

АВТОМАТИЗАЦІЯ

УДК 681.121.84

Ф.Д. Матіко, Р.М. Федоришин, І.В. Костик, Я.В. Грень
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра автоматизації теплових і хімічних процесів

АНАЛІЗ ПРИЧИН ВИНИКНЕННЯ ДОДАТКОВИХ ПОХИБОК ВИТРАТОМІРІВ ЗМІННОГО ПЕРЕПАДУ ТИСКУ В УМОВАХ НЕСТАЦІОНАРНОГО ПОТОКУ

© Матіко Ф.Д., Федоришин Р.М., Костик І.В., Грень Я.В., 2010

Розглянуто причини виникнення пульсацій потоку та наведено аналіз існуючих підходів до визначення впливу нестационарного потоку на точність вимірювання витрати за допомогою стандартних пристроїв звуження потоку.

This paper deals with discussion of causes of flow pulsations and with analysis of existing approaches to defining the influence of non-stationary flow on the accuracy of flowrate measurement by means of standard pressure differential devices.

Постановка проблеми. Зростання вартості енергоносіїв стимулює до їх економії, раціонального використання та зменшення енергозатратності як в промисловості, так і в житлово-комунальній сфері. Економія енергоносіїв можлива тільки за точного та надійного їх обліку. Тільки за допомогою обліку можна встановити: в який спосіб і чи ефективно вони використовуються. Відсутність обліку енергоносіїв – це відсутність контролю їх використання, що завжди призводить до нераціонального використання енергоносіїв, а отже, і до їх втрат. А це, своєю чергою, призводить до величезних втрат коштів. Якщо облік енергоносіїв є, але він здійснюється з низькою точністю, то в межах похибки вимірювання отримують вказані негативні результати.

Для того, щоб зменшити негативні наслідки відсутності обліку енергоносіїв або низької точності їх вимірювання, необхідно не тільки забезпечити облік енергоносіїв, а й підвищувати точність та надійність такого обліку, зокрема і в умовах вимірювання витрати нестационарних потоків.

Мета дослідження. Найпоширенішими у промислових вимірюваннях є витратоміри змінного перепаду тиску. Дуже часто вони працюють в умовах із змінними параметрами потоків, що призводить до виникнення значних додаткових похибок вимірювання витрати.

Мета роботи – визначити причини виникнення додаткових похибок витратомірів змінного перепаду тиску за умови їх застосування для вимірювання витрати нестационарних потоків.

Аналіз причин виникнення додаткових похибок. Стаціонарне протікання потоку в трубопроводі можливе лише за ламінарного режиму руху, який може існувати лише за чисел Рейнольдса у трубопроводі, менших, ніж 2000. У більшості промислових трубопроводів числа Рейнольдса потоків є більшими за 2000, і тому режим протікання є турбулентним, що означає, що вони є лише статистично стаціонарними. У таких потоках існують постійні флуктуації (коливання) таких величин, як швидкість, тиск та температура. Тим не менше, якщо умови протікання потоків у трубопроводах є типовими для цілком розвинутого турбулентного потоку і періодичні пульсації відсутні, то приймають, що потік умовно стаціонарний і виконують вимірювання витрати згідно із

вимогами стандартів щодо стаціонарного потоку ДСТУ ГОСТ 8.586.1-5:20009 (ISO 5167.1-4:2003) [1–5].

Величина турбулентних флуктуацій збільшується за збільшення шорсткості трубопроводу, тому в стандартах [1–5] встановлене обмеження щодо максимальної допустимої шорсткості трубопроводу на ділянці перед пристроєм звуження потоку (ПЗП).

Аналіз джерел [5–13], які стосуються дослідження пульсуючих потоків, показав, що основними джерелами пульсацій є: а) зворотно-поступальний рух поршнів компресорів, насосів, вентиляторів тощо; б) вібрації трубопроводу та регулювального обладнання на ньому; в) періодичне спрацювання та коливання регулювального обладнання (клапани тощо); г) завихрення на предметах, встановлених у трубопроводі (гільза термометра, фільтр тощо); д) самозбуджувальні коливання потоку на трійниках; е) геометрична конфігурація трубопроводу та фазовий склад потоку з можливим утворенням корків (в промислових трубопроводах).

