

стандартів. 4. Голубев И.Ф., Гнездилов Н.Е. Вязкость газовых смесей. – М.: Изд-во стандартов, 1971. – 280 с. 5. Загорученко В.А. Вязкость природных газов и их основных компонентов // Теплофизические свойства веществ и материалов. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – Вып. 24. – С. 124–132.

УДК 681.121.04

Ф.Д. Матіко, Я.В. Грень, М.Б. Гутник

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра автоматизації теплових і хімічних процесів

## АНАЛІЗ ПОХИБОК ВИТРАТОМІРІВ ЗМІННОГО ПЕРЕПАДУ ТИСКУ В УМОВАХ НЕСТАЦІОНАРНОГО ПОТОКУ

© Матіко Ф.Д., Грень Я.В., Гутник М.Б., 2007

**Розглянуто похибки вимірювання витрати та кількості природного газу за допомогою витратомірів змінного перепаду тиску за нестационарного руху потоку.**

**In this paper are described the errors of gas volume measurement at non stationary flow with using differential pressure meters.**

**Постановка проблеми.** Для вимірювання витрати та кількості природного газу найчастіше застосовують витратоміри змінного перепаду тиску із стандартними пристроями звуження потоку (діафрагмами) та тахометричні лічильники. Вимірювання витрати за стаціонарного руху потоку за допомогою СПЗ достатньо розвинуте і забезпечує вимірювання витрати та кількості з відомими та цілком прийнятними похибками. Однак бувають ситуації, коли потік речовини є нестационарним. Нестационарність потоку виникає поблизу компресорних станцій, за рахунок завихрень потоку в місцях значних та різких перепадів рівня трубопроводу тощо. Застосування в цьому випадку витратомірів змінного перепаду тиску призводить до похибок вимірювання, які значно перевищують похибку за стаціонарного потоку. З іншого боку, дешевизна, простота конструкції, висока надійність, придатність для вимірювання як для малих, так і для великих витрат різноманітних середовищ, практично за будь-яких тисків і температур спричиняє потребу до розвитку методу змінного перепаду тиску для вимірювання витрати за нестационарних режимів потоку.

**Огляд літератури.** Усунення похибки вимірювання витрати за нестационарного потоку неможливе без з'ясування джерела цієї похибки.

У разі, коли нестационарність потоку спричинена його завихреннями, доцільно застосовувати випрямлячі потоку [1]. Однак випрямлячі потоку дають змогу усунути лише нестационарність, пов'язану із завихреннями потоку.

Найочевидніше джерелом похибки вимірювання пульсуючої витрати є квадратична залежність між витратою і перепадом тиску на пристрої звуження потоку. Дифманометр через свою інерцію покаже усереднений перепад тиску, корінь квадратний з якого більший за середнє значення кореня квадратного з миттєвих значень перепаду тиску. Звідси виникає похибка вимірювання середнього значення пульсуючої витрати. Ця похибка завжди додатна, але через випадковий характер зміни частотного складу пульсацій її неможливо компенсувати відповідними поправками.

Іншим джерелом похибки є вплив місцевого прискорення за нестационарного потоку. У [2] пропонується для визначення цього впливу використовувати критерій  $(\Delta p_a Sh / \Delta p)^{-1}$ , в якому  $\Delta p_a$  – амплітуда пульсації тиску після пульсатора,  $Sh = fx/v$  – число Струхалія, а  $\Delta p$  – перепад тиску на

діафрагмі. Далі, у [3] було встановлено, що доцільно вважати  $\Delta p_a$  – амплітудою пульсації перепаду тиску на діафрагмі, а  $\Delta p$  – середнім перепадом тиску.

У [4, 5] одержані залежності похибок вимірювання, обумовлені інерційним членом, від числа  $Sh$  і від коефіцієнта пульсацій тиску, з яких випливає, що похибка є від'ємною і зростає за збільшення  $Sh$  і коефіцієнта пульсації.

Проведені експерименти [6] показали, що від'ємна похибка особливо значна за великого співвідношення відносного діаметра отвору пристрою звуження  $d/D$ , де  $d$  – діаметр отвору пристрою звуження і  $D$  – внутрішній діаметр вимірювального трубопроводу. Тому у [6] рекомендується для вимірювання пульсуючих витрат застосовувати малі відношення  $d/D$ , що дорівнюють 0.25. У той самий час у [7] дано протилежну рекомендацію. Очевидно, це питання вимагає подальшого дослідження. У [8] одержано формулу, з якої випливає, що похибка вимірювання пульсуючої витрати залежить від амплітуди пульсації  $a$  і  $\alpha^2 Sh$ , де  $\alpha$  – коефіцієнт витрати, і від форми пульсації. Обчислення для трьох форм пульсацій – синусоїдальної, трапецеїдальної і пілкоподібної – показали, що вагома похибка  $\Delta Q_{cp} / Q_{cp}$  за  $a$ , що дорівнює 0,1; 0,2; 0,4 і 1, виникає, коли  $\alpha^2 Sh$  перевищує 1; 0,7; 0,4 і 0,06 відповідно.

Спроби оцінити вплив місцевого прискорення тільки числом Струхаля без урахування амплітуди пульсацій приводить до невизначених і неоднозначних висновків. Так, у [9] рекомендується  $Sh < 0.002$ , тоді як у [3] вказується, що лише за  $Sh > 1$  виникають значні похибки. У [7] на підставі роботи [10] з діафрагмою, з модулем 0.39 вказується, що вплив нестандартності потоку виявляється лише за  $Sh > 0.02$ . За даними [11] похибка вимірювання пульсуючої витрати не перевищує 0.7–0.9 % за коефіцієнта пульсацій  $a = 0.2$  і частот, що застосовувались під час дослідження.

