

**МЕТОД ТА АЛГОРИТМИ РОЗРАХУНКУ ПРЯМОЛІНІЙНИХ
ДІЛЯНОК ВИТРАТОМІРА ЗМІННОГО ПЕРЕПАДУ ТИСКУ
З ПРИСТРОЯМИ ПІДГОТОВКИ ПОТОКУ ТА БЕЗ НИХ
ЗГІДНО З ГОСТом 8.586.1,2,3,4,5-2005**

© Пістун, Є.П. Марковський Д.І., 2009

Викладено структуру та основні алгоритми розрахунку прямолінійних ділянок вимірювального трубопроводу витратомірів змінного перепаду тиску згідно з комплексом міждержавних стандартів ГОСТ 8.586.1,2,3,4,5-2005. Розглянуто варіанти розрахунку таких ділянок та можливості скорочення довжин цих ділянок.

The structure and main calculation algorithms for the differential pressure flowmeters straight lengths according to interstate standards are defined in this article. Possible ways of such straight lengths calculations and decreasing methods are indicated here.

Постановка проблеми. Сьогодні основним нормативним документом, в якому регламентовано вимірювання витрати газів і рідин за методом змінного перепаду тиску у країнах Західної Європи, є міжнародний стандарт ISO 5167-1,2,3,4:2003 [1,2,3,4].

У Національному університеті «Львівська політехніка», державному підприємстві “Всеукраїнський державний науково-виробничий центр стандартизації, метрології, сертифікації та захисту прав споживачів” Держспоживстандарту України (Укрметртестстандарт), з українського боку, та в Галузевому метрологічному центрі «Газметрологія» (ОМЦ «Газметрологія»), Всеросійському науково-дослідному інституті витратометрії (ВНИИР), з російського боку, у 2005 році розроблений комплекс міждержавних стандартів ГОСТ 8.586.1,2,3,4,5-2005 [5,6,7,8,9], що унормовує вимірювання витрати плинних середовищ за методом змінного перепаду тиску. Новий комплекс міждержавних стандартів ГОСТ 8.586.1,2,3,4,5-2005 хоча і повторює міжнародний стандарт ISO 5167-1,2,3,4:2003, але розширяє сферу його застосування та доповнює його методикою виконання вимірювань [9]. У цьому нормативному документі значно розширена порівняно з попередніми нормативними документами, зокрема ще чинними РД 50-213-80 [10,11] та ГОСТ 8.563.1,2,3-97 [12,13,14], сфера застосування витратомірів змінного перепаду тиску, зокрема в частині вимог щодо довжин та конфігурації прямолінійних ділянок вимірювального трубопроводу. Варто зазначити, що чинний документ значно розширив порівняно з попередніми номенклатуру типів місцевих опорів, а також став значно гнучкішим у розрахунку та виборі конфігурації прямолінійних ділянок. Останнє, своєю чергою, спричинило значне ускладнення чинного нормативного документа, що потребує додаткового роз’яснення та викладення у чіткій методології, особливо – стосовно розрахунку та вибору конфігурації прямолінійних ділянок.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. До прийняття комплексу міждержавних стандартів як на Україні, так і в Росії були чинними стандартні програми для розрахунку витратомірів змінного перепаду тиску на ПЕОМ, а саме: «Расходомер-1М», «Расходомер-2М», «Расход-НП», «GAZ-RR» та інші [15,16,17]. Із введенням в дію нових стандартів ГОСТ 8.586.1,2,3,4,5-2005 (в Росії з січня 2007 року, а на Україні – їх відповідника ДСТУ ГОСТ 8.586.1,2,3,4,5-2007 з січня 2008 року), всі ці програми втратили чинність. У зв’язку з цим в ЗАТ «Інститут енергоаудиту та обліку енергоносіїв» розроблено систему автоматизованого розрахунку та проектування витратомірів

змінного перепаду тиску САПР «РАСХОД-РУ» [18], в якій закладено методи та способи, частково викладені у цій статті.

Формулювання цілі статті. Метою роботи є висвітлити базові вимоги, що висунуті до довжин та конфігурації прямолінійних ділянок вимірювального трубопроводу згідно з новим ГОСТ 8.586.1,2,3,4,5-2005, а також сформулювати послідовність та способи розрахунку прямолінійних ділянок з можливими методами їх оптимізації в напрямку скорочення абсолютних довжин без можливого негативного впливу на точність вимірювання витрати та кількості вимірюваного середовища.