Пульсації можуть розповсюджуватися як за напрямом потоку, так і проти напрямку потоку, тому джерело пульсацій може знаходитися як до, так і після вузла вимірювання витрати. Залежно від відстані до джерела пульсацій, а також за рахунок впливу стискуваності середовища (як для рідин, так і для газів) амплітуда пульсацій на вимірювальній ділянці може бути малою і навіть невідчутною. Діапазон частот пульсацій становить від десятих герца до кількох сотень герц [6], а діапазон амплітуд пульсацій стосовно середнього значення витрати становить від кількох відсотків до 100 % і більше. За малих значень амплітуд пульсацій постає питання розрізнення між пульсаціями та турбулентностями потоку.

Отже, внаслідок названих причин потік стає нестаціонарним, тобто таким, що значення його основних параметрів змінюються в часі. Більшість джерел нестаціонарності формують зміну параметрів потоку, що відповідає певному частотному піддіапазону. Тому для аналізу впливу нестаціонарності потоку на процес вимірювання витрати доцільно розділити частотний спектр параметрів потоку на піддіапазони. Це дасть змогу виконувати аналіз впливу пульсацій окремого частотного піддіапазону на процес вимірювання витрати і відповідно визначати вплив окремих джерел пульсацій на похибку витратоміра. Авторами пропонується такий поділ спектра на піддіапазони:

а) низькочастотні пульсації потоку – характер зміни параметрів потоку, зумовлений технологічним режимом роботи вимірювального трубопроводу (ВТ) за звітний період часу (переважно – різноманітні перехідні процеси, пов'язані з режимом надходження і споживання середовища, зокрема і пульсуючі процеси);

б) середньочастотні пульсації потоку – пульсації основних параметрів потоку середовища, зумовлені амплітудно-частотним спектром витрати на вході у ВТ (залежить від типу джерела потоку і АЧХ системи подавання середовища до ВТ) і власними динамічними властивостями ВТ;

в) високочастотні пульсації – пульсації будь-яких параметрів у ВТ, пов'язані з акустичними ефектами, резонансними явищами у вимірювальному трубопроводі та імпульсних лініях витратоміра, турбулентними пульсаціями.

Основним інформативним параметром витратомірів змінного перепаду тиску є різниця тиску до та після пристрою звуження потоку. За режимом зміни перепаду тиску на пристрої звуження можна зробити висновок про режим зміни витрати у трубопроводі. Для цього необхідно визначити такі параметри сигналу перепаду тиску:

– відносне відхилення низькочастотних пульсацій перепаду тиску

$$\tilde{\Delta}(\Delta p) = \pm \frac{\Delta(\Delta p)}{\Delta p}; \quad (1)$$

– відносну середньоквадратичну амплітуду середньочастотних пульсацій перепаду тиску

$$\tilde{\Delta}p_s = \frac{\Delta p_s}{\Delta p}, \quad (2)$$

де середньоквадратичну амплітуду пульсацій перепаду тиску обчислюють за залежністю:

$$\Delta p_s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\Delta p(\tau)_i - \overline{\Delta p}]^2}{n}}, \quad (3)$$

де $i = 1 \dots n$ – номер точки вимірювання; n – кількість точок вимірювання за проміжком часу вимірювання; $\Delta(\Delta p)$ – відхилення миттєвого значення перепаду тиску від його середнього значення; $\overline{\Delta p}$ – середнє значення перепаду тиску на інтервалі вимірювання.

Залежно від діапазону зміни амплітуди пульсацій перепаду тиску, відносної середньоквадратичної амплітуди його пульсацій, відносного відхилення перепаду тиску і частоти його пульсацій, у [5] запропоновано таку умовну класифікацію режимів руху середовища:

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

Умовою реалізації стаціонарного режиму руху є виконання таких вимог:

а) значення відносного відхилення низькочастотних пульсацій перепаду тиску задовольняє умову

$$\tilde{\Delta}(\Delta p) \leq 0,14;$$

б) значення відносної середньоквадратичної амплітуди середньочастотних пульсацій перепаду тиску

$$\Delta \tilde{p}_s \leq 0,1;$$

в) миттєве значення $\Delta p(\tau)$ повинно знаходитись в робочому діапазоні ЗВ Δp .