За збільшення частоти  $f$  пульсацій більшого значення набуває похибка, викликана впливом місцевого прискорення. Врахувати цю похибку дуже важко, незважаючи на ряд досліджень, направлених на виявлення залежності її від частоти і амплітуди пульсації. Запропоновані критерії [3, 12] для оцінки похибки, включаючи число Струхаля, виявилися не універсальними.

За пульсуючих витрат виникають хвилі швидкості та тиску, які рухаються зі швидкістю звуку. Вони відбиваються від перешкод на своєму шляху, у тому числі і від стінки діафрагми, сприяючи виникненню резонансу в трубопроводах та утворенню “стоячої хвилі”. У [13] стверджується, що похибка вимірювання перепаду тиску може виникнути також через високочастотні коливання (понад 1000 Гц), так звані звукові шуми, що виникають, наприклад, під час витікання струменя газу з регульовального клапана. Врахувати вплив акустичних явищ на точність вимірювання дуже важко. Але, ймовірно, вони – причина дуже великих похибок, які спостерігались під час вимірювання пульсуючих потоків. У [10] вказується, що акустичними ефектами можна знехтувати, якщо діаметр отвору діафрагми малий порівняно з довжиною чверті частини звукової хвилі.

Сполучні трубки між звужувальним пристроєм і дифманометром можуть бути додатковим джерелом похибок під час вимірювання нестационарних витрат через можливу нерівність опорів обох трубок. Необхідно уникати в трубках нелінійних опорів, вони спотворюють передачу перепаду через несиметричність форми пульсації. При цьому тиск в кінці трубки може бути відмінним (меншим або більшим) від середнього [14].

Акустичні явища у сполучних трубках можуть також бути джерелом появи додаткової похибки. Необхідно виключати появу резонансу у сполучних трубках.

**Постановка мети.** Завдяки широкому розповсюдженню витратомірів із звужувальними пристроями можливість вимірювання за їх допомогою пульсуючих витрат являє собою великий практичний інтерес. Але далеко не завжди їх застосування для цієї мети дає задовільні результати. Причина полягає у великій кількості джерел похибок, яка в деяких випадках може досягати неприпустимо великих значень. Ознайомлення з цими джерелами допоможе встановити межі і умови застосування звужувальних пристроїв для вимірювання пульсуючих витрат.

**Виклад основного матеріалу.** Залежно від діапазону зміни амплітуди пульсацій, середньоквадратичної амплітуди пульсацій, відносного відхилення параметра і частоти пульсацій нестационарного потоку прийнято виділяти стаціонарний, пульсуючий, змінний та нестационарний режими руху [16].

Стаціонарний режим руху характеризується наявністю сукупності низько- і середньочастотних пульсацій з дуже малими амплітудами пульсацій, середньоквадратичними амплітудами пульсацій, відносним відхиленням параметра (перепаду тиску) потоку, відповідно і витрати.

Умовою реалізації стаціонарного режиму руху є виконання таких вимог:

- а) значення відносного відхилення низькочастотних пульсацій перепаду тиску  $\tilde{\Delta}(\Delta p) \leq 0,14$  ;
- б) значення відносної середньоквадратичної амплітуди середньочастотних пульсацій перепаду тиску  $\tilde{\Delta p}_s \leq 0,1$  ;
- в) миттєве значення  $\Delta p(\tau)$  повинно знаходитись в робочому діапазоні ЗВ  $\Delta p$ .

Пульсуючий режим руху характеризується наявністю яскраво виражених середньочастотних пульсацій хоча б одного з основних параметрів потоку, відповідно і витрати, і можливою наявністю низькочастотних пульсацій параметрів потоку з дуже малими амплітудами пульсацій, середньоквадратичними амплітудами пульсацій.

Умовою реалізації пульсуючого режиму руху є виконання таких вимог:

- а) відносне відхилення миттєвого значення низькочастотних пульсацій перепаду тиску  $\tilde{\Delta}(\Delta p) \leq 0.14$  ;
- б) низькочастотна складова зміни перепаду тиску  $\overline{\Delta p}(\tau)$  повинна знаходитись в робочому діапазоні ЗВ  $\Delta p$ ;
- в) відносна середньоквадратична амплітуда середньочастотних пульсацій  $\tilde{\Delta p}_s > 0.1$  ;
- г) відносна середньоквадратична амплітуда середньочастотних пульсацій  $\tilde{\Delta p}_s \leq 0.5$  .

Змінний режим руху характеризується наявністю яскраво виражених низькочастотних пульсацій (перехідних процесів) хоча б одного з основних параметрів потоку, відповідно і витрати, відсутністю або наявністю середньочастотних пульсацій параметрів потоку з дуже малими амплітудами пульсацій, середньоквадратичними амплітудами пульсацій.

Умовою реалізації змінного режиму руху є виконання таких вимог:

- а) відносне відхилення миттєвого значення низькочастотних пульсацій перепаду тиску за період реалізації сигналу  $\tilde{\Delta}(\Delta p) > 0.14$  ;
- б) відносна середньоквадратична амплітуда середньочастотних пульсацій  $\tilde{\Delta p}_s \leq 0.1$  ;
- в) миттєве значення  $\Delta p(\tau)$  повинно знаходитись в робочому діапазоні ЗВ  $\Delta p$ .

Нестационарний режим руху характеризується сукупністю яскраво виражених низько- і середньочастотних пульсацій хоча б одного з основних параметрів потоку, відповідно і витрати, які мають значні амплітуди пульсацій і середньоквадратичні амплітуди пульсацій.

