

**НАУКОВІ ТА ПРАКТИЧНІ ПРОБЛЕМИ ВИРОБНИЦТВА
ПРИЛАДІВ ТА СИСТЕМ**

УДК 681.121.84:519.85

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПНЕВМАТИЧНОГО КАНАЛУ
ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ТИСКУ ГАЗУ***Матіко Ф. Д., Костик І. В., Матіко Г. Ф., Онисик С. Б.**Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна**E-mail: fedir.d.matiko@lpnu.ua*

Стаття присвячена дослідженню впливу експлуатаційних чинників, зокрема витікання газу через нещільності (пошкодження) пневматичних каналів вимірювальних перетворювачів тиску та перепаду тиску газу, на результат вимірювання цих параметрів, а отже і на вимірюване значення витрати та об'єму газу за методом змінного перепаду тиску. Під час експлуатації вузлів обліку газу з'єднувальні трубки, вентиляльні блоки, камери усереднення звужувального пристрою повинні бути герметичними. Проте внаслідок дії експлуатаційних факторів, можлива їх розгерметизація та поява витоків газу. Такі витіки спотворюють вимірюване значення перепаду тиску або тиску, що може призводити до спотворення результату вимірювання витрати газу вузлом обліку.

Авторами розроблено математичну модель пневматичного каналу вимірювального перетворювача тиску газу з наявним пошкодженням. Для цього розроблено математичну модель з'єднувальної трубки, яка сполучає камеру усереднення тиску з камерою вимірювального перетворювача тиску, для стаціонарного режиму руху газу. Також розроблено математичну модель процесу витікання газу через нещільності виду "наскрізний отвір". На основі об'єднання математичної моделі з'єднувальної трубки та моделі процесу витікання газу через наскрізний отвір отримано математичну модель пневматичного каналу з отвором витікання газу.

Виконано моделювання та дослідження впливу тиску газу, геометричних характеристик пошкодження та з'єднувальної лінії на результат вимірювання тиску чи перепаду тиску. Зокрема, обчислено значення від'ємної систематичної похибки вимірювання тиску газу, що виникає внаслідок витікання газу через нещільність з'єднувальної трубки, для набору фіксованих значень геометричних характеристик пневматичного каналу. Показано, що зростання тиску у вимірювальному трубопроводі призводить до зростання за модулем абсолютної похибки вимірювання цього тиску, що зумовлена витіканням газу через нещільності з'єднувальної трубки. Витрата витікання газу через отвір у з'єднувальній трубці, а, відповідно, і похибка вимірювання тиску залежать від діаметра наскрізного отвору та місця виникнення нещільності. Зростання діаметра отвору призводить до зростання за модулем абсолютної похибки вимірювання тиску. Із збільшенням довжини з'єднувальної трубки від точки з'єднання з вимірювальним трубопроводом до точки витікання газу похибка вимірювання тиску зростає за модулем.

Ключові слова: вимірювальний перетворювач тиску; з'єднувальні трубки; витікання газу; математична модель; систематична похибка.

Вступ. Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень

Сьогодні для вимірювання витрати плинних середовищ, зокрема і природного газу, застосовують різні методи вимірювання, зокрема, метод змінного перепаду тиску на основі стандартних звужувальних пристроїв. При цьому точність обліку газу напряму впливає на прозорість розрахунків між постачальником, розподільчою організацією та споживачем природного газу [1, 2]. Практичну оцінку точності обліку за методом змінного перепаду тиску проводять, обчислюючи невизначеність результату вимірювання витрати та об'єму природного газу. Цей підхід регламентовано в

Міжнародних (ISO 5167:2003) і Національних стандартів України [3-5].

Облік природного газу за методом змінного перепаду тиску потребує одночасного застосування вимірювального перетворювача перепаду тиску, температури, тиску та мікропроцесорного обчислювача об'єму газу. Будь-які неточності в роботі цих пристроїв, чи внаслідок їх внутрішніх несправностей або неточних алгоритмів розрахунку витрати та об'єму, чи під дією зовнішніх факторів (нештатні ситуації та аварії), будуть впливати на невизначеність результату вимірювання витрати та об'єму природного газу [1-5].

Для проведення вимірювань за методом змінного перепаду тиску всередину трубопроводу, в якому протікає вимірюване середовище, поміщають пристрій, який формує звуження потоку. Найчастіше, таким звужувальним пристроєм слугує камерна діафрагма, встановлена між камерами усереднення тиску [4].