2. 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 Δp ;

в) відносна середньоквадратична амплітуда середньочастотних пульсацій

$$0,1 < \Delta \tilde{p}_s \leq 0,5.$$

3. 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 звітний період

$$\tilde{\Delta}(\Delta p) > 0,14;$$

б) відносна середньоквадратична амплітуда середньочастотних пульсацій

$$\Delta \tilde{p}_s \leq 0,1;$$

в) миттєве значення $\Delta p(\tau)$ повинно знаходитись в робочому діапазоні ЗВ Δp .

4. 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) відносно відхилення миттєвого значення низькочастотних пульсацій перепаду тиску за звітний період часу

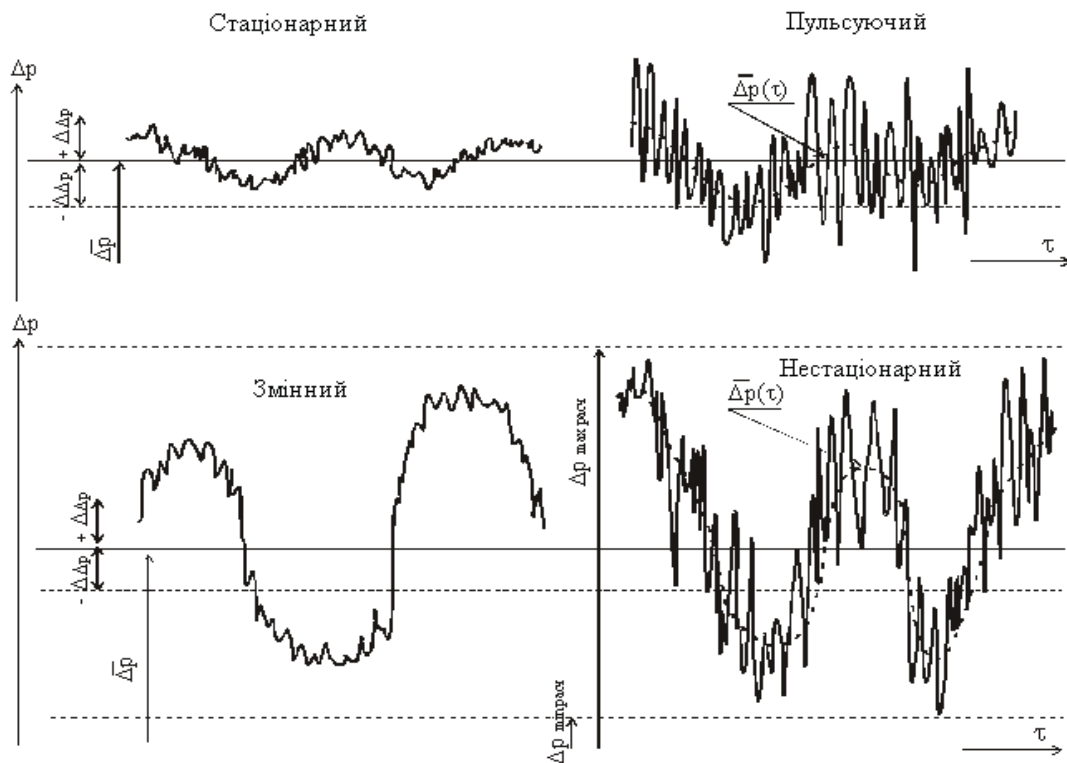
$$\tilde{\Delta}(\Delta p) > 0,14;$$

б) низькочастотна складова зміни перепаду тиску $\overline{\Delta p}(\tau)$ повинна знаходитись в робочому діапазоні ЗВ Δp ;

в) відносна середньоквадратична амплітуда середньочастотних пульсацій

$$0,1 < \Delta \tilde{p}_s \leq 0,5.$$

Приклади реалізацій сигналів перепаду тиску для усіх чотирьох режимів руху потоку показано на рисунку.