Нестационарний режим є комбінацією пульсуючого і змінного режимів руху.

Умовою реалізації нестационарного режиму руху є виконання таких вимог:

- а) відносне відхилення миттєвого значення низькочастотних пульсацій перепаду тиску за період реалізації сигналу  $\tilde{\Delta}(\Delta p) > 0.14$  ;
- б) низькочастотна складова зміни перепаду тиску  $\overline{\Delta p}(\tau)$  повинна знаходитись в робочому діапазоні ЗВ  $\Delta p$ ;
- в) відносна середньоквадратична амплітуда середньочастотних пульсацій  $\tilde{\Delta p}_s > 0.1$  ;
- г) відносна середньоквадратична амплітуда середньочастотних пульсацій  $\tilde{\Delta p}_s \leq 0.5$  .

Відповідно до вищесказаного амплітудний спектр перепаду тиску для кожного з режимів руху (2, 3) містить три частини: низько-, середньо- і високочастотні складові, умовно розділені між собою значеннями граничних частот, відповідно  $f_1$ ,  $f_2$ .

Низько- і середньочастотні частини належать до дійсної частини спектра. Високочастотна частина спектра може містити уявні області частот, не відповідальних за реальну зміну витрати і  $\Delta p(\tau)$  в часі, останні можуть виникати через резонансні явища в камерах відбору тиску і з'єднувальних лініях до дифманометра. Зміну перепаду тиску для кожного з режимів руху показано на рис. 1.

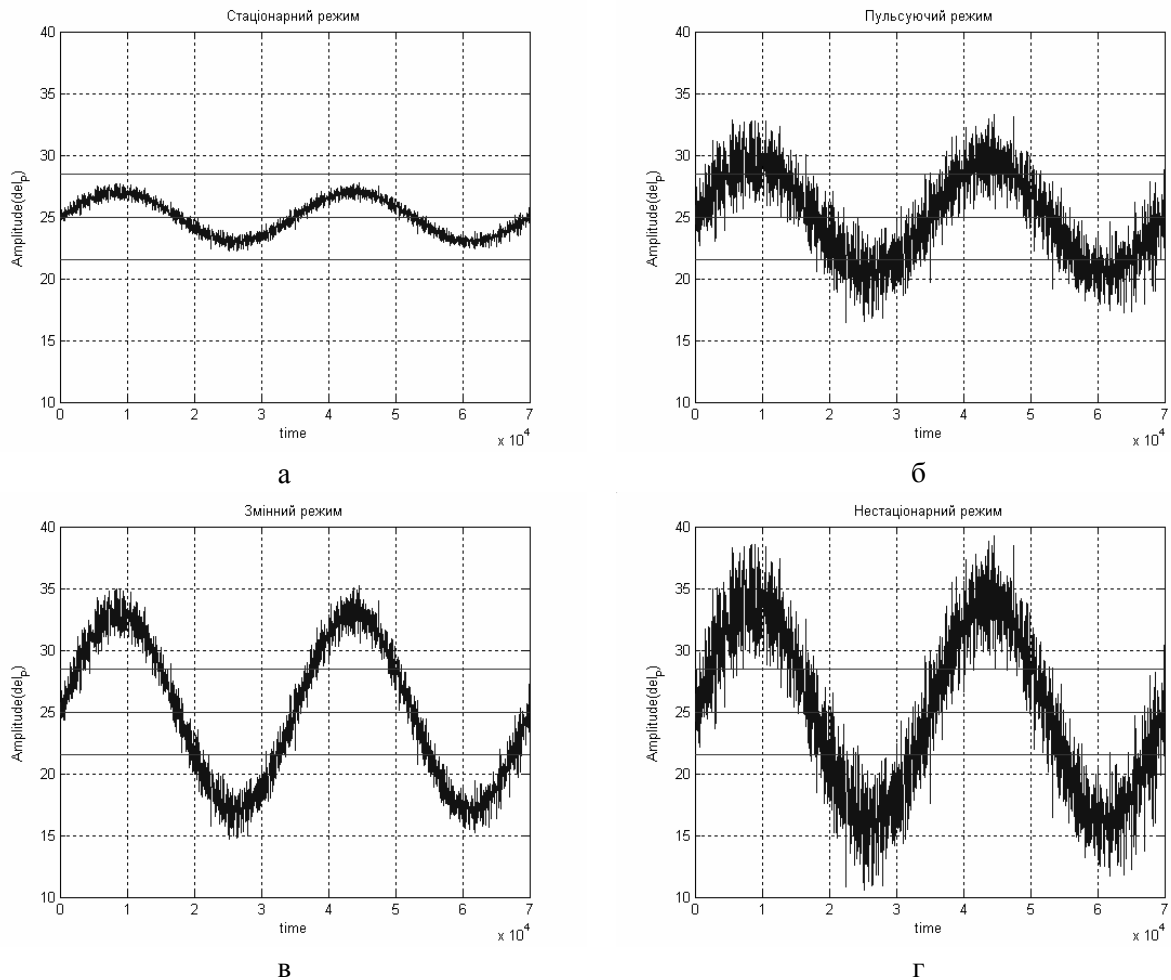


Рис. 1. Зміна перепаду тиску в часі за:  
а – стаціонарного потоку; б – пульсуючого; в – змінного; г – нестационарного

