

СТРУКТУРА ТА АЛГОРИТМИ РОЗРАХУНКУ І ПРОЕКТУВАННЯ ВИТРАТОМІРІВ ЗМІННОГО ПЕРЕПАДУ ТИСКУ НА БАЗІ КОМПЛЕКСУ СТАНДАРТІВ ГОСТ 8.586.1,2,3,4,5-2005

© Є.П. Пістун, Л.В. Лесовой, Д.І. Марковський, А.П. Карпенко, 2006

Викладено структуру та основні алгоритми системи автоматизованого розрахунку та проектування витратомірів змінного перепаду тиску на базі нового комплексу міждержавних стандартів. Розглянуто варіанти розрахунку таких витратомірів.

The structure and main algorithms of new differential pressure flowmeters calculating and designing automated system on basis of new interstate standards set are defined in this article. Possible ways of such flowmeters calculation are indicated here.

Постановка проблеми. На сьогодні основним нормативним документом, який застосовують для вимірювання витрати середовища за методом змінного перепаду тиску у країнах Західної Європи, є міжнародний стандарт ISO 5167-1,2,3,4:2003 [1,2,3,4]. В Україні ж ще діють нормативні документи РД 50-213-80 [5] зі змінами до них [6] та ГОСТ 8.563.1,2,3-97 [7,8,9].

Національним університетом “Львівська політехніка”, державним підприємством Всеукраїнський державний науково-виробничий центр стандартизації, метрології, сертифікації та захисту прав споживачів Держспоживстандарту України (Укрметртестстандарт), з українського боку, та Галузевим метрологічним центром “Газметрологія” (ОМЦ “Газметрологія”), Всеросійським науково-дослідним інститутом витратометрії (ВНИИР), з російського боку, у 2005 році розроблено новий комплекс міждержавних стандартів, що унормовує вимірювання витрати плинних середовищ за методом змінного перепаду тиску. Цей комплекс вже прийнятий Євразійською радою з стандартизації, метрології та сертифікації і йому присвоєний номер ГОСТ 8.586.1,2,3,4,5-2005, оскільки він складається із п’яти окремих документів. Новий комплекс міждержавних стандартів хоча і повторює міжнародний стандарт ISO 5167-1,2,3,4:2003, але розширяє сферу його застосування та доповнює його методикою виконання вимірювань. Оскільки в новому комплексі міждержавних стандартів змінені порівняно з чинними стандартами коефіцієнти рівняння витрати і їх невизначеності, вимоги до прямолінійних ділянок вимірювального трубопроводу тощо, то чинні на сьогодні програми розрахунку витратомірів змінного перепаду тиску втрачають силу і виникає гостра потреба у розробленні алгоритмів та програми розрахунку витратомірів змінного перепаду тиску.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. До прийняття комплексу міждержавних стандартів в Україні були чинними низка стандартних програм для розрахунку витратомірів змінного перепаду тиску на ПЕОМ, а саме: “Расходомер-1М” [11], “Расход – НП” [12], “GAZ-RR” [12] та інші. У Росії після впровадження ГОСТ 8.563.1,2,3-97 [7,8,9] розроблені свої програми розрахунку витратомірів змінного перепаду тиску, але вони не набули широкого застосування. Алгоритми цих програм були підпорядковані математичним моделям, чинних на той час нормативних документів.

Формулювання цілі статті. Метою роботи є сформулювати основні засади побудови нової системи автоматизованого розрахунку та проектування витратомірів змінного перепаду тиску на базі нового комплексу міждержавних стандартів ГОСТ 8.586.1,2,3,4,5-2005, розробити алгоритм та структуру цієї системи.

Виклад основного матеріалу. Побудова системи автоматизованого розрахунку та проектування витратомірів змінного перепаду тиску повинна базуватись на новому комплексі міждержавних стандартів ГОСТ 8.586.1,2,3,4,5-2005 та відповідати математичним моделям, що

наведені в цьому комплексі стандартів, зокрема повній моделі витратоміра, наведеної в ГОСТ 8.586.5-2005 “Методика виконання вимірювань” з врахуванням всіх обмежень, розглянутих в інших частинах комплексу міждержавних стандартів. Нами розроблена структура цієї системи автоматизованого розрахунку та проектування витратомірів змінного перепаду тиску.

