

$$T_{pk} = 88.25 \cdot (0.9915 + 1.759 \cdot r_c - x_y - 1.681 \cdot x_a);$$

5) визначають коефіцієнт  $K_{\text{ш}}$ , що враховує зміну діаметра отвору діафрагми, зумовлену відхиленням температури середовища від  $20^\circ\text{C}$ , за рівнянням [3]

$$K_{\text{ш}} = 1 + a_{\text{ш}} \cdot (t - 20). \quad (35)$$

Якщо заданий матеріал виготовлення діафрагми відповідає матеріалу, наведеному у [3], то значення  $a_{\text{ш}}$ , розраховують за рівнянням

$$a_{\text{ш}} = 10^{-6} \cdot [a_0 + 10^{-3} \cdot t \cdot a_1 + 10^{-6} \cdot t^2 \cdot a_2]; \quad (36)$$

де  $a_0, a_1, a_2$  – постійні коефіцієнти, значення яких знаходять відповідно до [3];

6) знаходять коефіцієнт  $K_m$ , що враховує зміну внутрішнього діаметра вимірювального трубопроводу, зумовлену відхиленням температури середовища від  $20^\circ\text{C}$ , за рівнянням [3]

$$K_m = 1 + a_m \cdot (t - 20). \quad (37)$$

Якщо заданий матеріал виготовлення вимірювального трубопроводу відповідає матеріалу, наведеному в [3], то значення  $a_m$  розраховують за рівнянням (36);

7) за значенням  $b$  розраховують коефіцієнт швидкості входу  $E$  за формулою (5);

8) розраховують значення числа Рейнольдса  $Re$  за рівнянням [3]

$$Re = \frac{4 \cdot q_c \cdot r_c}{p \cdot D \cdot m}; \quad (38)$$

9) розраховують коефіцієнт витікання  $C$  діафрагми за формулою (4);

10) за значеннями  $Re, D, b$  та  $Ra$  розраховують значення поправкового коефіцієнта  $K_{\text{ш}}$ , що враховує шорсткість внутрішньої поверхні трубопроводу, за рівнянням (7);

11) за значеннями  $D, b, r_n$  та  $t$  розраховують значення поправкового коефіцієнта  $K_n$ , що враховує пригнітлення вхідного канта діафрагми, за рівнянням (6);

12) розраховують безрозмірний комплекс  $B$  за рівнянням (3);

13) визначають перепад тиску  $Dp$  на стандартному звукувальному пристрої з рівняння (31);

14) вибирають верхню границю перепаду тиску  $Dp_e$  дифманометра як значення, більше за значення перепаду тиску на стандартному звукувальному пристрої зі стандартного ряду ГОСТ 18140 – 84 [8].

**Висновки.** У результаті проведеної роботи можна виокремити такі результати:

1. У роботі проаналізовано рівняння (1) для розрахунку перепаду тиску на стандартному звужувальному пристрої, який показав, що це рівняння неможливо застосовувати для визначення верхньої границі перепаду тиску  $Dp_*$  дифманометра, оскільки воно дає значення відносного відхилення між рівнянням (1) та рівнянням, розрахованим відповідно до [3], що становить 29 %.

2. Розроблено нове рівняння для розрахунку значення перепаду тиску на стандартному звужувальному пристрої.

3. Розроблено алгоритм вибору значення верхньої границі перепаду тиску дифманометра.

Такий алгоритм можна застосовувати у розрахунку параметрів та характеристик витратоміра змінного перепаду тиску, оптимального за точністю вимірювання витрати та кількості газоподібного середовища.

1. Пистун Е.П. Аналитическое определение предельного номинального перепада давления дифференциальных манометров и относительной площади стандартных диафрагм расходомеров газа и пара / Е.П. Пистун, Л.В. Лесовой, И.С. Крук // Измерительная техника. — М.: Изд-во стандартов, 1987. — № 10. — С. 30–33. 2. Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами: РД 20-213-80. — Офиц. док. — М.: Изд-во стандартов, 1982. 3. Метрологія. Вимірювання

витрати та кількості рідини й газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 1. Принцип методу вимірювань та загальні вимоги. (ГОСТ 8.586.1-2005 (ISO 5167-1:2003), IDT; ISO 5167-1:2003, NEQ) [Текст]: ДСТУ ГОСТ 8.586.1:2009. — [Чинний від 2010-04-01]. — К.: Держспоживстандарт України, 2010. — 98 с. — (Національний стандарт України). 4. Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини й газу із застосуванням стандартних звужуючих пристроїв. Частина 2. Діафрагми. Технічні вимоги. (ГОСТ 8.586.2-2005 (ISO 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). 5. 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]. — М.: Межгосударственный стандарт, 1997. — 20 с. 6. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение коэффициента сжимаемости: ГОСТ 30319.2-1996. — [Действующий от 1996-12-04]. — М.: Госстандарт России, 1996. 7. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. — Изд. шестое, стереотипное. — М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1956. — 608 с. 8. Манометры дифференциальные ГСП. Общие технические условия. ГОСТ 18140-84. [Действующий от 1985-07-01]. — М.: Изд-во стандартов 2003. — 15 с.