

МЕТОДИ І ПРИЛАДИ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ РІДКОЇ ТА ГАЗОПОДІБНОЇ ФАЗ

УДК 681.121

ВИЗНАЧЕННЯ ПОПРАВНОГО МНОЖНИКА НА ШОРСТКІСТЬ ТРУБОПРОВОДУ ПРИ ВИМІРЮВАННІ ВИТРАТИ ТЕПЛОНОСІЇВ

© Лесовий Л. В., Химко О. М., 2000

Національний університет "Львівська політехніка"

Приведені результати порівняльного аналізу методик розрахунку поправного множника на шорсткість внутрішньої поверхні трубопроводу при вимірюванні витрати за методом змінного перепаду тиску за допомогою сопла, приведені нова математична модель та похибки визначення цього множника.

При використанні методу змінного перепаду тиску для вимірювання витрати та кількості теплоносіїв, до яких відносяться гаряча вода, волога водяна пара, суха насичена пара та перегріта пара однією з основних задач є підвищення точності вимірювання, що можна зробити таким чином:

1) підвищити точність засобів вимірювання перепаду тиску, тиску, температури та, у випадку застосування густиноміра, ще й густини середовища;

2) застосовувати обчислювачі витрати та кількості теплоносіїв, які побудовані на базі мікропроцесорних систем;

3) застосовувати стандартні пристрої звуження потоку, які є оптимальними за точністю вимірювання витрати та кількості теплоносіїв;

4) застосовувати більш точні методики визначення поправних коефіцієнтів, що входять у рівняння витрати та кількості теплоносіїв.

Оскільки на сьогоднішній день вже існують засоби вимірювання перепаду тиску, тиску і температури з класом точності 0,075 і вище, а також при вимірюванні витрати та кількості теплоносіїв застосовуються обчислювачі, які побудовані на базі мікропроцесорних систем, то постає задача розрахунку стандартних пристроїв звуження потоку, що мають мінімальну похибку вимірювання витрати від впливу поправних коефіцієнтів.

Масова витрата Q_m теплоносіїв визначається за рівнянням

для гарячої води

$$Q_m = \frac{\pi}{4} \cdot d_{20}^2 \cdot K_{id}^2 \cdot C \cdot E \cdot k_{ш} \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta t \cdot \rho}; \quad (1)$$

для вологої водяної, сухої насиченої та перегрітої пари

$$Q_m = \frac{\pi}{4} \cdot d_{20}^2 \cdot K_{id}^2 \cdot C \cdot E \cdot k_{ш} \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta t \cdot \rho}, \quad (2)$$

де d_{20} - діаметр отвору стандартного пристрою звуження потоку, K_{id} - поправний множник на теплове розширення матеріалу стандартного пристрою звуження потоку, C - коефіцієнт витікання, E - коефіцієнт швидкості входу, $k_{ш}$ - поправний множник на шорсткість внутрішньої поверхні вимірюваного трубопроводу, ΔP - перепад тиску на стандартному пристрої звуження потоку, ρ - густина теплоносія.

Наявність шорстких внутрішніх стінок трубопроводів приводить до спотворення розподілу швидкості теплоенергоносія по їх перерізу. Корекція впливу шорсткості внутрішньої поверхні трубопроводу з врахуванням значення коефіцієнта витікання стандартного пристрою звуження потоку здійснюється за допомогою поправного множника $k_{ш}$.

При вимірюванні витрати та кількості теплоносіїв слід застосовувати як стандартний пристрій звуження потоку сопло тому, що на ньому безповоротні втрати тиску P_{BT} змінюються від $0,15 \cdot \Delta P$ до $0,9 \cdot \Delta P$ (на відміну від них на діафрагмі втрати тиску становлять від $0,4 \cdot \Delta P$ до $0,95 \cdot \Delta P$).

Розглянемо методики визначення поправного множника на шорсткість внутрішньої поверхні трубопроводу для сопла та сопла Вентурі.

На даний час існують дві нормовані методики розрахунку поправного множника на шорсткість внутрішньої поверхні трубопроводу. Згідно з першою методикою, наведеною в [2], поправний множник розраховується за таким рівнянням:

$$k_{ш} = \begin{cases} 1 & \text{для } m < 0,27; \\ 1,002 - 0,0318m + 0,0907m^2 - \\ - (0,0062 - 0,1017m + 0,2972m^2)D & \text{для } m \geq 0,27, \end{cases} \quad (3)$$

де m - відносна площа діафрагми, D - внутрішній діаметр трубопроводу при робочих умовах.