Відповідно до запропонованої структури система автоматизованого розрахунку та проектування витратомірів змінного перепаду тиску повинна розв’язувати такі задачі:

- розрахунок параметрів пристрою звуження потоку та проектування витратомірів змінного перепаду тиску під задану верхню границю вимірювання перепаду тиску на пристрої звуження потоку;

- розрахунок параметрів пристрою звуження потоку та проектування витратомірів змінного перепаду тиску під задане значення максимальної втрати тиску на пристрої звуження потоку;

- розрахунок параметрів пристрою звуження потоку та проектування витратомірів змінного перепаду тиску, оптимальних за точністю вимірювання витрати та кількості вимірюваного середовища;

- визначення витрати за заданими параметрами пристрою звуження потоку (зворотний розрахунок параметрів пристрою звуження потоку).

Повна модель витратоміра змінного перепаду тиску із пристроєм звуження потоку, на базі якої будується система автоматизованого розрахунку та проектування витратомірів змінного перепаду тиску, складається із системи таких рівнянь:

- рівняння масової витрати середовища q_m або об’ємної витрати середовища q_o при робочих умовах або об’ємної витрати середовища q_c , приведені до стандартних умов;

- рівняння фізичних властивостей середовища – густини ρ (для рідин та водяної пари), густини ρ_c при стандартних умовах (для сумішей газів з відомим повним складом), коефіцієнта стискуваності K та показника адиабати κ (для газу та пари), динамічної в’язкості μ середовища;

- рівняння коефіцієнтів $K_{зп}$ та K_T , що враховують відповідно зміну діаметра отвору або горловини пристрою звуження потоку та діаметра трубопроводу, зумовлену відхиленням температури середовища від 20 °С;

- рівняння діаметра отвору або горловини пристрою звуження потоку d ;

- рівняння внутрішнього діаметра вимірювального трубопроводу D ;

- рівняння відносного діаметра пристрою звуження потоку β ;

- рівняння визначення числа Рейнольдса Re ;

- рівняння коефіцієнта витікання C ;

- рівняння коефіцієнта швидкості входу E ;

- рівняння поправкового коефіцієнта на шорсткість внутрішньої поверхні трубопроводу $K_{ш}$;

- рівняння поправкового коефіцієнта притуплення вхідного канту діафрагми K_n ;

- рівняння коефіцієнта розширення середовища ϵ ;

- рівняння коефіцієнта гідравлічного опору пристрою звуження потоку ξ ;

- рівняння невизначеності коефіцієнта витікання u'_c ;

- рівняння невизначеності поправкового коефіцієнта на шорсткість внутрішньої поверхні трубопроводу $u'_{кш}$;

- рівняння невизначеності поправкового коефіцієнта на притуплення вхідного канту діафрагми u'_{Kn} ;

- рівняння невизначеності коефіцієнта розширення середовища u'_ϵ ;

- рівняння невизначеності результату вимірювання діаметра отвору або горловини пристрою звуження потоку u'_d ;

- рівняння невизначеності результату вимірювання внутрішнього діаметра трубопроводу u'_D ;

- рівняння невизначеності результату вимірювання перепаду тиску $u'_{\Delta p}$;

- рівняння невизначеності густини середовища в робочих умовах u'_ρ ;

- рівняння невизначеності густини середовища за стандартних умов u'_{ρ_c} ;

- рівняння невизначеності витрати середовища u'_q .

Всі перелічені рівняння, крім рівнянь фізичних властивостей середовища, унормовані в новому комплексі міждержавних стандартів ГОСТ 8.586.1,2,3,4,5-2005. Отже, рівняння фізичних властивостей вимірюваного середовища також повинні бути атестовані у встановленому порядку.

Вищенаведена система рівнянь доповнюється умовами обмеження дії методу змінного перепаду тиску.

Відповідно до повної моделі витратоміра змінного перепаду тиску значення параметрів пристрою звуження потоку або значення витрати середовища пропонується розраховувати шляхом сумісного розв'язання вищевказаної системи рівнянь за допомогою процедури ітераційного наближення.

Розроблено алгоритми розрахунку параметрів пристрою звуження потоку та проектування витратомірів змінного перепаду тиску під всі чотири варіанти сформульованих вище завдань.

