

РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ СТАНДАРТНОГО ПРИСТРОЮ ЗВУЖЕННЯ ПОТОКУ ЗА ЗАДАНИМ ЗНАЧЕННЯМ МАКСИМАЛЬНОЇ ВТРАТИ ТИСКУ НА НЬОМУ

© Лесовой Л., 2005

Techniques for defining the higher limit of differential pressure of differential pressure device and calculation of standard pressure differential device parameters by the given value of maximum pressure losses on it are developed. New analytical equations for defining the roughness correction coefficient and equation for defining pressure losses on it are given in this paper.

Постановка проблеми. Сьогодні при розрахунку параметрів стандартного пристрою звуження потоку приділяють особливу увагу розрахунку параметрів стандартного пристрою звуження потоку за заданими максимальними втратами тиску на ньому. Такі стандартні пристрої звуження потоку застосовуються у тому випадку, коли за технологічними вимогами накладаються обмеження на втрати тиску на них. Наприклад, під час вимірювання витрати перегрітої пари за допомогою стандартного пристрою звуження потоку при збільшенні втрат тиску на ньому може призвести до переходу пари із перегрітої у вологу водяну пару, що забороняється технологічними вимогами. Тому розрахунок параметрів стандартних пристроїв звуження потоку за заданими втратами тиску на них є актуальним завданням.

Під час розрахунку параметрів стандартного пристрою звуження потоку витратомірів змінного перепаду тиску існують три методи: розрахунок параметрів за заданим верхнім граничним перепадом тиску дифманометра; розрахунок параметрів стандартних пристроїв звуження потоку, які забезпечують мінімальну похибку вимірювання витрати середовища; розрахунок параметрів стандартного пристрою звуження потоку за заданими втратами тиску на ньому.

Під час розрахунку параметрів стандартних пристроїв звуження потоку за заданим верхнім граничним перепадом тиску дифманометра існує загроза виходу за максимальне значення втрати тиску, яке встановлено технологічним регламентом. Під час розрахунку параметрів стандартних пристроїв звуження потоку, які забезпечують мінімальну похибку вимірювання витрати, отримують відносний діаметр пристрою звуження потоку в діапазоні від 0,2 до 0,5, що, своєю чергою, збільшує втрати тиску на цих пристроях. Тому постає завдання розробити методику вибору верхнього граничного перепаду тиску дифманометра та розрахунку параметрів стандартного пристрою звуження потоку за заданими максимальними втратами тиску на них.

Виклад основного матеріалу. Втрата тиску Δp являє собою різницю статичних тисків: виміряного перед пристроєм звуження потоку на відстані $1D$ від нього, де стає дуже малим вплив тиску, обумовленого гальмуванням вхідного потоку безпосередньо у пристрої звуження потоку, і виміряного після пристрою звуження потоку на відстані $6D$ від нього, де можна вважати цілком закінченим процес відновлення статичного тиску, обумовленого розширенням струменя.

У пристрої звуження потоку частина повного тиску, що йде на подолання сил гідравлічних опорів, є безповоротно втраченою.

Втрати повного тиску для зручності розрахунків поділяють на втрати на тертя і місцеві втрати.

Втрату тиску на пристрої звуження потоку залежно від густини ρ , коефіцієнта гідравлічного опору ξ , коефіцієнта розширення ε середовища та середньої швидкості потоку \bar{U}_0 у найменшому перерізі струмینی потоку визначають за таким рівнянням:

$$\Delta p = 0,5 \cdot \frac{\xi \cdot \rho \cdot \bar{U}_0^2}{\varepsilon^2}. \quad (1)$$

Для визначення середньої швидкості потоку \bar{U}_0 , застосувавши рівняння нерозривності струмینی потоку

$$q_m = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \rho \cdot \bar{U}_0, \quad (2)$$

отримаємо таке рівняння:

$$\bar{U}_0 = \frac{4 \cdot q_m}{\pi \cdot d^2 \cdot \rho}, \quad (3)$$

де q_m – масова витрата середовища; d – діаметр отвору або горловини стандартного пристрою звуження потоку.