Поправний множник $k_{ш}$ приймають рівним одиниці, якщо відносна шорсткість відповідає вимо-

гам

$$10^4 \frac{\overline{\Delta_{iu}}}{D} \leq \begin{cases} 25 & \text{для } m \leq 0,09; \\ 2375m - 1817,5\sqrt{m} + 356,5 & \text{для } 0,09 < m \leq 0,13; \\ 3,9 + 1000 \exp(-14,2\sqrt{m}) & \text{для } m > 0,13, \end{cases} \quad (4)$$

де $\overline{\Delta_{iu}}$ - абсолютна шорсткість трубопроводу.

Згідно з другою методикою, наведеною в [3], внутрішню поверхню вимірюваної ділянки трубопроводу вважають гладкою, а поправний множник на зміну шорсткості трубопроводу рівним одиниці ($k_{iu} = 1$), якщо відношення середньої абсолютної шорсткості $\overline{\Delta_{iu}}$ внутрішньої поверхні до значення внутрішнього діаметра цього трубопроводу на відстані $2D$ перед стандартним пристроєм звуження потоку не перевищує значень, які розраховані із такої умови:

$$10^4 \frac{\overline{\Delta_{iu}}}{D} \leq 10 \left[\frac{1}{10\beta^4 + 5} \right]^{1/9}, \quad (5)$$

де $\beta^2 = m$.

Тут поправний множник k_{iu} визначають з врахуванням наступного [3]:

$$k_{iu} = \begin{cases} 1 & \text{для } Re < 10^4 \\ 1 + \beta^4 \frac{r_0}{100} \left(1 - \frac{(\lg Re - 6)^2}{4} \right) & \text{для } 10^4 \leq Re < 10^6 \\ 1 + \beta^4 \frac{r_0}{100} & \text{для } Re \geq 10^6. \end{cases} \quad (6)$$

Коефіцієнт r_0 розраховують за формулою:

$$r_0 = 4,5 \cdot \lg(A_{iu}) - 2,5, \quad (7)$$

де $A_{iu} = 10^4 \cdot \overline{\Delta_{iu}} / D$.

Залежність для поправного множника у [3] порівняно із залежністю в [2] враховує не тільки вплив відносної площі, а й числа Рейнольдса і абсолютної

шорсткості: згідно [2] $k_{iu} = f(m)$; згідно [3] $k_{iu} = f(m, Re, \overline{\Delta_{iu}})$, що дозволяє згідно з даними німецьких вчених [4] більш точно проводити корекцію на шорсткість трубопроводу.

Слід відзначити, що в німецьких нормах [4] окрім залежностей типу (6) і (7) наведено таблиці експериментальних значень коефіцієнта r_0 як функції від відносної шорсткості трубопроводу. Як показав виконаний нами аналіз, між цими експериментальними значеннями r_0 та значеннями r_0 , розрахованими за (7), має місце достатньо велика різниця. Результати розрахунку максимальної відносної похибки δ_{r_0} визначення значення r_0 наведені в табл. 1.

Похибка δ_{r_0} розраховувалась за такою формулою:

$$\delta_{r_0} = 100 \cdot \left(\frac{r_0 - r_{0\text{експ}}}{r_{0\text{експ}}} \right), \quad (8)$$

де $r_{0\text{експ}}$ - експериментальні дані. Як видно із отриманих даних, ця похибка може досягати 31 %.

Згідно з розробленою нами методикою поправний множник k_{iu} на шорсткість внутрішньої поверхні трубопроводу розраховується за рівнянням (6) для умов

$$10^4 \cdot \frac{\overline{\Delta_{iu}}}{D} \geq 2,8835465 + \frac{1,3781788}{\beta^2} - \frac{0,3221745}{\beta^4} + \frac{0,0580617}{\beta^6} - \frac{0,001091}{\beta^8}. \quad (9)$$

Для підвищення точності визначення k_{iu} нами була також отримана аналітична залежність для визначення r_0 , яка має відносну похибку δ_{r_0} меншу за 5,5 %:

$$r_0 = -4,78936 + 21,4444 \cdot \lg(A_{iu}) - 44,8695 \cdot \lg(A_{iu})^2 + 54,1489 \cdot \lg(A_{iu})^3 - 31,0595 \cdot \lg(A_{iu})^4 + 6,9693 \cdot \lg(A_{iu})^5. \quad (10)$$

Таблиця 1 - Значення коефіцієнта r_0 та поправного множника k_{iu} на шорсткість внутрішньої поверхні трубопроводу для сопел.