Виклад основного матеріалу. Побудова витратоміра змінного перепаду тиску повинна ґрунтуватись на вимогах нового комплексу міждержавних стандартів ГОСТ 8.586.1,2,3,4,5-2005 [5,6,7,8,9] та відповідати математичним моделям, що наведені в цьому комплексі стандартів, зокрема повній моделі витратоміра, наведеної в ГОСТ 8.586.5-2005 [9], з врахуванням всіх обмежень, розглянутих в інших частинах комплексу міждержавних стандартів.

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

- розрахунок параметрів пристрою звуження потоку та проектування витратомірів змінного перепаду тиску під задану верхню межу 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 витратоміра).

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 [19]:

- рівняння масової витрати середовища q_m або об'ємної витрати середовища q_o при робочих умовах або об'ємної витрати середовища q_c , зведеної до стандартних умов;
- рівняння фізичних властивостей середовища – густини ρ (для рідин та водяної пари), густини ρ_c за стандартних умов (для сумішей газів з відомим повним складом), коефіцієнта стискуваності K та показника адіабати k (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 $K_{п}$;
- 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 $u'_{кл}$;
- 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 $u'_{Δp}$;
- рівняння невизначеності густини середовища в робочих умовах $u'_ρ$;
- рівняння невизначеності густини середовища за стандартних умов $u'_{ρc}$;
- рівняння невизначеності витрати середовища u'_q .

Вказана система рівнянь доповнюється рівняннями численних обмежень, застережених в ГОСТ 8.586.1,2,3,4,5-2005 [5,6,7,8,9].

Довжини прямолінійних ділянок вимірювального трубопроводу, про які йдеться в цій роботі, безпосередньо впливають на невизначеність коефіцієнта витікання u'_c , а також накладають додаткові обмеження на застосування витратомірів змінного перепаду тиску. Такі додаткові обмеження можуть навіть привести до заборони застосування методу змінного перепаду тиску як такого. Нижче розглянуто вимоги, у разі невиконання яких можлива така ситуація.

Розрахунок мінімальних довжин та вибір оптимальної конфігурації прямолінійних ділянок вимірювального трубопроводу (ВТ) до і після витратоміра змінного перепаду тиску можливі за умови наявності даних, отриманих в результаті розрахунку параметрів пристрою звуження потоку (ПЗП). У цьому випадку до розгляду обрано найпоширеніший у практичному застосуванні тип ПЗП – стандартну діафрагму, що зустрічається у трьох виконаннях:

- 1) діафрагма з кутовим способом відбору тиску;
- 2) діафрагма з фланцевим способом відбору тиску;
- 3) діафрагма з трирадіусним способом відбору тиску;

Вимоги до мінімальних довжин прямолінійних ділянок ВТ для всіх вищенаведених типів діафрагми є однаковими і застосовуються до:

- довжини прямолінійної ділянки ВТ між ПЗП та першим місцевим опором (МО) догори по потоку (LMO1);
- довжини прямолінійної ділянки ВТ між першим та другим МО догори по потоку (LMO2);
- довжини прямолінійної ділянки ВТ між другим та третім МО догори по потоку (LMO3);
- довжини прямолінійної ділянки ВТ між першим МО донизу по потоку та ПЗП;

Вихідними даними для розрахунку мінімальних довжин прямолінійних ділянок ВТ є:

- 1) відносний діаметр $β$ отвору ПЗП;
- 2) внутрішній діаметр ВТ D_{20} на кожній з вимірювальних ділянок;
- 3) типи кожного з трьох МО догори по потоку відносно ПЗП.

Класифікація типів МО для ПЗП типу стандартна діафрагма здійснюється згідно з табл. 4 п. 6.2.1 та додатка А ГОСТ 8.586.2-2005 (для двох інших типів ПЗП – сопел та труб Вентурі, відповідного у частинах 3 і 4 комплексу стандартів). Для розрахунку мінімальної довжини прямолінійної ділянки ВТ між ПЗП та першим МО вниз по потоку, тип МО не враховується.

На відстані, більшій, ніж довжина прямолінійної ділянки ВТ до «МО невизначеного типу» довжини та конфігурація прямолінійних ділянок ВТ не нормуються.