Масова витрата q_m середовища визначається за методом змінного перепаду тиску згідно з [1, 2, 3, 4, 5] за рівнянням

$$q_m = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot C \cdot E \cdot K_{ш} \cdot K_{п} \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta p}, \quad (4)$$

де C – коефіцієнт витікання, який залежить від типу стандартного пристрою звуження потоку; E – коефіцієнт швидкості входу; Δp – перепад тиску на пристрої звуження потоку; $K_{ш}$ – поправковий коефіцієнт на шорсткість внутрішньої поверхні трубопроводу (для еліпсного сопла та труб Вентурі усіх типів $K_{ш}=1$); $K_{п}$ – поправковий коефіцієнт на притуплення вхідного канта отвору діафрагми (для сопел та труб Вентурі усіх типів $K_{п}=1$).

Підставивши (3) та (4) у рівняння (1), отримаємо рівняння для розрахунку втрати тиску на пристрої звуження потоку у вигляді

$$\Delta p = \xi \cdot C^2 \cdot E^2 \cdot \Delta p. \quad (5)$$

Це рівняння дійсне для визначення втрат тиску на соплі Вентурі та труб Вентурі. Для діафрагми, сопла ISA1932 та еліпсного сопла застосовується модифіковане із [1, 2] рівняння для визначення втрат тиску у вигляді

$$\Delta p = \frac{\sqrt{\xi}}{\sqrt{\xi} + 2} \cdot \Delta p. \quad (6)$$

Коефіцієнт гідравлічного опору ξ дорівнює відношенню втраченої повної енергії потоку до кінетичної енергії або втраченого повного тиску, усередненого по масовій витраті, до динамічного тиску в умовному перетині. Коефіцієнт гідравлічного опору ξ залежить від типу стандартного пристрою звуження потоку і розраховується за рівнянням:

– для діафрагми [6]

$$\xi = \left\{ \frac{\sqrt{1 - \beta^4 \cdot [1 - (C \cdot K_{ш} \cdot K_{п})^2]} - 1}{C \cdot K_{ш} \cdot K_{п} \cdot \beta^2} \right\}^2, \quad (7)$$

де β – відносний отвір пристрою звуження потоку; $K_{ш}$ – поправковий коефіцієнт на шорсткість внутрішньої поверхні трубопроводу; $K_{п}$ – поправковий коефіцієнт на притуплення вхідного канту отвору діафрагми;

– для сопла ISA1932 або еліпсного сопла [2]

$$\xi = \left[\frac{\sqrt{1 - \beta^4 \cdot (1 - C^2)}}{C \cdot \beta^2} - 1 \right]^2 ; \quad (8)$$

– для сопла Вентурі [7]

$$\xi = 0,992 \cdot K_1 \cdot \xi_1 + \Delta\xi , \quad (9)$$

де K_1 , ξ_1 , $\Delta\xi$ – додаткові коефіцієнти, значення яких наведені відповідно у табл. 1, 2 та 3, у яких Re – число Рейнольдса, φ° – кут конусності дифузора сопла Вентурі.

Таблиця 1

Значення коефіцієнта K_1

β	φ°				
	5	7	10	12,5	15
0,80	0,59	0,55	0,48	0,40	0,33
0,67	0,81	0,81	0,78	0,77	0,66
0,57	0,90	0,89	0,85	0,81	0,77
$\leq 0,50$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Таблиця 2

Значення коефіцієнта ξ_1 для $Re/\beta \geq 2 \cdot 10^5$

φ°	5	7	10	12,5	15
ξ_1	0,10	0,10	0,11	0,13	0,16

Під час здійснення розрахунків для чисел $Re/\beta < 2 \cdot 10^5$ значення коефіцієнта ξ_1 необхідно розраховувати відповідно до [7].

Таблиця 3

Значення коефіцієнта $\Delta\xi$

β	0,80	0,67	0,57	$\leq 0,5$
$\Delta\xi$	-0,004	0	-0,010	-0,010

– для труби Вентурі [7]

$$\xi = 1,01AK_1\xi_1 , \quad (10)$$

де A , K_1 , ξ_1 – додаткові коефіцієнти, значення яких наведені відповідно у табл. 4, 1 та 2, у яких φ° – кут конусності дифузора труби Вентурі.