$\frac{\overline{\Delta_{iu}}}{D} \cdot 10^4$	r_0 (10)	r_0 (7)	$r_{0\text{експ}}$ [4]	δ_{r_0} (10) %	δ_{r_0} (7) %	k_{iu1} для $m = 0,2$	k_{iu2} для $m = 0,2$	$k_{iu\text{експ}}$ для $m = 0,2$	k_{iu1} для $m = 0,64$	k_{iu2} для $m = 0,64$	$k_{iu\text{експ}}$ для $m = 0,64$
5	0,51859	0,64537	0,5	3,72	29,07	1,00000	1,00000	1,00000	1,00212	1,00264	1,00205
6	0,84281	1,00168	0,8	5,35	25,21	1,00000	1,00000	1,00000	1,00345	1,00410	1,00328
7	1,13176	1,30294	1,1	2,89	18,45	1,00000	1,00052	1,00000	1,00464	1,00534	1,00451
8	1,39210	1,56391	1,4	-0,56	11,71	1,00000	1,00063	1,00000	1,00570	1,00641	1,00573
9	1,62837	1,79409	1,6	1,77	12,13	1,00065	1,00072	1,00067	1,00667	1,00735	1,00655
10	1,84424	2,00000	1,9	-2,93	5,26	1,00074	1,00080	1,00076	1,00755	1,00819	1,00778
20	3,39760	3,35464	3,3	2,96	1,66	1,00136	1,00134	1,00139	1,01392	1,01374	1,01352
30	4,64906	4,14705	4,6	1,07	-9,85	1,00186	1,00166	1,00190	1,01904	1,01699	1,01884
40	6,00385	4,70927	6,0	0,06	-21,51	1,00240	1,00188	1,00246	1,02459	1,01929	1,02458
50	7,54930	5,14537	7,5	0,66	-31,4	1,00302	1,00206	1,00310	1,03092	1,02108	1,03072

Відносна похибка визначення r_0 за формулою (10) для експериментальних даних [4] також наведена в табл. 1 і вона у всіх точках приймає менші значення порівняно із відносною похибкою визначення r_0 згідно (7). В цій же таблиці наведені значення поправного множника $k_{ш}$ для двох різних значень

відносної площі m сопла.

Графік на рис. 1 ілюструє розбіжність значень коефіцієнта r_0 , які отримані за допомогою апроксимаційних залежностей згідно (10) та (7) і експериментальними даними [4].