Підведення газу від вимірювального трубопроводу (камер усереднення тиску) до камер вимірювальних перетворювачів перепаду тиску та тиску здійснюють за допомогою з'єднувальних трубок (імпульсних трубок). Конструктивне виконання з'єднувальних трубок (ЗТ) разом із запірною арматурою, що встановлена на них, має бути таким, щоб передати без спотворень тиск з порожнини газопроводу до камер вимірювальних перетворювачів перепаду тиску та тиску. Вимоги до з'єднувальних трубок, які забезпечують таке виконання, наведені в ДСТУ 8.586.5:2009 [5].

Під час експлуатації вузлів обліку газу з'єднувальні трубки, вентиляльні блоки (маніфольди), камери усереднення звужувального пристрою повинні бути герметичними; це стосується як вузлів обліку газу на основі методу змінного перепаду тиску, так і вузлів обліку на основі лічильників газу. Проте внаслідок дії експлуатаційних факторів, можлива їх розгерметизація та поява витоків газу із з'єднувальних трубок. Такі витіки певною мірою спотворюють вимірюване значення перепаду тиску (або тиску), що може призводити до спотворення результату вимірювання витрати газу вузлом обліку газу. Водночас, спотворення вимірюваного значення перепаду тиску (або тиску) відбувається при витіканні природного газу із ЗТ, яка сполучає камеру "+" вимірювального перетворювача перепаду тиску з камерою усереднення тиску перед звужувальним пристроєм, а також і при витіканні природного газу із ЗТ, що сполучає камеру "-" вимірювального перетворювача перепаду тиску з камерою усереднення тиску після звужувального пристрою. Отже, виникають додаткові складові невизначеностей вимірювання тиску, перепаду тиску а, відповідно і витрати газу. Тому актуальним є дослідження впливу витікання газу через нещільності з'єднувальних трубок перетворювача перепаду тиску та перетворювача тиску на результат вимірювання цих параметрів, а, відповідно, на результат вимірювання витрати та об'єму газу.

Вимоги до імпульсних ліній вимірювальних перетворювачів тиску (перепаду тиску), а також до їх інсталяції детально розглянуто у роботі [6]. Тут показано чисельні приклади монтажу імпульсних ліній із врахуванням рекомендацій міжнародних стандартів, а також досвіду відомих світових виробників засобів вимірювання витрати плинних середовищ. Однак у роботі [6] не розглянуто вплив нещільностей чи пошкоджень імпульсних ліній на результат вимірювання тиску (перепаду тиску). У роботі [7] автори розглядають вплив багатьох фак-

торів на процес вимірювання витрати природного газу та обсяги необлікованого газу. Однак характеристикам імпульсних ліній тут надано мало уваги.

У монографії [8] розглянуто принципи застосування, характеристики та конструкцію звужувальних пристроїв (діафрагми, труби Вентурі), зокрема детально розглянуто конструктивні вимоги до відборів тиску та імпульсних ліній перетворювачів тиску (перепаду тиску). У [8], а також у [9] розглянуто особливості вимірювання витрати пульсуючих потоків, зокрема і рекомендації щодо виконання імпульсних ліній перетворювачів тиску (перепаду тиску), застосованих у системах вимірювання витрати пульсуючих та нестационарних потоків.

Отже, вплив нещільностей (пошкоджень) імпульсних ліній вимірювальних перетворювачів тиску (перепаду тиску) на результат вимірювання цих параметрів, а, відповідно, на результат вимірювання витрати недостатньо досліджений у відомих джерелах, тому потребує подальших досліджень, зокрема і методами математичного моделювання.

Метою роботи є розроблення математичної моделі пневматичного каналу вимірювального перетворювача тиску газу та дослідження впливу тиску газу, геометричних характеристик пошкодження та з'єднувальної лінії на результат вимірювання тиску/перепаду тиску.

Розроблення математичної моделі пневматичного каналу

З метою дослідження впливу витіку природного газу у пневматичних лініях перетворювачів перепаду тиску (ППТ) і перетворювачів тиску (ПТ) на виміряне значення, необхідно розробити математичну модель пневматичного каналу, який сполучає камеру усереднення "+" або камеру "-" звужувального пристрою (ЗП) з камерою ППТ, або камеру усереднення "+" з ПТ.

Схема пневматичного каналу "вимірювальний трубопровід – з'єднувальна трубка – камера вимірювального перетворювача" зображена на рис. 1.