Суть алгоритму розрахунку параметрів пристрою звуження потоку під задану верхню границю вимірювання перепаду тиску на пристрої звуження потоку полягає у визначенні відносного діаметра β шляхом послідовного уточнення β відповідно до формули

$$\beta_{i+1} = \frac{B}{\sqrt{C_i E_i K_{шi} K_{пi} \varepsilon_i} \sqrt{\frac{\Delta p}{p}}}, \quad (1)$$

де C_i – коефіцієнт витікання на i -му кроці ітерації; E_i – коефіцієнт швидкості входу на i -му кроці ітерації; $K_{шi}$ – поправковий коефіцієнт на шорсткість внутрішньої поверхні трубопроводу на i -му кроці ітерації; $K_{пi}$ – поправковий коефіцієнт притуплення вхідного канту діафрагми на i -му кроці ітерації; ε_i – коефіцієнт розширення середовища на i -му кроці ітерації; B – безрозмірний комплекс, який визначається за рівнянням

– для масової витрати

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

– для об'ємної витрати, приведені до стандартних умов

$$B = \sqrt{\frac{4q_{c\max} \rho_c}{\pi D^2 \sqrt{2\rho\rho}}}, \quad (3)$$

в якому $q_{m\max}$ та $q_{c\max}$ – максимальне значення відповідно масової витрати та об'ємної витрати середовища, приведені до стандартних умов. Початкове значення β_0 розраховують за рівнянням

$$\beta_0 = \frac{\beta_{\min} + \beta_{\max}}{2}, \quad (4)$$

де β_{\min} та β_{\max} – відповідно допустимі мінімальне та максимальне значення пристрою звуження потоку.

Вихід із цього циклу пропонується виконувати так. Якщо виконується умова

$$\frac{|\beta_i - \beta_{i+1}|}{\beta_{i+1}} \leq 10^{-5}, \quad (5)$$

то розрахунок відносного діаметра закінчують, а значення відносного діаметра приймають за остаточне. Якщо ж умова (5) не виконується, то уточнюють значення C , E , $K_{ш}$, $K_{п}$ та ε , за якими визначають наступне значення відносного діаметра β .

При розрахунку параметрів пристрою звуження потоку під задане значення максимальної втрати тиску $\Delta\varpi_{\max}$ на пристрої звуження потоку визначають допоміжну величину $V_{\Delta\varpi}$ за рівнянням

$$V_{\Delta\varpi} = V \left(\frac{P}{\Delta\varpi_{\max}} \right)^4, \quad (6)$$

Початкове значення Δp_0 вибирають таким, що дорівнює значенню максимальної втрати тиску $\Delta\varpi_{\max}$ на пристрої звуження потоку. За значенням $V_{\Delta\varpi}$ та початковим значенням β_0 , визначеним за рівнянням (4), розраховують перепад тиску Δp_1 на пристрої звуження потоку

– для діафрагми, сопла ISA1932 і еліпсного сопла за рівнянням

$$\Delta p_1 = \left(1 + \frac{2}{\sqrt{\xi_0}} \right) \cdot \Delta\varpi, \quad (7)$$

– для сопла Вентурі і труби Вентурі за рівнянням

$$\Delta p_1 = \frac{1}{\xi_0 C_0^2 E_0^2} \Delta\varpi, \quad (8)$$

де значення коефіцієнта гідравлічного опору пристрою звуження потоку ξ_0 залежить від пристрою звуження потоку та визначають за рівняннями, наведеними в ГОСТ 8.586.2,3,4-2005.

Потім розраховують коефіцієнт розширення ε_0 (для рідких середовищ $\varepsilon_0=1$) та уточнюють відносний діаметр β_1 пристрою звуження потоку

– для діафрагми, сопла ISA1932 і еліпсного сопла за рівнянням

$$\beta_1 = \frac{V_{\Delta\varpi}}{\sqrt{\sqrt{1 + \frac{2}{\sqrt{\xi_0}} C_0 E_0 K_{ш0} K_{п0} \varepsilon_0}}}, \quad (9)$$

– для сопла Вентурі і труби Вентурі за рівнянням

$$\beta_1 = V_{\Delta\varpi} \sqrt{\frac{\sqrt{\xi_0}}{K_{ш0} \varepsilon_0}}. \quad (10)$$

Вихід із цього циклу пропонується виконувати так. Якщо виконується умова

$$\frac{|\Delta p_i - \Delta p_{i+1}|}{\Delta p_{i+1}} \leq 10^{-3}, \quad (11)$$

то розрахунок перепаду тиску Δp закінчують, а значення Δp_{i+1} приймають за остаточне. Якщо ж умова (11) не виконується, то за значенням β_{i+1} уточнюють значення C , E , $K_{ш}$, $K_{п}$ та ξ , за якими розраховують наступне значення перепаду тиску Δp .