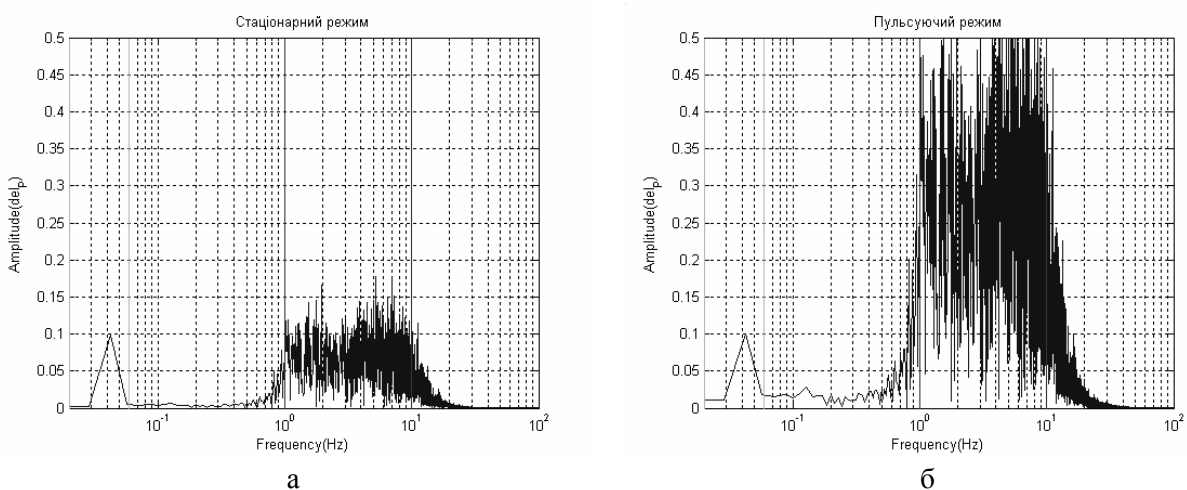


Рис. 2. Амплітудний спектр перепаду тиску за:  
а – стаціонарного потоку; б – пульсуючого

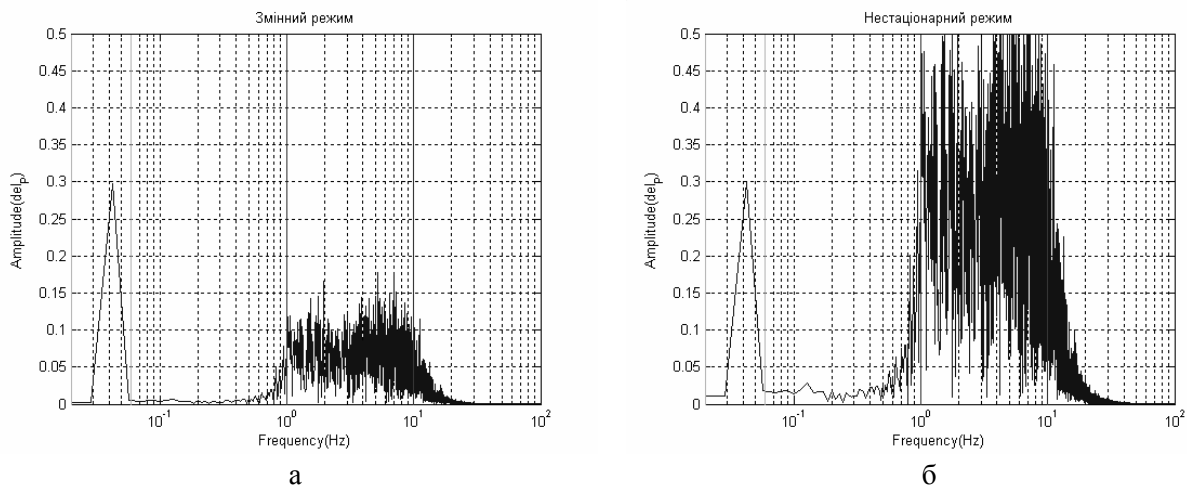


Рис. 3. Амплітудний спектр перепаду тиску за:  
а – змінного; б – нестаціонарного потоку.

Для підтвердження аналітичних залежностей [15] щодо визначення похибок усередненого значення витрати газу під час вимірювання методом змінного перепаду тиску виконано такий математичний експеримент:

1) сформовано сигнали зміни перепаду тиску, які за статистичними характеристиками та формою амплітудно-частотного спектра відповідають чотирьом режимам руху газу за додатком Ж ГОСТ 8.585.5-2005 [16] (рис. 1). Отримано дисперсію та відносну дисперсію кожного сигналу;

2) для окремого режиму за визначеними значеннями математичного сподівання та дисперсії сигналів перепаду тиску та тиску обчислено значення похибки  $\delta_{Q_{H.CP}}$ , яка виникає внаслідок усереднення значень перепаду тиску та тиску за формулою

$$\delta_{Q_{H.CP}} = \frac{100}{8[\sigma_{\text{від}}^2(\Delta P) + \sigma_{\text{від}}^2(P) - 3\sigma_{\text{від}}^2(T)]^{-1} - 1};$$

3) отримано сигнал зміни миттєвого значення витрати у трубопроводі за рівнянням розрахунку витрати [1] та за значеннями сигналів перепаду тиску та тиску. Знайдено математичне сподівання миттєвого значення витрати;

4) отримано математичні сподівання сигналів перепаду тиску та тиску. За значеннями математичних сподівань обчислено усереднене значення витрати упродовж часу реалізації сигналів (10 с);

5) отримано відносне відхилення усередненого значення витрати від математичного сподівання миттєвого значення витрати за формулою

$$\delta = \frac{Q(E(P), E(\Delta P)) - E(Q_i)}{E(Q_i)} 100\%.$$

Порівняння отриманих значень похибок  $\delta_{Q_{H.CP}}$  та  $\delta$  наведено у табл. 1.