Таблиця 4

Значення коефіцієнта A

φ°	5	7	10	12,5	15
A	1,080	1,095	1,1320	1,165	1,145

Найменші втрати тиску мають труби Вентурі; вони становлять 5–20 % від перепаду тиску на них. Втрати тиску на соплі Вентурі становлять від 5 до 25 % від перепаду тиску на ньому. Діафрагми мають найбільші втрати тиску. Проміжні втрати тиску мають сопло ISA1932 та еліпсне сопло, але втрати тиску на них становлять усього на 10–15 % менші значення, ніж на діафрагмі.

Як бачимо з рівнянь (5)–(10), втрати тиску $\Delta\varpi$ на пристрої звуження потоку залежать від перепаду тиску Δp на ньому та його відносного отвору β . Відносний отвір β розраховується за перепадом тиску на пристрої звуження потоку за рівнянням масової витрати (4). А на перепад тиску на пристрої звуження потоку накладаються обмеження заданих втрат тиску.

Нижче наведено методику розрахунку параметра пристрою звуження потоку під задані максимальні втрати тиску на них.

Методика розрахунку параметра пристрою звуження потоку за заданими максимальними втратами тиску на ньому. Розрахунок параметра пристрою звуження потоку за заданими втратами тиску на ньому складається з двох частин, одна з яких визначає максимальну верхню межу перепаду тиску на дифманометрі, а друга – розраховує параметр звуження потоку за визначеного у першій частині верхньою межею перепаду тиску дифманометра.

Для розрахунку параметра пристрою звуження потоку за заданими максимальними втратами тиску на них необхідні такі вихідні дані: тип середовища; тип пристрою звуження потоку; спосіб відбору тиску (для діафрагми); мінімальне q_{\min} і максимальне q_{\max} значення витрати середовища; максимальне значення абсолютного тиску p_{\max} середовища (при вимірюванні тиску манометром абсолютного тиску) або максимальне значення надлишкового тиску $p_{H\max}$ середовища і атмосферний тиск p_a (під час вимірювання тиску манометром надлишкового тиску); максимальна втрата тиску $\Delta\varpi_{\max}$ на пристрої звуження потоку; температура t середовища в $^{\circ}\text{C}$ або термодинамічна температура T ; коефіцієнт α_{td} лінійного розширення матеріалу, з якого виготовлено пристрій звуження потоку; внутрішній діаметр трубопроводу D_{20} на вході в пристрій звуження потоку або вхідної циліндричної ділянки труби Вентурі за температури 20°C і коефіцієнт α_{td} лінійного розширення матеріалу, з якого виготовлений трубопровід; середнє арифметичне відхилення профілю шорсткості R_a або еквівалентна шорсткість внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу $R_{ш}$; початковий радіус r_n заокруглення вхідного канта (для діафрагми) і інтервал часу експлуатації діафрагми $\tau_T=0$ (для діафрагми); для газоподібних середовищ густина ρ_c за стандартних умов (за тиску $p_c=101325\text{Па}$, та температури $t=20^{\circ}\text{C}$); густина середовища ρ у робочих умовах (за наявності густиноміра).

Розрахунок параметра пристрою звуження потоку за заданими максимальними втратами тиску на них під час вимірювання витрати середовища за методом змінного перепаду тиску здійснюють за таким алгоритмом.

Під час вимірювання надлишкового $p_{H\max}$ і атмосферного p_a тиску середовища визначають максимальне значення абсолютного тиску p_{\max} середовища за рівнянням

$$p_{\max} = p_{H\max} + p_a. \quad (11)$$

Під час вимірювання температури t визначають термодинамічну температуру T за рівнянням

$$T = t + 273,15. \quad (12)$$

Розраховують діаметр вимірювального трубопроводу D за робочої температури за рівнянням

$$D = D_{20} \cdot [1 + \alpha_{td} \cdot (t - 20)]. \quad (13)$$

Вибирають нульове значення перепаду тиску Δp_0 на пристрої звуження потоку, що дорівнює значенню максимальної втрати тиску $\Delta\varpi_{\max}$ на пристрої звуження потоку.