Визначивши за значенням перепаду тиску Δp на пристрої звуження потоку верхню границю вимірювання перепаду тиску дифманометра $\Delta p_{гр}$, як менше значення із ряду чисел $1; 1,6; 2,5; 4; 6,3 \cdot 10^n$ ($n=2 \div 5$), подальший розрахунок здійснюють аналогічно до розрахунку параметрів пристрою звуження потоку під задану верхню границю вимірювання перепаду тиску дифманометра, прийнявши початкове значення відносного діаметра як останнє значення β_{i+1} розрахованого за рівнянням (11).

Суть методу розрахунку параметрів пристрою звуження потоку витратомірів змінного перепаду тиску, оптимальних за точністю вимірювання витрати вимірюваного середовища полягає у визначенні діапазону зміни (Δp_{\min} та Δp_{\max}) перепаду тиску на пристрої звуження потоку шляхом послідовного уточнення Δp_{\min} та Δp_{\max} відповідно до формул

$$\Delta p_{\min i+1} = \frac{pB^4}{\left[\beta_{\max i}^2 \cdot C(\beta_{\max i}) \cdot E(\beta_{\max i}) \cdot K_{ш}(\beta_{\max i}) \cdot K_{п}(\beta_{\max i}) \cdot \varepsilon(\beta_{\max i}) \right]^2}; \quad (12)$$

$$\Delta p_{\min i+1} = \frac{pB^4}{\left[\beta_{\min i}^2 \cdot C(\beta_{\min i}) \cdot E(\beta_{\min i}) \cdot K_{ш}(\beta_{\min i}) \cdot K_{п}(\beta_{\min i}) \cdot \varepsilon(\beta_{\min i}) \right]^2}, \quad (13)$$

де $\beta_{\min i}$ та $\beta_{\max i}$ – відповідно мінімально та максимально допустимі значення відносного діаметра пристрою звуження потоку на i -му кроці ітерації.

За значеннями Δp_{\min} та Δp_{\max} визначають відповідно мінімальну верхню границю вимірювання перепаду тиску дифманометра $\Delta p_{\min гр}$, як більше значення із ряду чисел 1;1,6;2,5;4;6,3·10ⁿ (n=2÷5), та максимальну верхню границю вимірювання перепаду тиску дифманометра $\Delta p_{\max гр}$, як менше значення із того самого ряду чисел.

Потім для кожного значення верхньої границі вимірювання перепаду тиску дифманометра $\Delta p_{гр i} \in [\Delta p_{\min гр}; \Delta p_{\max гр}]$ здійснюють розрахунок параметрів пристрою звуження потоку під задану верхню границю вимірювання перепаду тиску дифманометра $\Delta p_{гр i}$ згідно з описаним вище алгоритмом та розрахунок невизначеності результату вимірювання витрати u'_{qi} за рівнянням, наведеним в ГОСТ 8.586.5-2005. Значення d_{20i} , β_i та $\Delta p_{гр i}$ для мінімальної невизначеності $u'_{q\min}$ результату вимірювання витрати і будуть шуканими значеннями d_{20opt} , β_{opt} та $\Delta p_{гр opt}$, при якому досягається найбільша точність вимірювання витрати.

Під час визначення витрати за заданими параметрами пристрою звуження потоку необхідно під заданий діаметр отвору або горловини пристрою звуження потоку та для верхньої границі перепаду тиску дифманометра розрахувати максимальне значення витрати середовища. Витрату середовища розраховують шляхом ітерації за рівнянням

$$q_{i+1} = B_q C(Re_i) K_{ш}(Re_i), \quad (14)$$

де Re_i – число Рейнольдса на i -му кроці ітерації, яке розраховують за рівнянням