Таблиця 1

**Порівняння отриманих значень похибок**

Режим	$\delta_{Q_{H.CP}}$ , %	$\delta$ , %	$\sigma^2(\Delta P)$ , частка одиниці	$\sigma^2(P)$ , частка одиниці
Стационарний	0.0410	0.0279	0.0033	0
Пульсуючий	0.1326	0.1070	0.0106	0
Змінний	0.6659	0.6374	0.0529	0
Нестационарний	0.8633	0.8546	0.0685	0

Отримані результати математичного експерименту підтверджують аналітичні залежності [15] та показують, що визначення витрати природного газу за усередненими значеннями тиску газу та перепаду тиску на діафрагмі призводить до завищення значення витрати. Завищення витрати, знайденої за усередненими значеннями, тим більше, чим більшою є дисперсія, зокрема перепаду тиску.

Для детального дослідження роботи витратомірів змінного перепаду тиску в умовах нестационарних потоків побудовано математичну модель імпульсної ділянки, а саме – імпульсної трубки із запірною арматурою та камери дифманометра. Після лінеаризації диференціальних рівнянь, що становлять основу математичної моделі, її можна подати у вигляді функції передачі другого порядку

$$W(p) = \frac{k_p}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1} \quad (1)$$

Співвідношення сталих часу  $T_1/(2T_2)$  функції передачі 2-го порядку, отримане за параметрами реального вузла обліку, значно менше від одиниці, тобто модель є коливною із коефіцієнтом згасання коливань близько 0,37. Модель із такою значною коливальністю не відповідає реальним характеристикам сучасних дифманометрів, тому її апроксимовано диференціальним рівнянням першого порядку. В апроксимованій моделі коефіцієнт передачі дорівнює коефіцієнту передачі вихідної моделі, а стала часу дорівнює сумі сталих часу вихідної моделі. Для прикладу витратоміра змінного перепаду тиску, розглянутого у цій роботі, значення сталої часу апроксимованої моделі становить  $T=0,0132$  с. Отже, результуюча функція передачі, яка описує імпульсну ділянку, має вигляд

$$W(p) = \frac{k_p}{Tp + 1} = \frac{1}{0,0132p + 1} \quad (2)$$

Сучасні інтелектуальні перетворювачі перепаду тиску дають змогу встановлювати додаткове (електронне, програмне) фільтрування сигналу перепаду тиску та змінювати сталу часу програмного фільтра. Тому отриману модель необхідно доповнити моделлю додаткового фільтра із змінною сталою часу. Із достатньою для практичних задач точністю додатковий фільтр можна описати функцією передачі першого порядку. Тоді спрощену модель каналу вимірювання перепаду тиску можна подати у вигляді

$$W(p) = \frac{1}{0,0132p + 1} \cdot \frac{1}{T_{\phi 0} p + 1} \quad (3)$$

де  $T_{\phi 0}$  – стала часу додаткового фільтра.

Вплив фільтрування на похибку вимірювання перепаду тиску швидкозмінних потоків оцінювали за реакцією моделі каналу вимірювання перепаду тиску (3) на сигнали перепаду тиску для чотирьох режимів руху потоку. Дослідження проводили для значень сталої часу додаткового фільтра, що дорівнювали  $T_{\phi 0} = 0,1, 0,2, \text{ і } 0,5$  с. Результати обробки вихідних сигналів фільтра (3) наведені у табл. 2. Відносні похибки визначення середніх значень перепаду тиску і кореня квадратного з перепаду тиску визначені за формулами

$$\delta \Delta P = \frac{\Delta \bar{P}_{\phi} - \Delta \bar{P}}{\Delta \bar{P}} \cdot 100\%, \quad \delta \sqrt{\Delta P} = \frac{\sqrt{\Delta P_{\phi}} - \sqrt{\Delta P}}{\sqrt{\Delta P}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

де  $\Delta \bar{P}_{\phi}$  – середнє значення перепаду тиску після фільтра;  $\Delta \bar{P}$  – середнє значення перепаду тиску до фільтра;  $\sqrt{\Delta P_{\phi}}$  – середнє значення кореня квадратного з перепаду тиску після фільтра;  $\sqrt{\Delta P}$  – середнє значення кореня квадратного з перепаду тиску до фільтра.

## Результати обробки вимірних сигналів фільтра

Режим	$T_{ф,дод}$	$\Delta\bar{P}, \text{кПа}$	$\Delta\bar{P}_ф, \text{кПа}$	$\delta\Delta P, \%$	$\delta\sqrt{\Delta P}, \%$
<i>Часовий інтервал вимірювання 100 с</i>					
Стационарний	0	24.935	24.934	-0.0059	-0.0028
	0.1	24.935	24.940	0.0188	0.0117
	0.2	24.935	24.950	0.0618	0.0372
	0.5	24.940	24.984	0.1799	0.1102
Нестационарний	0	24.801	24.804	0.0125	0.0078
	0.1	24.801	24.836	0.1424	0.0953
	0.2	24.815	24.892	0.3125	0.2014
	0.5	24.826	25.016	0.7648	0.5631
<i>Часовий інтервал вимірювання 1000 с</i>					
Стационарний	0	24.953	24.951	-0.0074	-0.0035
	0.1	24.953	24.954	0.0052	0.0049
	0.2	24.956	24.964	0.0355	0.0240
	0.5	24.954	24.993	0.1571	0.0988
Нестационарний	0	24.837	24.839	0.0056	0.0029
	0.1	24.839	24.862	0.0895	0.0584
	0.2	24.837	24.889	0.2114	0.1734
	0.5	24.837	25.011	0.7009	0.5107