Згідно з нормативними документами на властивості середовища розраховують значення властивостей середовища: для суміші газів заданого повного складу – ρ_c , Z_c та Z ; для газоподібних середовищ (суміші газів, водяного пари) – κ ; для усіх середовищ – ρ і μ .

Розраховують допоміжну величину B :

– для масової витрати $q_{m\max}$ середовища за рівнянням

$$B = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{m\max}}{\pi \cdot D^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \rho}}}; \quad (14)$$

– для об'ємної витрати $q_{v\max}$ середовища в робочих умовах за рівнянням

$$B = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{v\max}}{\pi \cdot D^2 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}}}}; \quad (15)$$

– для об'ємної витрати $q_{c\max}$ газу, приведені до стандартних умов, за рівнянням

$$B = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{c\max} \cdot \rho_c}{\pi \cdot D^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \rho}}}. \quad (16)$$

Відповідно до [1, 2, 3] для вибраного типу пристрою звуження потоку визначають границі допустимих значень відносних діаметрів β_H і β_B та розраховують перше наближення відносного діаметра β_1 пристрою звуження потоку за рівнянням

$$\beta_1 = \frac{\beta_H + \beta_B}{2}. \quad (17)$$

Розраховують значення числа Рейнольдса Re за рівнянням

$$Re = \frac{4 \cdot q_{m\max}}{\pi \cdot D \cdot \mu} = \frac{4 \cdot q_{v\max} \cdot \rho}{\pi \cdot D \cdot \mu} = \frac{4 \cdot q_{c\max} \cdot \rho_c}{\pi \cdot D \cdot \mu}. \quad (18)$$

Для β_1 розраховують значення коефіцієнта швидкості входу E_1 за формулою

$$E_1 = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta_1^4}}. \quad (19)$$

Відповідно до [1, 2, 3] для вибраного типу пристрою звуження потоку розраховують значення коефіцієнта витікання C_1 .

Залежно від вибраного типу пристрою звуження потоку розраховують значення поправкового коефіцієнта на шорсткість внутрішньої поверхні трубопроводу за рівнянням:

– для діафрагми

$$K_{ш} = 1 + 5,22\beta^{3,5}(\lambda - \lambda^*), \quad (20)$$

де λ і λ^* – коефіцієнти тертя, розраховані за дійсним числом Re , та значень еквівалентної шорсткості внутрішньої поверхні трубопроводу, що дорівнюють відповідно її дійсному значенню $R_{ш}$, наведених у [5], та умовному - $R_{ш}^*$.

Значення λ і λ^* розраховують за модифікованою формулою Colebrook [8]

$$\lambda = \left[1,74 - 2 \cdot \lg \left(\frac{2 \cdot k}{D} - \frac{37,36 \cdot A_1}{Re} \right) \right]^{-2}, \quad (21)$$

де

$$\begin{aligned} A_1 &= \lg(k_D - k_R \cdot \lg(k_D - k_R \cdot \lg(k_D - k_R \cdot \lg(k_D - k_R \cdot \lg(k_D - k_R \cdot \lg(k_D + 3,3333 \cdot k_R)))))); \\ k_D &= 0,26954 \cdot R_{ш}/D; \\ k_R &= 5,035/Re; \\ R_{ш}^* &= \pi \cdot R_{a\max} \text{ при } Ra > R_{a\max}; \end{aligned}$$

$$R_{ш}^* = \pi \cdot Ra_{min} \text{ при } Ra < Ra_{min};$$

Ra_{max} – максимальне середнє арифметичне відхилення профілю шорсткості внутрішньої поверхні трубопроводу, визначеної відповідно до табл. 5; Ra_{min} – мінімальне середнє арифметичне відхилення профілю шорсткості внутрішньої поверхні трубопроводу, визначеної відповідно до табл. 6.