Сигнали перепаду тиску на діафрагмі для усіх чотирьох режимів нестационарного потоку природного газу

Наявність пульсацій потоку призводить до виникнення похибок внаслідок:

- усереднення кореня квадратного;
- дії місцевого прискорення;
- зміни коефіцієнта витікання;
- дії акустичних та резонансних явищ у вимірювальному трубопроводі;
- наявності нелінійних опорів та резонансних явищ у імпульсних трубках.

Для стаціонарного потоку витрата через пристрій звуження (діафрагму, сопло, витратомірну трубу) пропорційна до кореня квадратного з перепаду тиску у ній. Якщо вдається застосувати рівняння витрати для розрахунку миттєвих значень витрати нестационарного потоку, то інтегральне, а відповідно і середнє значення витрати за деякий інтервал часу може бути отримане за допомогою сумування миттєвих значень витрати. Однак часто реалізувати розрахунок миттєвого значення витрати в реальному часі не вдається. Тоді обчислюють усереднене значення витрати за усередненими значеннями параметрів потоку, у тому числі за усередненим значенням перепаду тиску на певному інтервалі часу. Крім того, багато перетворювачів перепаду тиску внаслідок своїх динамічних властивостей також виконують усереднення перепаду тиску.

Застосування усередненого в часі сигналу перепаду тиску для вимірювання усередненої в часі витрати призводить до виникнення похибки усереднення кореня квадратного, оскільки

$$\left(\overline{\Delta p}\right)^{1/2} \neq \overline{\left(\Delta p\right)^{1/2}}. \quad (4)$$

Похибка вимірювання усередненого значення витрати може бути визначена за залежностями, запропонованими в [7]. Зокрема математичне сподівання витрати визначається із рівняння

$$E_d(Q_c) = k \sqrt{\frac{E(\Delta P) \cdot E(P)}{E(T)}} \left(1 - \frac{\tilde{\sigma}^2(\Delta P)}{8} - \frac{\tilde{\sigma}^2(P)}{8} + \frac{3\tilde{\sigma}^2(T)}{8}\right), \quad (5)$$

де $E(\Delta P)$, $E(P)$ і $E(T)$ – математичні сподівання вимірювальних параметрів потоку відповідно ΔP , P і T ; $E_d(Q_c)$ – дійсне значення математичного сподівання витрати Q_c , зведеної до стандартних умов, $\tilde{\sigma}^2(\Delta P)$, $\tilde{\sigma}^2(P)$ і $\tilde{\sigma}^2(T)$ – відносні дисперсії вимірюваних параметрів потоку.

Із (5) зрозуміло, що коливання параметрів ΔP і P зменшують дійсне значення $E_d(Q_c)$, а коливання температури T збільшують $E_d(Q_c)$. У зв'язку з цим неврахування відносних дисперсій $\tilde{\sigma}^2(\Delta P)$ і $\tilde{\sigma}^2(P)$ завищує середнє значення витрати, а неврахування дисперсії $\tilde{\sigma}^2(T)$ занижує його.

Відносна похибка вимірювання середнього значення витрати має такий вигляд:

$$\delta_{\bar{Q}_c} = \frac{100}{8[\tilde{\sigma}^2(\Delta P) + \tilde{\sigma}^2(P) - 3\tilde{\sigma}^2(T)]^{-1} - 1}. \quad (6)$$

Значення відносних дисперсій параметрів потоку можуть знаходитися в межах від 0 до 1, однак проведені статистичні дослідження показали, що для витратомірів газу значення вказаних дисперсій не перевищують 0,2 [7]. Незважаючи на це, похибка $\delta_{\bar{Q}_c}$ може приймати великі значення.