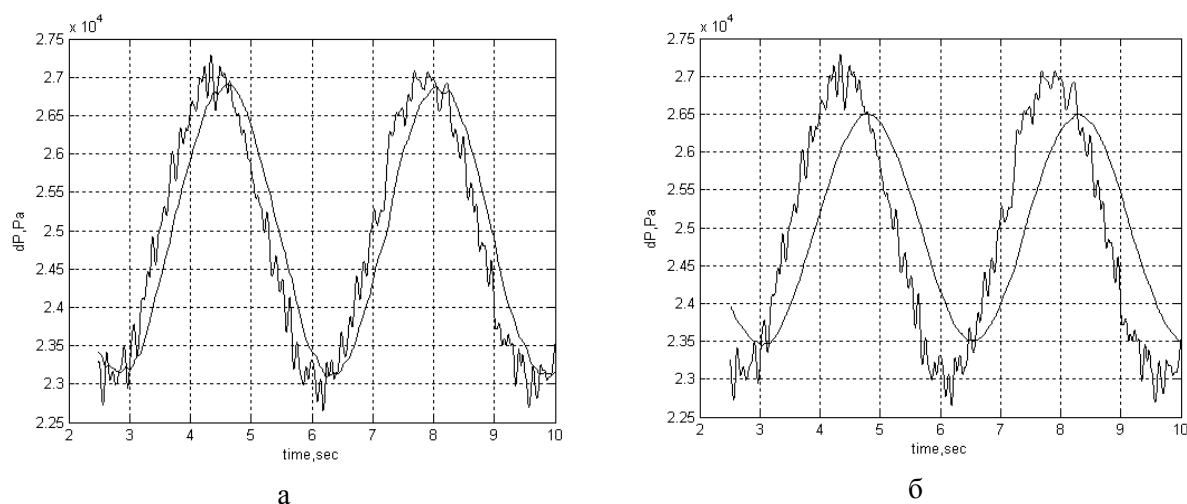


Рис. 4. Сигнали перепаду тиску до і після фільтра зі сталою часу:

$$а - T_{фд} = 0.2; б - T_{фд} = 0.5$$

Із результатів, наведених у табл. 2 та показаних на рис. 4 зрозуміло, що збільшення значення сталої часу фільтра призводить до збільшення відносної похибки вимірювання миттєвих значень перепаду тиску, а також до збільшення відносної різниці середніх значень нефільтрованого та фільтрованого сигналів перепаду тиску. Для розглянутих стаціонарного та нестационарного режимів руху потоку наявність додаткового фільтра із сталою часу  $T_{фд} \leq 0,1$  с не вносить значних похибок у канал вимірювання перепаду тиску. За значень  $T_{фд} > 0,1$  с додаткова похибка вимірювання перепаду тиску, зумовлена впливом фільтра, стає сумірною із основною похибкою сучасних вимірювальних перетворювачів перепаду тиску.

У сучасних витратомірних комплексах на основі мікропроцесорних обчислювачів частота опитування вимірювальних перетворювачів становить  $1 \text{ с}^{-1}$ , а здебільшого і менше. Застосування таких комплексів в умовах швидкозмінних потоків призводить до появи додаткової похибки,

зумовленої зниженням частоти дискретизації вимірюваних сигналів. У цій роботі проведено дослідження цієї додаткової похибки способом порівняння об'ємів газу, отриманих інтегруванням значень витрати, обчислених за різних частот опитування давачів.

Об'єм газу, який протікає через досліджуваний трубопровід упродовж інтервалу дослідження, визначали методом трапецій за формулою

$$V = \sum_{i=2}^n (t_i - t_{i-1}) \cdot \frac{Q_i - Q_{i-1}}{2}.$$

Об'єм газу отримано для інтервалу часу 10 і 100 с та для частоти опитування давачів 1, 3, 100 с<sup>-1</sup> для стаціонарного і нестаціонарного режимів. Відносну різницю об'ємів  $\delta_{100}$ ,  $\delta_3$  і  $\delta_1$  обчислено як різницю між об'ємом, знайденим за миттєвими значеннями витрати упродовж повного інтервалу часу, та об'ємом, виміряним упродовж цього ж інтервалу часу з частотою дискретизації 100, 3 та 1 с<sup>-1</sup>, відповідно. Для того, щоб виключити вплив попадання точок опитування на точки максимального чи мінімального значення періодичного сигналу, порівняння об'ємів виконано для багатьох зміщень щодо початкового значення сигналу від 100 до 500 відліків.

Результати порівняння об'ємів для стаціонарного та нестаціонарного режимів руху потоку показані в табл. 3 та 4 відповідно.

Таблиця 3

**Результати порівняння об'ємів**

Зміщення початкової точки, відліки	Об'єм газу, виміряний упродовж 10 с, м <sup>3</sup>				Відносна різниця об'ємів		
	вихідний вектор	100 с <sup>-1</sup>	3 с <sup>-1</sup>	1 с <sup>-1</sup>	$\delta_{100}, \%$	$\delta_3, \%$	$\delta_1, \%$
1	2	3	4	5	6	7	8
<i>Для стаціонарного режиму за інтервалу 10 с</i>							
0	32.6995 32.6995 33.3719	33.3719	32.7091	32.6855	0	0.0293	-0.0429
100	28.9650 29.9932 31.1610	31.1610	30.0102	28.9949	0	0.0568	0.1032
200	28.6793 28.6793 29.1585	29.1585	28.6849	28.6700	0	0.0196	-0.0324
300	25.3524 26.4231 27.4336	27.4336	26.4147	25.3499	0	-0.0319	-0.0098
400	25.4341 25.4341 25.4702	25.4702	25.4063	25.4068	0	-0.1096	-0.1075
500	21.9982 23.0894 23.9763	23.9763	23.0739	21.9479	0	-0.0673	-0.2286
<i>Для стаціонарного режиму за інтервалу 100 с</i>							
0	358.9863 361.2197 362.3784	362.3784	361.2267	358.7982	0	0.0019	-0.0524
100	358.5343 359.6679 360.1674	360.1674	359.6064	357.9922	0	-0.0171	-0.1512
200	354.9328 357.1435 358.1650	358.1650	357.1629	354.9106	0	0.0054	-0.0062