Таблиця 5

**Максимальне допустиме значення відносної шорсткості
внутрішньої поверхні трубопроводу $10^4 Ra_{max}/D$**

β	$10^4 Ra_{max}/D$ для Re								
	$\leq 10^4$	3×10^4	10^5	3×10^5	10^6	3×10^6	10^7	3×10^7	10^8
$\leq 0,20$	15	15	15	15	15	15	15	15	15
0,30	15	15	15	15	15	15	15	14	13
0,40	15	15	10	7,2	5,2	4,1	3,5	3,1	2,7
0,50	11	7,7	4,9	3,3	2,2	1,6	1,3	1,1	0,9
0,60	5,6	4,0	2,5	1,6	1,0	0,7	0,6	0,5	0,4
$\geq 0,65$	4,2	3,0	1,9	1,2	0,8	0,6	0,4	0,3	0,3

Таблиця 6

**Мінімальне допустиме значення відносної шорсткості
внутрішньої поверхні трубопроводу $10^4 Ra_{min}/D$**

β	$10^4 Ra_{min}/D$ для Re			
	$\leq 3 \times 10^6$	10^7	3×10^7	10^8
$\leq 0,50$	0,0	0,0	0,0	0,0
0,60	0,0	0,0	0,003	0,004
$\geq 0,65$	0,0	0,013	0,016	0,012

Для проміжних значень β і/або чисел Re максимальні та мінімальні допустимі значення Ra визначають шляхом лінійної інтерполяції табличних даних за формулою

$$10^4 Ra/D = \frac{Ra_2^* - Ra_1^*}{\beta_2 - \beta_1} (\beta - \beta_1) + Ra_1^*, \quad (22)$$

де $Ra_1^* = \frac{Ra_{12}^* - Ra_{11}^*}{Re_2 - Re_1} (Re - Re_1) + Ra_{11}^*$;

$$Ra_2^* = \frac{Ra_{22}^* - Ra_{21}^*}{Re_2 - Re_1} (Re - Re_1) + Ra_{21}^*$$

β_1, β_2 – найближчі менше та більше до величини β значення відносного діаметра діафрагми, яке вказане у табл. 5 або 6;

Re_1, Re_2 – найближчі менше та більше до величини Re значення числа Рейнольдса, яке вказане у табл. 5 або 6;

Ra_{11}^*, Ra_{12}^* – вказані у табл. 5 або 6 значення шорсткості $10^4 Ra/D$ при Re_1 та Re_2 для β_1 ;

Ra_{21}^*, Ra_{22}^* – вказані у табл. 5 або 6 значення шорсткості $10^4 Ra/D$ при Re_1 та Re_2 для β_2 ;

– для сопла ISA 1932 та сопла Вентурі, якщо значення $10^4 Ra/D$ на довжині не менше 10D перевищує значення вказаного у табл. 7, а значення еквівалентної шорсткості $R_{ш}$ не перевищує $30D/10^4$ [8]

$$K_{ш} = 1 + A_{Re} \cdot \beta^4 \cdot \left[0,045 \cdot \lg \left(10^4 \cdot \frac{R_{ш}}{D} \right) - 0,025 \right], \quad (23)$$

де

$$A_{Re} = \begin{cases} 1 - \frac{[\lg(\text{Re}) - 6]^2}{4} & \text{при } 10^4 < \text{Re} < 10^6; \\ 1 & \text{при } \text{Re} \geq 10^6. \end{cases}$$

Якщо значення $10^4 Ra/D$ на довжині не менше від $10D$ перевищує значення, вказаного у табл. 7, то поправковий коефіцієнт на шорсткість внутрішньої поверхні трубопроводу дорівнює 1.

Таблиця 7

Максимальне допустиме значення відносної шорсткості внутрішньої поверхні трубопроводу для сопла ISA1932 та сопла Вентурі

β	$\leq 0,35$	0,36	0,38	0,40	0,42	0,44	0,46	0,48	0,50	0,60	0,70	0,77	0,80
$10^4 \frac{R_{a \max}}{D}$	8,0	5,9	4,3	3,4	2,8	2,4	2,1	1,9	1,8	1,4	1,3	1,2	1,2

Для проміжних значень β , не вказаних у табл. 7, значення Ra визначають лінійною інтерполяцією табличних значень за формулою

$$10^4 Ra/D = \frac{Ra_2^* - Ra_1^*}{\beta_2 - \beta_1} (\beta - \beta_1) + Ra_1^*, \quad (24)$$

де β_1, Ra_1^* – найближче менше до величини β значення відносного діаметра сопла, вказаного у табл. 7, та відповідне йому значення $10^4 Ra/D$;

β_2, Ra_2^* – найближче більше до величини β значення відносного діаметра сопла, вказаного у табл. 7, та відповідне йому значення $10^4 Ra/D$;

– для еліпсного сопла та труб Вентурі, якщо відносна шорсткість $Ra/D \leq 3,2 \cdot 10^{-4}$, то $K_{ш}=1$.