– для масової витрати середовища

$$Re_i = \frac{4 q_{mi}}{\pi \mu D}; \quad (15)$$

– для об'ємної витрати середовища за робочих умов (абсолютному тиску p та термодинамічній температурі T)

$$Re_i = \frac{4 q_{oi} p}{\pi \mu D}; \quad (16)$$

– для об'ємної витрати середовища, приведеної до стандартних умов,

$$Re_i = \frac{4 q_{ci} \rho_c}{\pi \mu D}. \quad (17)$$

Початкове значення числа Рейнольдса приймають таким, що дорівнює $Re_0 = 10^6$; B_q – допоміжна величина, яка розраховується за рівнянням

– для масової витрати середовища

$$B_q = \frac{\pi}{4} d_{20}^2 K_{3п}^2 E K_{п} \varepsilon \sqrt{2 \Delta p p}; \quad (18)$$

– для об'ємної витрати середовища за робочих умов (абсолютному тиску p та термодинамічній температурі T)

$$V_q = \frac{\pi}{4} d_{20}^2 K_{3П}^2 EK_{П} \varepsilon \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}; \quad (19)$$

– для об'ємної витрати середовища, приведені до стандартних умов,

$$V_q = \frac{\pi}{4} d_{20}^2 K_{3П}^2 EK_{П} \varepsilon \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_c}}. \quad (20)$$

Вихід із цього циклу пропонується виконувати так. Якщо виконується умова

$$\frac{|q_i - q_{i+1}|}{q_{i+1}} \leq 10^{-5}, \quad (21)$$

то розрахунок витрати середовища закінчують. Якщо ж умова (21) не виконується, то за значенням витрати q_{i+1} уточнюють значення Re , C та $K_{ш}$, за якими розраховують наступне значення витрати q .

Розроблено алгоритм розрахунку мінімальних довжин прямолінійних ділянок до i після пристрою звуження потоку. Варто зазначити, що розроблений алгоритм дає змогу не тільки проектувати прямолінійні ділянки вимірювального трубопроводу для розрахованого витратомірного вузла, але і аналізувати на відповідність вимогам нового комплексу стандартів існуючі довжини прямолінійних ділянок. При цьому, за умови часткової чи повної невідповідності конфігурації прямолінійних ділянок витратомірного вузла вимогам комплексу міждержавних стандартів, розраховується додаткова невизначеність коефіцієнта витікання або здійснюється попередження про неможливість подальшого розрахунку.

Потрібно додати, що алгоритм розрахунку параметрів прямолінійних ділянок вимірювального трубопроводу також розраховує місце розташування первинного перетворювача температури.

На базі запропонованих алгоритмів розроблена система автоматизованого розрахунку та проектування витратомірів змінного перепаду тиску.

Висновки. Система автоматизованого розрахунку і проектування витратомірів змінного перепаду тиску використовується для розрахунку відповідних витратомірних вузлів за новими алгоритмами, наведеними в комплексі міждержавних стандартів ГОСТ 8.586.1,2,3,4,5-2005, що дозволяють значно підвищити точність вимірювання витрати середовища.

1. ISO 5167-1:2003. *Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full - Part 1: general principles and requirements.* 2. 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.* 3. 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.* 4. 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.* 5. РД 50-213 – 80 *Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами.* – М.: Изд-во стандартов, 1982. 6. *Изменение №1 к РД 50-213-80 «Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами.* – М.: Изд-во стандартов, 1985. 7. ГОСТ 8.563.1 – 97 ГСИ. *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.* 8. ГОСТ 8.563.2 – 97 ГСИ. *Измерение расхода и количества жидкостей и газов методом переменного перепада давления. Методика выполнения измерений с помощью сужающих устройств.* 9. ГОСТ 8.563.3 – 97 ГСИ. *Измерение расхода и количества жидкостей и газов методом переменного перепада давления. Процедура и модуль расчетов. Программное обеспечение.* 10. Пістун Є. П., Лесовой Л. В. *Стан та особливості нормування витрати та кількості газів та рідин методом змінного перепаду тиску. Методи та прилади контролю якості, №13.* – Івано-Франківськ: Вид-во Ів.-Франківськ. держ. техн. ун-ту нафти і газу. – 2005. – С. 47–50. 11. Пістун Е.П., Крук И.С., Лесовой Л.В. *Расчет стандартных сужающих устройств расходомеров переменного перепада давления на ЭЦВМ согласно РД 50-213-80 // Измерительная техника, 1987, N 1.* – С. 36–38. 12. Пістун Є.П. *Облік та економія природного газу // Нафтова і газова промисловість.* – 2000. – N 2. – С. 43–47.