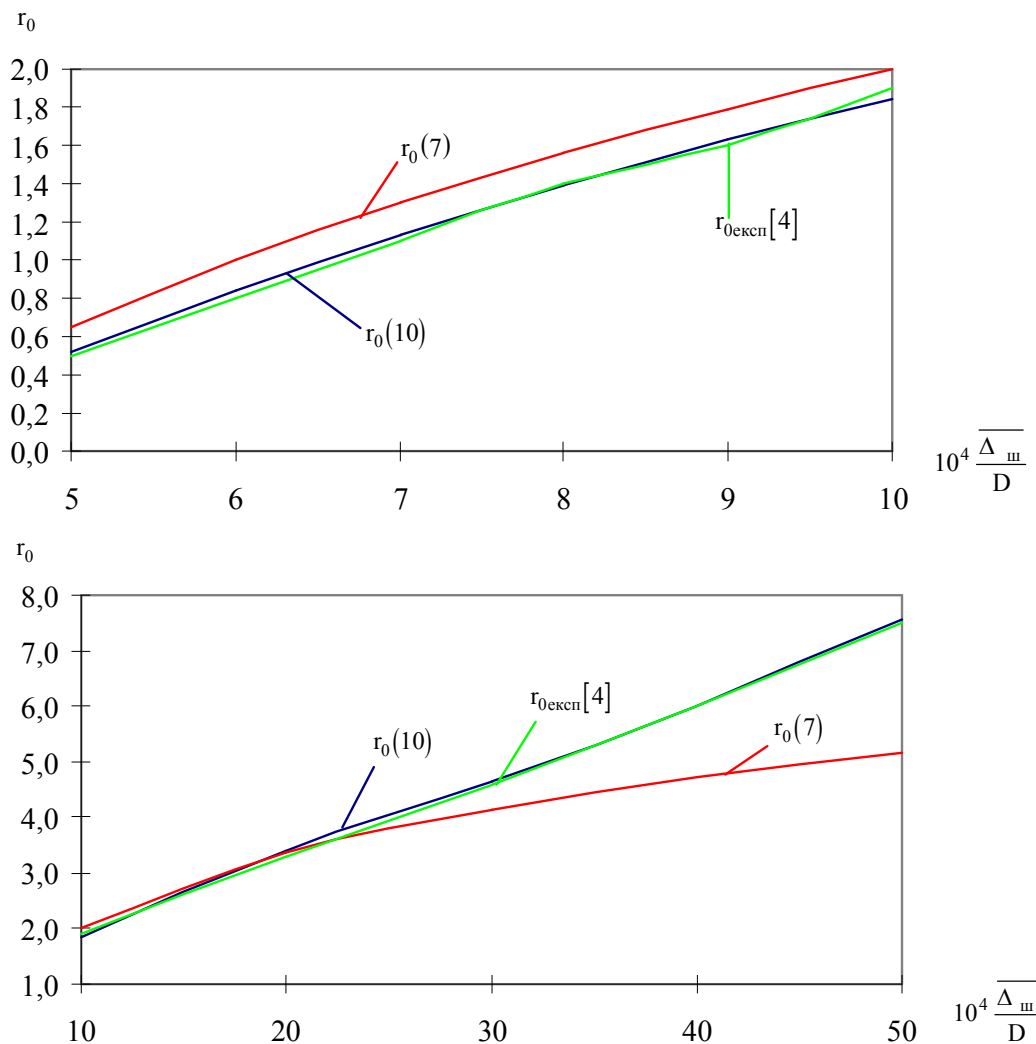


Рис. 1. Залежність коефіцієнта r_0 від відносної шорсткості.

Як видно з рис. 1 апроксимаційна залежність для визначення r_0 за рівнянням (10) дає менші відхилення від експериментальних даних порівняно із методикою [3].

Прослідкуємо, як відхилення коефіцієнта r_0 впливають на поправний множник $k_{ш}$. Для порівняння розрахуємо $k_{ш}$ для умов, коли він не рівний одиниці (для числа Рейнольдса $Re > 10^6$) для значень відносної площі $m = 0,2$ та $m = 0,64$. Розраховані значення наведені у табл. 1, де $k_{ш1}$ - це значення

поправного множника на шорсткість, розрахованого за рівнянням (6), у якому значення коефіцієнта r_0 знайдене з рівняння (10); $k_{ш2}$ - розраховане за методикою, наведеною в [3]; $k_{ш.експ.}$ - розраховане за експериментальними даними [4].

В табл. 2 додатково наведена відносна похибка $\delta_{k_{ш}}$ визначення поправного множника на шорсткість внутрішньої поверхні трубопроводу для сопел, яка розраховується за рівнянням

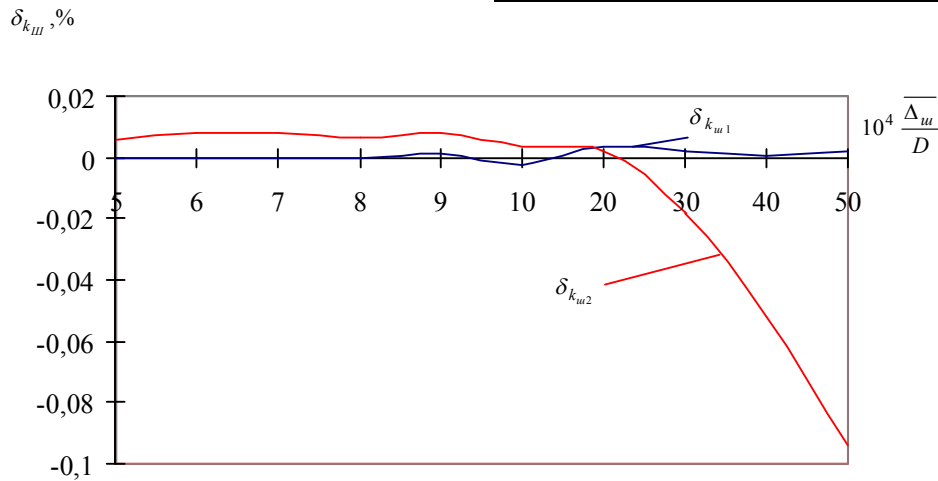
$$\delta_{k_{ui}} = 100 \cdot \left(\frac{k_{ui} - k_{ui.експ.}}{k_{ui.експ.}} \right). \quad (11)$$

Як видно з табл. 2 для значень відносної площі $m = 0,2$ похибка $\delta_{k_{ui}}$ має невеликі значення (максимальне $\delta_{k_{ui}} = 0,09\%$), а для $m = 0,64$ похибка $\delta_{k_{ui}}$ приймає значення більші за $0,9\%$. Цілком очевидно, що така різниця в розрахунках поправного множника безпосередньо приводить до різних розрахованих значень витрати, а, відповідно, і до появи похибки визначення витрати.