Для підтвердження аналітичних залежностей (5) і (6) щодо визначення похибок усередненого значення витрати газу під час вимірювання методом змінного перепаду тиску автори виконали такий математичний експеримент:

1) сформовано сигнали зміни перепаду тиску, які за статистичними характеристиками та формою амплітудно-частотного спектра відповідають чотирьом режимам руху газу за наведеною вище класифікацією (рисунок). Для сигналу кожного режиму отримано математичне сподівання $E(\Delta P)$ та відносну дисперсію сигналу $\tilde{\sigma}^2(\Delta P)$;

2) для кожного окремого режиму за визначеними значеннями дисперсії сигналу перепаду тиску за формулою (6) обчислено значення похибки $\delta_{\bar{Q}_c}$, яка виникає внаслідок усереднення значень перепаду тиску;

3) обчислили миттєві значення витрати Q_i для кожної дискрети сигналів перепаду тиску. У такий спосіб отримали сигнал зміни миттєвого значення витрати у трубопроводі та знайшли математичне сподівання значення витрати $E(Q)$ для кожного окремого режиму руху;

4) за значеннями математичних сподівань обчислили усереднене значення витрати $Q(E(P), E(\Delta P))$ упродовж часу реалізації сигналів;

5) отримали відносне відхилення усередненого значення витрати $Q(E(P), E(\Delta P))$ від математичного сподівання значення витрати $E(Q)$ за формулою

$$\delta = \frac{Q(E(P), E(\Delta P)) - E(Q)}{E(Q)} 100 \%. \quad (7)$$

У таблиці наведено порівняння отриманих значень похибок $\delta_{\bar{Q}_c}$ та δ для різних значень відносної дисперсії перепаду тиску. Значення відносних дисперсій тиску та температури для усіх чотирьох режимів дорівнює нулю.

Порівняння похибок визначення усередненого значення витрати

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

Отримані результати математичного експерименту підтверджують аналітичні залежності (5), (6) 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. Незначні відхилення між значеннями похибок $\delta_{\bar{Q}_c}$ та δ є наслідком того, що в прикладі розглянуто порівняно коротку реалізацію сигналу перепаду тиску.

Коли витрата швидко змінюється, у перепад тисків необхідно ввести складову, яка описуватиме місцеве прискорення додатково до складової, що описує конвективне прискорення середовища на пристрої звуження потоку:

$$\Delta p = K_1 \frac{dQ_m}{dt} + K_2 Q_m^2. \quad (8)$$

Перший член правої частини рівняння (8) відповідає за місцеве прискорення, а другий – за конвективну інерційність. Член місцевого прискорення залежить від безрозмірної частоти, яка відома як число Струхаля Sh , а також від геометричних розмірів пристрою звуження потоку і відстані між осями отворів для відбору тисків.

За наявності пульсацій потоку профілі швидкостей до ПЗП та у ПЗП змінюються циклічно і тому коефіцієнти K_1 і K_2 також змінюються циклічно, а їх середні значення не дорівнюють значенням за стаціонарного потоку, за винятком випадків, коли амплітуда та частота пульсацій є малими.

Спроби оцінити вплив місцевого прискорення тільки числом Струхаля без урахування амплітуди пульсацій приводить до невизначених і неоднозначних висновків. Так, у [8] рекомендується не враховувати додаткової похибки від дії місцевого прискорення, якщо $Sh < 0.002$, тоді як в [9] вказується, що лише за $Sh > 1$ виникають значні похибки. У [10] на підставі досліджень, виконаних із діафрагмою з відносною площею 0.39, вказується, що вплив нестационарності потоку виявляється лише за $Sh > 0.02$.

За збільшення частоти пульсацій похибка, викликана впливом місцевого прискорення, зростає. Врахувати цю похибку дуже важко, незважаючи на багато досліджень, скерованих на виявлення залежності її від частоти і амплітуди пульсації. Запропоновані критерії [9] для оцінки похибки, включаючи число Струхаля, виявилися не універсальними. Тому виникає потреба в подальшому дослідженні впливу місцевого прискорення на похибку витратомірів змінного перепаду тиску.

Коефіцієнт витікання для різних типів пристроїв звуження в умовах стаціонарного потоку залежить від профілю швидкостей потоку на вході пристрою звуження. Діафрагми є особливо чутливими до змін профілю швидкостей потоку за рахунок ефекту звуження струменя потоку. Плоскіший по відношенню до нормального профіль швидкостей збільшує ефект звуження струменя потоку і, як наслідок, зменшує коефіцієнт витікання. Загостреніший профіль швидкостей приводить до протилежного результату.