1	2	3	4	5	6	7	8
300	354.9495 356.1304 356.4400	356.4400	356.0644	354.4927	0	-0.0185	-0.1287
400	351.6727 353.8600 354.7467	354.7467	353.7696	351.3180	0	-0.0256	-0.1009
500	351.6221 352.8557 352.9828	352.9828	352.7374	351.1996	0	-0.0335	-0.1202

Таблиця 4

## Результати порівняння об'ємів

Зміщення початкової точки, відліки	Об'єм газу, виміряний упродовж 10 с, м <sup>3</sup>				Відносна різниця об'ємів		
	вихідний вектор	100 с <sup>-1</sup>	3 с <sup>-1</sup>	1 с <sup>-1</sup>	$\delta_{100},\%$	$\delta_3,\%$	$\delta_1,\%$
<i>Для нестационарного режиму за інтервалу 10 с</i>							
0	33.6074 34.4175 34.8771	34.8771	34.3849	33.5549	0	-0.0947	-0.1433
100	33.0854 33.6001 33.7765	33.7765	33.6741	33.0865	0	0.2202	0.0035
200	31.7092 32.5388 32.9373	32.9373	32.5096	31.7108	0	-0.0897	0.0050
300	31.0492 31.5721 31.6810	31.6810	31.6075	30.9817	2 0	0.1122	-0.2174
400	29.3302 30.1736 30.5255	30.5255	30.1332	29.2924	0	-0.1341	-0.1288
500	29.1310 29.6597 29.6919	29.6919	29.6636	28.9597	0	0.0134	-0.5881
<i>Для нестационарного режиму за інтервалу 100 с</i>							
0	362.0435 362.9712 363.1830	363.1830	362.8139	362.3664	0	-0.0433	0.0892
100	361.6353 361.6353 362.0824	362.0824	361.5734	360.9900	0	-0.0171	-0.1784
200	360.1675 361.0881 361.2433	361.2433	361.1460	360.8165	0	0.0160	0.1802
300	359.5988 359.5988 359.9869	359.9869	359.3832	359.1811	0	-0.0600	-0.1162
400	357.7963 358.7486 358.8314	358.8314	358.8953	358.3457	0	0.0409	0.1536
500	357.6626 357.6626 357.9978	357.9978	357.5940	357.1102	0	-0.0192	-0.1545

Як бачимо із табл. 3 і 4, у системах обліку, застосованих для вимірювання витрати та об'єму швидкозмінних потоків, недостатньо проводити опитування вимірювальних перетворювачів із частотою  $1 \text{ с}^{-1}$ . За частоти опитування  $3 \text{ с}^{-1}$  і вищої додаткова похибка внаслідок дискретизації вимірюваного сигналу перепаду тиску не перевищує основної похибки вимірювальних перетворювачів.

**Висновки.** Проведено дослідження похибок визначення усередненого значення витрати газу на основі моделей сигналів перепаду тиску. Визначено, що коливання параметрів  $\Delta P$  і  $P$  зменшують дійсне значення математичного сподівання витрати  $E_d(Q_H)$ . У зв'язку з цим неврахування відносних дисперсій тиску та перепаду тиску  $\sigma_{\text{від}}^2(\Delta P)$  і  $\sigma_{\text{від}}^2(P)$  завищують середнє значення витрати. Завищення витрати, знайденої за усередненими значеннями, є тим більше, чим більшими є дисперсії сигналів тиску та перепаду тиску.

Імпульсна лінія вимірювального перетворювача перепаду тиску характеризується незначною інерційністю (стала часу дорівнює близько  $0,01 \text{ с}$ ), однак збільшення значення сталої часу додаткового (програмного) фільтра призводить до збільшення відносної похибки вимірювання миттєвих значень перепаду тиску, а також до збільшення відносної різниці середніх значень нефільтрованого та фільтрованого сигналів перепаду тиску. Для розглянутих режимів руху потоку наявність додаткового фільтра із сталою часу  $T_{\text{фд}} \leq 0,1 \text{ с}$  не вносить значних похибок у канал вимірювання перепаду тиску. За значень  $T_{\text{фд}} > 0,1 \text{ с}$  додаткова похибка вимірювання перепаду тиску, зумовлена впливом фільтра, стає сумірною із основною похибкою сучасних вимірювальних перетворювачів перепаду тиску.

У системах обліку, застосованих для вимірювання витрати та об'єму швидкозмінних потоків, необхідно проводити опитування вимірювальних перетворювачів із частотою  $3 \text{ с}^{-1}$  і вище. Тоді додаткова похибка внаслідок дискретизації вимірюваного сигналу перепаду тиску не перевищує основної похибки вимірювальних перетворювачів.

1. Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами: РД 50-213-80. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 319 с. 2. Zarek I.M. Metering pulsating flow // *Engineering*. – 1955. – Vol. 7. – P. 17–19. 3. Earles W.E., Zarek J.M. Use of sharp-edged orifices for metering pulsating flow // *Proc. Inst. Mech. Eng.* – 1963. – Vol. 177. – N37. – P. 937–1024. 4. Островский Э.С. Влияние локального ускорения на погрешность измерения пульсирующего расхода с помощью сужающих устройств // *Расчет и конструирование расходомеров*. – Л., 1978. – С. 28–30. 5. Никитина Т.А., Сичети А.И. Определения среднего расхода пульсирующих потоков // *Гидромеханика*. – 1974. – Вып. 27. – С. 65–70. 6. Grimson J., Hay H. Errors due to pulsation in orifice meters // *J. of the Royal Aeronaut. Society*. – 1971. – Vol. 75. – N 4. – P. 284–287. 7. Дробышева Н.А., Никифоров А.Н. Измерение нестационарных расходов с помощью сужающих устройств // *Метролог. обесп. измер.* – М.: ВНИИКИ, 1984. – Вып. 3. – 32 с. 8. Dobrowolski B., Kabza Z., Pospolita J. The analysis of metrology performance of constriction flow-meters under pulsating flow-condition // *The Proceedings of the X-th IMEKO World Congress*. – 1985. – Vol. 8. – P. 25–32. 9. Oppenheim A.K., Ghilton E.G. Pulsating Flow Measurement- a literature survey // *Trans. ASME*. – 1955. – Vol. 77. – N 2. – P. 231–248. 10. Downing P.M., Mottram R.C. The effects of flow pulsations on orifice plate flowmeters // *Fluid Flow Measur. Proc. Conf.* – 1975; 1977. – P. 25–52. 11. Estel E. Durchflusszahl von Normdusen und Druckfall in Rohren bei pulsierender Stromung // *Physika-lische Zeitschrift*. – 1937. – Bd. 38. – S. 748–758. 12. Floyd J.H. The effect of high frequency pulsations on differential meter accuracy // *Pipe Line News*. – 1963. – Vol. 35. – N 2. – P. 19–23. 13. Williams T.J. Pulsation damping in pressure gauge connections // *The Engineer*. – 1959. – Vol. 207. – P. 378–379. 14. Earles S.W.E., Jeffery B.J., Williams T.J. Pulsating flow measurement using an orifice-manometer systems // *The Engineer*. – 1967. – P. 821–825. 15. Пустун Е.П.

*О погрешностях определения среднесуточного значения расхода газа, измеряемого методом переменного перепада давления. 16. ГОСТ 8.586.5-2005. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. – Ч. 5: Методика выполнения измерений.*

УДК 681.121.852.08

**І.В. Ділай, О.З. Парнета, З.М. Теплох**

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра автоматизації теплових та хімічних процесів

## **РОЗРАХУНОК І ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ МІРНИХ ТРУБОК ПЛІВКОВИХ ВИТРАТОМІРІВ**

© Ділай І.В., Парнета О.З., Теплох З.М., 2007

**Запропоновано методику розрахунку оптимальної за конструкцією мірної трубки плівкового витратоміра, яка забезпечує проектування витратоміра для заданих діапазонів витрат і точності вимірювання.**

**In the article the calculation methods of optimal construction measuring tube of film flowmeters is offered. The methods will guarantee the flowmeter designing for desired range of flow rates and measurement precision.**

**Постановка проблеми.** Для вимірювання малих і мікровитрат газів в лабораторних умовах переважно застосовують плівкові витратоміри (ПВ) [1]. Найпростіший ПВ можна виготовити шляхом сполучення через трійник скляної мірної трубки (часто хімічної бюретки) з гумовим балоном, заповненим мильним розчином [2], а для вимірювання часу проходження плівки застосувати ручний секундомір. Проте таке виконання зумовлює не тільки доволі вузький діапазон вимірювання (в найкращих варіантах –  $10^{-3} \dots 0,1$  м<sup>3</sup>/год), невисокі експлуатаційні та метрологічні характеристики приладу, у багатьох випадках фактично перетворює ПВ в індикатор витрати, а в деяких – взагалі унеможливує вимірювання [3]. У той самий час вимірювання з високою точністю малих та мікровитрат газів потрібне в багатьох задачах, наприклад, для градування промислових витратомірів і газоаналітичних вимірювань [4].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У [3, 5, 6] показано, що потенційні можливості плівкового методу вимірювання є доволі високими і дають змогу створювати якісні витратоміри в діапазоні  $10^{-5} \dots 4$  (10) м<sup>3</sup>/год. Центральною і визначальною частиною ПВ, від якої найбільше залежать точність, діапазон вимірювання і експлуатаційні властивості ПВ, є мірна трубка (МТ) з шаром плівкоутворювальної рідини (ПР) на її внутрішній поверхні та рухомою рідинною плівкою (РП), і тому від її конструктивних характеристик залежать метрологічні та експлуатаційні властивості ПВ [7]. Важливі рекомендації щодо розрахунків і конструкції МТ подані в [3], проте розрахунок і оптимізація геометричних розмірів МТ потребують детальнішого розроблення, зокрема врахування можливостей сучасного рівня оптоелектронної техніки.

**Формулювання цілі статті.** Метою роботи є підвищення точності, надійності та розширення меж вимірювання малих витрат газів оптимізацією конструкції мірних трубок ПВ згідно з критерієм мінімуму похибки вимірювання витрати.

**Основні положення.** Базовий варіант МТ у вигляді циліндричної трубки з внутрішнім діаметром  $d$  зображено на рисунку. Таке виконання (тобто циліндр з однаковим внутрішнім