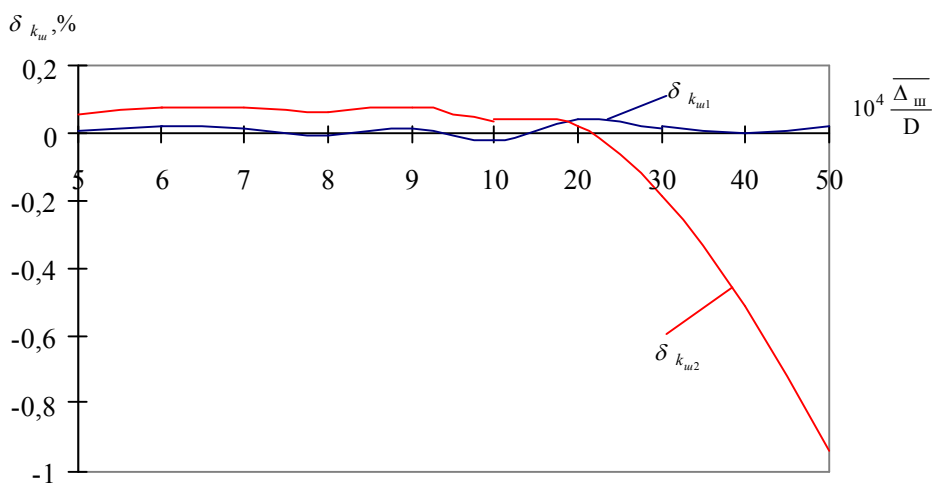
На рис. 2 наведена відносна похибка $\delta_{k_{ui}}$ розрахунку поправного множника k_{ui} на шорсткість внутрішньої поверхні трубопроводу для сопел, де значення коефіцієнта r_0 розраховане за рівнянням (10) ($\delta_{k_{ui1}}$), та методикою наведеною у [3] ($\delta_{k_{ui2}}$).

Таблиця 2 - Відносна похибка $\delta_{k_{ui}}$ визначення поправного множника на шорсткість внутрішньої поверхні трубопроводу для сопел.

$\frac{\overline{\Delta_{ui}}}{D} \cdot 10^4$	$\delta_{k_{ui1}}$ для $m = 0,2$ %	$\delta_{k_{ui2}}$ для $m = 0,2$ %	$\delta_{k_{ui1}}$ для $m = 0,64$ %	$\delta_{k_{ui2}}$ для $m = 0,64$ %
5	0,0000	0,0058	0,0076	0,0594
6	0,0000	0,0081	0,0175	0,0823
7	0,0000	0,0081	0,0129	0,0828
8	0,0000	0,0066	-0,0032	0,0668
9	0,0011	0,0078	0,0115	0,0790
10	-0,0022	0,0040	-0,0227	0,0406
20	0,0039	0,0022	0,0394	0,0221
30	0,0020	-0,0181	0,0197	-0,1821
40	0,0002	-0,0515	0,0015	-0,5160
50	0,0020	-0,0939	0,0196	-0,9357



а)



б)

Рис. 2. Залежність відносної похибки $\delta_{k_{ui}}$ визначення поправного множника k_{ui} від відносної шорсткості для відносної площі.

Виконаний аналіз показав, що запропонована нами методика розрахунку поправного множника $k_{ш}$ у порівнянні із методикою нормативного документу [3] зменшує систематичну складову похибки визначення витрати та кількості теплоносіїв.

1. ISO 5167. *Measurement of fluid flow by means of orifice plates, nozzles and venturi tubes inserted in circular cross-section conduits running full. 1st edition, 1980.* - 65 p. 2. РД50-213-80. *Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающи-*

ми устройствами. - М.: Изд-во стандартов, 1982. - 320 с.. 3. ГОСТ 8.563.1-97. *Диафрагмы, сопла ИСА 1932 и трубы Вентури, установленные в заполненных трубопроводах круглого сечения.* - М.: Изд-во стандартов, 1997. 4. VDI 2040. *Berechnungsgrundlagen für die Durchflußzahlen mit Drosselgeräten. Durchflußzahlen und Expansionszahlen genormter Drosselgeräte und Abweichungen von den Normvorschriften.* - Blatt 1, 1971.