У таблиці наведена форма задання мінімальних довжин прямолінійних ділянок ВТ для різних типів МО та значень відносного діаметра згідно з ГОСТ 8.586.2-2005:

Форма задання мінімальних довжин прямолінійних ділянок ВТ

Місце встановлення МО	Тип МО	β											
		$\leq 0,2$		0,4		0,5		0,6		0,67		0,75	
		А	Б	А	Б	А	Б	А	Б	А	Б	А	Б
Після ПЗП	Будь-яке МО	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}
До ПЗП	Тип МО	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8	Y_9	Y_{10}	Y_{11}	Y_{12}

де X_i і Y_j – відносні довжини прямолінійних ділянок ВТ кратні діаметру D трубопроводу за робочих умов, при яких невизначеність коефіцієнта витікання дорівнює 0 (колонка А) або збільшується на 0.5% (колонка Б) відповідно. Значення X_i і Y_j для діафрагм наведено у табл. 4 ГОСТ 8.586.2-2005.

Для проміжних значень відносного діаметра ПЗП довжини прямолінійних ділянок ВТ пропонується визначати за залежністю

$$l/D = \frac{L_1 - L_2}{b_1 - b_2} (b - b_2) + L_2, \quad (1)$$

де β_1, L_1 – найближче менше значення відносного діаметра ПЗП та відповідне йому значення відносної довжини прямолінійної ділянки ВТ, згідно з таблицею; β_2, L_2 – найближче більше значення відносного діаметра ПЗП та відповідне йому значення відносної довжини прямолінійної ділянки ВТ, згідно з таблицею; l – значення довжини прямолінійної ділянки ВТ.

Відстань між першим МО від ПЗП догори по потоку розраховується згідно з залежністю (1) з врахуванням дійсного значення відносного діаметра ПЗП та типу першого МО. Ця відстань визначається згідно з даними, наведеними у колонках А таблиці для проєктованих витратомірних вузлів.

Відстань між першим МО від ПЗП донизу по потоку розраховується також згідно з залежністю (1) з врахуванням дійсного значення відносного діаметра ПЗП, але без врахування типу місцевого опору.

Відстань між другим МО від ПЗП догори по потоку розраховується для значення відносного діаметра ПЗП, що дорівнює 0,67 та типу другого МО, незалежно від дійсного значення відносного діаметра. Половина отриманого значення відносної довжини прямолінійної ділянки ВТ за допомогою вищеприписаної процедури буде мінімальною довжиною LMO2.

Згідно з А.1 ГОСТ 8.586.2-2005: якщо перший та другий МО догори по потоку від ПЗП є одним з різновидів колін чи груп колін, то відстань між такими МО повинна бути більше $30D$. В іншому випадку такі МО необхідно об'єднувати в одне МО відповідного типу згідно з нормами і правилами додатка А ГОСТ 8.586.2-2005.

Якщо другий чи третій МО догори по потоку від ПЗП є «групою колін» або «МО невизначеного типу» згідно з класифікацією ГОСТ 8.586.2-2005, то відстань від такого МО до ПЗП повинна розраховуватися згідно з таблицею і залежністю (1) для дійсного значення відносного діаметра β . В такому випадку перерахунок значення відносної довжини у абсолютну здійснюється за допомогою значення діаметра вимірної ділянки трубопроводу, спряженої з цим місцевим опором.

Вплив третього МО від ПЗП догори по потоку визначається насамперед типом конкретного МО. Тобто, якщо третій МО згідно з таблицею вимагає більших довжин прямолінійних ділянок ВТ, ніж другий МО, то такий місцевий опір повинен бути віднесеним від другого МО на відстань, більшу, ніж $5D$. В іншому випадку для цього типу третього МО необхідно розраховувати мінімальну довжину прямолінійних ділянок, як для другого МО догори по потоку від ПЗП. Ця розрахована відстань є мінімальною довжиною прямолінійної ділянки ВТ між першим та другим МО догори по потоку від ПЗП.

За необхідності мінімізації довжин прямолінійних ділянок ВТ можна скоротити відстань наведену в колонці А таблиці до значення відстані наведеної в колонці Б цієї таблиці. Потрібно зважати на збільшення невизначеності коефіцієнта витікання витратоміра змінного перепаду тиску, яке при цьому виникає. Серед прямолінійних ділянок вимірювального трубопроводу перед і після витратоміра змінного перепаду тиску лише раз допускається скорочувати довжину менше від значень, вказаних в колонках А таблиці для конкретного типу місцевого опору.

Для мінімізації повної загальної абсолютної довжини прямолінійних ділянок вимірювального трубопроводу (у разі побудови нового витратоміра) рекомендується скорочувати менше значення відносної довжини, наведеної у колонці А таблиці, прямолінійної ділянки перед тим місцевим опором, вимоги до якої є найвищими. За наявності перехідних ділянок вимірювального трубопроводу до ПЗП (конфузори, дифузори, симетричні різкі звуження чи розширення) рекомендується таке:

– За наявності конфузора чи симетричного різкого звуження рекомендується здійснювати скорочення менших значень відносних довжин, наведених у колонці А, тих прямолінійних ділянок, що розташовані догори по потоку відносно даного місцевого опору, якщо такі прямолінійні ділянки входять у межі нормування цього стандарту.