Для діафрагм розраховують значення поправкового коефіцієнта $K_{п1}$ на притуплення вхідного канта отвору діафрагми (для сопел та труб Вентурі усіх типів $K_{п1}=1$) за рівнянням [9]

$$K_{п1} = \begin{cases} 1,0547 - 0,0575 \cdot e^{-\frac{149 \cdot rH}{D \cdot \beta}} & \text{для } r > 0,0004 \cdot D \cdot \beta \\ 1 & \text{для } r \leq 0,0004 \cdot D \cdot \beta \end{cases} \quad (25)$$

Розраховують коефіцієнт гідравлічного опору ξ_1 пристрою звуження потоку відповідно: для діафрагми – за рівнянням (7), для сопла ISA 1932 і еліпсного сопла – за рівнянням (8), для сопла Вентурі – за рівнянням (9), для труби Вентурі – за рівнянням (10).

Визначають перепад тиску Δp_1 на пристрої звуження потоку відповідно:

– для діафрагми, сопла ISA1932 і еліпсного сопла за рівнянням

$$\Delta p_1 = \left(1 + \frac{2}{\sqrt{\xi_1}} \right) \cdot \Delta \varpi_{\max}; \quad (26)$$

– для сопла Вентурі і труби Вентурі за рівнянням

$$\Delta p_1 = \frac{1}{\xi_1 C_1^2 E_1^2} \Delta \varpi_{\max}. \quad (27)$$

Відповідно до [1, 2, 3] для вибраного типу пристрою звуження потоку розраховують значення коефіцієнта розширення середовища ε_1 (для рідких середовищ $\varepsilon_1=1$).

Уточнюють відносний діаметр β_2 пристрою звуження потоку за рівнянням

$$\beta_2 = \frac{B}{\sqrt{\sqrt{\Delta p_1} C_1 E_1 K_{ш1} K_{п1} \varepsilon_1}}. \quad (28)$$

Розраховують методичну невизначеність $U'_{\Delta p}$ результату розрахунку перепаду тиску Δp на пристрої звуження потоку відповідно до рівняння

$$U'_{\Delta p} = 100 \frac{|\Delta p_{i-1} - \Delta p_i|}{\Delta p_i}, \quad (29)$$

де Δp_i – i -те значення перепаду тиску; Δp_{i-1} – $i-1$ -ше значення перепаду тиску.

Якщо значення методичної невизначеності $U'_{\Delta p}$ перевищує значення $U'_{\Delta p} > 0,1$, то уточнення значення перепаду тиску Δp продовжують з рівняння (26) або (27). Якщо ж значення методичної невизначеності $U'_{\Delta p}$ не перевищує значення $U'_{\Delta p} \leq 0,1$, то процес уточнення значення перепаду тиску Δp закінчують.

Вибирають дифманометр із верхньою межею вимірювання перепаду тиску $\Delta p_{ВП}$ з найближчим меншим значенням за Δp зі стандартного ряду чисел 1; 1,6; 2,5; 4; $6,3 \cdot 10^n$ і розраховують діаметр отвору або горловини пристрою звуження потоку за заданим значенням межі вимірювання перепаду тиску $\Delta p_{ВП}$ за таким алгоритмом.

Вибирають перше наближення відносного діаметра β_1 отвору або горловини пристрою звуження потоку таким, що дорівнює відносному отворові β , розрахованому за рівнянням (28) для останнього значення Δp , за яким було вибрано $\Delta p_{ВП}$.

За формулою (19) для β_1 розраховують значення коефіцієнта швидкості входу E_1 .

Відповідно до [1, 2, 3] для вибраного типу пристрою звуження потоку розраховують значення коефіцієнта витікання C_1 .