У потоці з пульсаціями миттєвий профіль швидкостей змінюється впродовж циклу пульсацій. Величина зміни залежить від амплітуди пульсацій швидкості, форми хвилі та числа Струхаля.

Внаслідок цього миттєве значення коефіцієнта витікання також залежить від фази циклу пульсацій, амплітуди пульсацій, форми хвилі та числа Струхаля. Однак, за висновками ISO/TR 3313 [6], в якому інтегрований досвід багатьох європейських дослідників, сьогодні немає результатів досліджень, які б дали змогу математично пов'язати миттєве значення коефіцієнта витікання з параметрами пульсацій. Отже, у [6] рекомендується за наявності пульсацій потоку застосовувати постійне значення коефіцієнта витікання, яке застосовується в умовах стаціонарного потоку. Такий підхід дасть добрі результати для нестискуваного середовища за малих амплітуд та частот пульсацій і відповідно мінімальні значення поправкових коефіцієнтів для витрати. Додаткові похибки за рахунок впливу тимчасової інерційності та змін коефіцієнта витікання збільшуються за збільшення амплітуди та частоти пульсацій, як це показано у [12].

Разом з хвилями швидкості за пульсуючих витрат виникають і хвилі тиску, що переміщуються із швидкістю звуку. Вони відбиваються від різних перешкод на своєму шляху, зокрема і від стінки діафрагми, і за умов, що сприяють виникненню резонансу у трубопроводах, в останніх можуть утворюватися „стоячі хвилі”. Це може спотворити розподіл тиску у трубопроводі, пов'язаний з рухом потоку, і відповідно спотворити вимірюване значення перепаду тиску на пристрої звуження. Похибка вимірювання перепаду тиску може виникати також через високочастотні коливання (більше 1000 Гц) [13], так звані звукові шуми, що виникають з різних причин, наприклад, під час витікання струменя газу з регулювального клапана. Врахувати вплив перерахованих акустичних явищ на точність вимірювання складно, але вони є причиною великих похибок під час вимірювання витрат пульсуючих потоків. Акустичними ефектами можна знехтувати, якщо діаметр отвору діафрагми малий порівняно з довжиною четвертої частини звукової хвилі [13]. Тобто для діаметра, який є меншим за 100 мм, допустимі частоти становлять 50–75 Гц. Виконання цієї вимоги дійсно необхідне, але воно може виявитися недостатнім у разі виникнення резонансу у вимірювальному трубопроводі.

Імпульсні трубки, які з'єднують отвори для відбору тиску із камерами дифманометра, ПЗП і дифманометр можуть бути додатковим джерелом похибок під час вимірювання пульсуючих витрат через можливу нерівність опорів обох трубок, а також наявність нелінійних опорів в трубках. Під час вимірювання пульсуючих витрат речовина, що знаходиться в сполучних трубках, безперервно переміщується в той чи інший бік. Тому за умови наявності нелінійних опорів вони спотворюють передачу перепаду тиску тим більшими, чим більшими є несиметричні форми пульсацій. При цьому тиск в кінці трубки може виявитися і меншим, і більшим від середнього. Слід застосовувати лише повністю відкриті прямооточні крани. Під час вимірювання пульсуючих витрат нерідко вимагається демпфувати сполучні лінії. Однак для цього не рекомендується встановлювати на імпульсних лініях комбінації із звужень і смностей, оскільки їх опір нелінійний і залежить від напрямку руху. Необхідно уникати спотворення форми та фази хвилі тиску у будь-якій із з'єднувальних ліній (за рахунок тертя, наявності нелінійностей). Крім того, довжина з'єднувальних ліній повинна бути обмежена і не бути кратною $1/4$ довжини хвилі пульсацій для уникнення резонансу [6].

Висновки. Основними причинами виникнення додаткових похибок витратомірів змінного перепаду тиску в умовах нестаціонарного потоку є: усереднення кореня квадратного із перепаду тиску, неврахування зміни перепаду тиску внаслідок дії місцевого прискорення, зміна коефіцієнта витікання, дія акустичних явищ у вимірювальному трубопроводі та імпульсних лініях, наявність нелінійних опорів в імпульсних лініях вимірювальних перетворювачів.