– За наявності дифузора чи симетричного різкого розширення рекомендується здійснювати скорочення менших значень відносних довжин, наведених у колонці А, тих прямолінійних ділянок, що розташовані донизу по потоку відносно цього місцевого опору.

Необхідно також додати, що вищенаведені послідовність розрахунків та врахування обмежень потрібно враховувати під час аналізу відповідності вимог комплексу стандартів щодо довжин та конфігурації існуючих витратомірних вузлів.

Під час проектування нових витратомірних вузлів чи аналізу на відповідність існуючих витратомірних вузлів комплексу стандартів ГОСТ 8.586.1,2,3,4,5-2005 підлягає також нормуванню відстань до ПЗП від встановленої до чи після нього гільзи термометра. Прямолінійна ділянка вимірювального трубопроводу до першого від ПЗП догори чи донизу по потоку місцевого опору не може бути меншою від відстані між ПЗП та гільзою термометра, встановленою до або після нього.

Викладені послідовність розрахунків та методологія врахування обмежень є основою алгоритмів, що були застосовані у розробленій комп'ютерній програмі – системі автоматизованого розрахунку та проектування витратомірів змінного перепаду тиску «САПР «Расход-РУ».

Висновки. Пропоновані методологія та алгоритми розрахунку прямолінійних ділянок вимірювальних трубопроводів витратомірів змінного перепаду тиску дозволяють зменшити невизначеність коефіцієнта витікання пристрою звуження потоку і загальну невизначеність результату вимірювання витрати та кількості енергоносіїв. Підвищення точності обліку енергоносіїв, як відомо, забезпечує зменшення їх втрат. Окрім того, під час проектування витратомірів змінного перепаду тиску із застосуванням розробленої «САПР «Расход-РУ» можна спроектувати таку конфігурацію витратомірного вузла, за якої істотно скоротяться матеріальні затрати на його будівництво чи можливу реконструкцію.

Розроблені алгоритми розрахунку дозволяють також перевіряти існуючі витратоміри змінного перепаду тиску, зокрема прямолінійні ділянки вимірювальних трубопроводів, на відповідність вимогам комплексу міждержавних стандартів ГОСТ 8.586.1,2,3,4,5-2005.

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. ГОСТ 8.586.1-2005. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 1. Принцип метода измерений и общие требования. 6. ГОСТ 8.586.2-2005. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 2. Диафрагмы. Технические требования. 7. ГОСТ 8.586.3-2005. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 3. Сопла и сопла Вентури. Технические требования. 8. ГОСТ 8.586.4-2005. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 4. Трубы Вентури. Технические требования. 9. ГОСТ 8.586.5-2005. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 5. Методика выполнения измерений. 10. РД 50-213 ¾ 80 Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами. – М.: Изд-во стандартов, 1982. 11. Изменение №1 к РД 50-213-80 «Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами. – М.: Изд-во стандартов, 1985. 12. ГОСТ 8.563.1 ¾ 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. 13. ГОСТ 8.563.2 ¾ 97 ГСИ. Измерение расхода и количества жидкостей и газов методом переменного перепада давления. Методика выполнения измерений с помощью сужающих устройств. 14. ГОСТ 8.563.3 ¾ 97 ГСИ. Измерение расхода и количества жидкостей и газов методом переменного перепада давления. Процедура и модуль расчетов. Программное обеспечение. 15. Пістун Е.П., Крук І.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. 16. Пістун Є.П. Облік та економія природного газу. //Нафтова і газова промисловість, 2000, N 2. – С. 43–47. 17. 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 Івано-Франк. Держ. техн. ун-ту нафти і газу, 2005. –С. 47–50. 18. Пістун Є. П., Лесовой Л. В., Матіко Ф. Д., Марковський Д. І., Лесовой Р. Л. Комп'ютерна програма «САПР «Расход-РУ». Посібник користувача. – Львів: Вид-во ЗАТ «Інститут енергоаудиту та обліку енергоносіїв», 2007. – 128 с. 19. Пістун Є. П., Лесовой Л. В. Нормування витратомірів змінного перепаду тиску. – Львів: Вид-во ЗАТ «Інститут енергоаудиту та обліку енергоносіїв», 2006. – 576 с.