Залежно від вибраного типу пристрою звуження потоку розраховують значення поправкового коефіцієнта $K_{ш1}$ на шорсткість внутрішньої поверхні трубопроводу за одним з рівнянь (21) або (23). Для еліпсного сопла та труб Вентурі – $K_{ш1}=1$.

За рівнянням (25) для діафрагм розраховують значення поправкового коефіцієнта $K_{п1}$ на притуплення вхідного канта отвору діафрагми (для сопел та труб Вентурі усіх типів $K_{п1}=1$).

Відповідно до [1, 2, 3] для вибраного типу пристрою звуження потоку розраховують значення коефіцієнта розширення середовища ε_1 (для рідких середовищ $\varepsilon_1=1$).

Уточняють відносний діаметр β_2 пристрою звуження потоку за рівнянням

$$\beta_2 = \frac{B}{\sqrt{\sqrt{\Delta p_{ВП}} C_1 E_1 K_{ш1} K_{п1} \varepsilon_1}}. \quad (30)$$

Розраховують методичну невизначеність U'_{β} результату розрахунку відносного діаметра β_2 пристрою звуження потоку відповідно до рівняння

$$U'_{\beta} = 100 \frac{|\beta_{i-1} - \beta_i|}{\beta_i}, \quad (31)$$

де β_i – i -те значення відносного діаметра; β_{i-1} – $i-1$ -ше значення відносного діаметра.

Якщо значення методичної невизначеності U'_{β} перевищує значення $U'_{\beta} > 10^{-3}$, то уточнюють значення коефіцієнтів E_2 , C_2 , $K_{ш2}$, $K_{п2}$ та ε_2 , за якими розраховують значення відносного отвору β_2 за рівнянням (31). Уточнення значення відносного отвору β пристрою звуження потоку

здійснюють до того часу, доки значення методичної невизначеності $U'_{мр}$ не перевищуватиме значення $U'_{мр} \leq 10^{-3}$.

Розраховують значення діаметра d_{20} отвору або горловини пристрою звуження потоку за температури $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ за формулою

$$d_{20} = \frac{\beta \cdot D}{1 + \alpha_{td} \cdot (t - 20)}. \quad (32)$$

Розраховане значення діаметра d_{20} отвору або горловини пристрою звуження потоку за температури $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ і буде параметром пристрою звуження потоку, яке було розраховане за заданою максимальною втратою тиску на ньому.

Висновки. У цій роботі наведені нові аналітичні залежності для розрахунку поправкового коефіцієнта на шорсткість внутрішньої поверхні трубопроводу для діафрагми та рівняння для визначення втрат тиску на пристрої звуження потоку. Розроблена методика розрахунку параметра пристрою звуження потоку за заданою максимальною втратою тиску на ньому дасть можливість застосовувати пристрої звуження потоку витратомірів змінного перепаду тиску у технологічних процесах, які накладають вимоги на втрати тиску.

1. ISO 5167-2:2003. *Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full - Part 2: orifice plates.* 2. ISO 5167-3:2003. *Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full - Part 3: Nozzles and Venturi nozzles.* 3. ISO 5167-4:2003. *Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full - Part 4: Venturi tubes.* 4. РД 50-213 – 80. *Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами.* – М., 1982. 5. ГОСТ 8.563.2 – 97 ГСИ. *Измерение расхода и количества жидкостей и газов методом переменного перепада давления. Методика выполнения измерений с помощью сужающих устройств.* 6. Urner G. *Pressure loss of orifice plates according to ISO 5167. Flow Measurement and Instrumentation*, 8, March 1997. – Pp. 39–41. 7. Идельчик И.Е. *Справочник по гидравлическим сопротивлениям /Под ред. М.О. Штейнберга.* – 3-е изд., перераб. и доп. – М., 1992. 8. VDI 2040, Blatt 1.1971. *Berechnungsgrundlagen für die Durchflüßzahlen mit Drosselgeräten. Durchflüßzahlen und Expansionszahlen genormter Drosselgeräte und Abweichungen von den Normvorschriften.* – 1972. – P. 30. 9. ГОСТ 8.563.1-97. *Диафрагмы, сопла ИСА 1932 и трубы Вентури, установленные в заполненных трубопроводах круглого сечения.* – К., 2001.