Похибка вимірювання витрати, яка виникає внаслідок усереднення перепаду тиску та температури, може бути визначена за залежностями, запропонованими в [7]. Шляхом математичного експерименту автори підтвердили правильність аналітичних залежностей [7] та показали, що визначення витрати природного газу за усередненими значеннями тиску газу та перепаду тиску на діафрагмі приводить до завищення значення витрати. Завищення витрати, знайденої за усередненими значеннями, тим більше, чим більшою є дисперсія, зокрема, перепаду тиску.

Рекомендації відомих джерел щодо врахування впливу місцевого прискорення на похибку вимірювання витрати є неоднозначними. Незаперечною є тільки якісна закономірність: за збільшення частоти пульсацій похибка, викликана впливом місцевого прискорення, зростає. Тому виникає потреба подальшого дослідження впливу місцевого прискорення на похибку витратомірів змінного перепаду тиску.

Сьогодні також не відомі результати досліджень, які б уможливили математично пов'язати миттєве значення коефіцієнта витікання з параметрами пульсацій та врахувати вплив акустичних явищ у вимірювальному трубопроводі та імпульсних лініях. Загальні рекомендації щодо проектування витратомірів змінного перепаду тиску дають змогу частково усунути вплив названих явищ, однак потребують уточнення.

1. ДСТУ ГОСТ 8.586.1:2009. Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини і газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. – Ч. 1: Принцип методу вимірювань та загальні вимоги (ГОСТ 8.586.1–2005(ИСО 5167-1:2003), IDT; ISO 5167-1:2003, MOD). 2. ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009. Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини і газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. – Ч. 2: Діафрагми. Технічні вимоги (ГОСТ 8.586.2–2005(ИСО 5167-2:2003), IDT; ISO 5167-2:2003, MOD). 3. ДСТУ ГОСТ 8.586.3:2009. Метрологія Вимірювання витрати та кількості рідини і газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. – Ч. 3: Сопла та сопла Вентурі. Технічні умови (ГОСТ 8.586.3–2005 (ИСО 5167-3:2003), IDT; ISO 5167-3:2003, MOD). 4. ДСТУ ГОСТ 8.586.4:2009. Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини і газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. – Ч. 4: Труби Вентурі. Технічні вимоги (ГОСТ 8.586.4–2005 (ИСО 5167-4:2003), IDT; ISO 5167-4:2003, MOD). 5. ДСТУ ГОСТ 8.586.5:2009. Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини і газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. – Ч. 5.: Методика виконання вимірювань (ГОСТ 8.586.5–2005, IDT). 6. ISO/TR 3313:1998 Measurement of fluid flow in closed conduits – Guidelines on the effects of flow pulsations on flow-measurement instruments. 7. Пустун Е.П. О погрешностях определения среднесуточного значения расхода газа, измеряемого методом переменного перепада давления. – К., 2000. 8. Oppenheim A.K., Ghilton E.G. Pulsating Flow Measurement- a literature survey // Trans. ASME. 1955. Vol.77. N 2. P.231-248. 9. 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. 10. Дробышева Н.А., Нукифоров А.Н. Измерение нестационарных расходов с помощью сужающих устройств // Метролог. обесп. измер. – М.: ВНИИКИ, 1984. – Вып. 3. – 32 с. 11. Estel E. Durchflusszahl von Normdusen und Druckfall in Rohren bei pulsierender Stromung // Physika-lische Zeitschrift. 1937. Bd.38. – S. 748–758. 12. GAJAN, P., MOTTRAM, R.C., HEBRARD, P., ANDRIAMIHAFY, H. and PLATET, B. The influence of pulsating flow on orifice plate flowmeters. Flow Measurement and Instrumentation, 3 (3), 1992. – P. 1118–1129. 13. Floyd J.H. The effect of high frequency pulsations on differential meter accuracy // Pipe Line News. – 1963. – Vol.35, N 2. – P. 19–23.