Розроблення математичної моделі виконано із врахуванням таких припущень:

1. Об'єм камери вимірювального перетворювача перепаду тиску чи тиску не змінюється протягом періоду дослідження ($V_K = const$).
2. Молярна маса природного газу (склад газу) не змінюється протягом періоду дослідження ($M = const$).
3. Температура природного газу не змінюється протягом періоду дослідження ($T = const$).

Доцільно розглянути стаціонарний (устале-ний) режим протікання газу через пневматичний канал. Зокрема, такий режим може відтворити стан пневматичного каналу як в умовах, коли параметри газу є незмінними в часі, так і під час невелико-

го інтервалу часу динамічного режиму, протягом якого параметри газу можна вважати умовно постійними.

Для опису залежності швидкості потоку від параметрів газу та конструктивних характеристик каналу застосовано рівняння Дарсі-Вейсбаха [10]:

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho, \quad (1)$$

де ΔP – втрати тиску газу по довжині вимірювального трубопроводу (ВТ), Па; λ – коефіцієнт гідрав-

лічного тертя, визначається залежно від значення числа Рейнольдса; L – довжина з'єднувальної трубки, м; ця довжина може включати еквівалентну довжину трубки, що відтворює вплив місцевих гідравлічних опорів, наявних у з'єднувальній трубці; D – внутрішній діаметр з'єднувальної трубки, м; v – швидкість руху природного газу, м/с; ρ – густина природного газу, кг/м³.

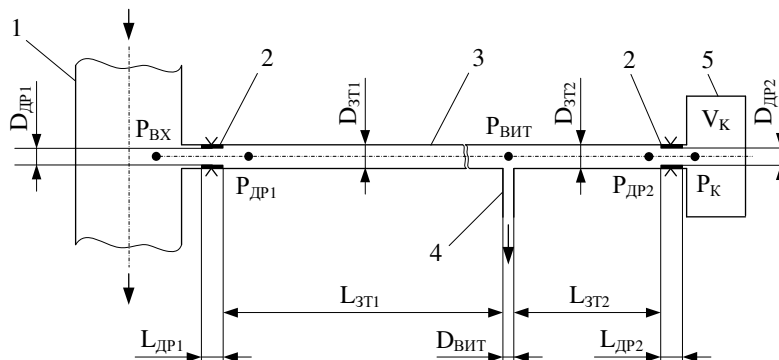


Рис. 1. Схема з'єднувальної трубки та перетворювача тиску (перепаду тиску): 1 – вимірювальний трубопровід; 2 – дросель (вентиль, запірні арматура); 3 – з'єднувальна трубка; 4 – місце витікання (пошкодження ЗТ); 5 – камера перетворювача тиску (перепаду тиску)

Тиск газу $P_{ВИТ}$ у точці, де виявлена нещільність ЗТ та відбувається витікання газу в атмосферу, пропонуємо визначати за рівнянням:

$$P_{ВИТ} = P_{ДР1} - \lambda \cdot \frac{L_{ЗТ1}}{D_{ЗТ1}} \cdot \frac{v_{ЗТ1}^2}{2} \cdot \rho_{ЗТ1}, \quad (2)$$

де $P_{ДР1}$ – тиск на виході з першого дроселя; $L_{ЗТ1}$ – довжина з'єднувальної трубки; $D_{ЗТ1}$ – діаметр з'єднувальної трубки; $v_{ЗТ1}$ – швидкість руху природного газу у з'єднувальній трубці; $S_{ЗТ1}$ – площа поперечного перерізу з'єднувальної трубки; $\rho_{ЗТ1}$ – густина природного газу у з'єднувальній трубці.

Отже, враховуючи закон збереження маси та рівняння (1), (2), авторами отримана математична модель ЗТ, що сполучає плюсову або мінусову камери ЗП з ППТ, а також з ПТ, для стаціонарного режиму руху газу:

$$\begin{cases} Q_{ВИТ} = Q_c \cdot \frac{\rho_c}{\rho} \\ P_{ВИТ} = \left(P_{ВХ} - \frac{A}{P_{ВХ}} \right) - \frac{B}{P_{ВХ} - \frac{A}{P_{ВХ}}} \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{де } A = \lambda \cdot \frac{L_{ДР1}}{D_{ДР1}} \cdot \frac{Q_c^2 \cdot \rho_c}{2 \cdot S_{ДР1}^2} \cdot \frac{P_c \cdot T \cdot K_{ДР1}}{T_c};$$

$$B = \lambda \cdot \frac{L_{ЗТ1}}{D_{ЗТ1}} \cdot \frac{Q_c^2 \cdot \rho_c}{2 \cdot S_{ЗТ1}^2} \cdot \frac{P_c \cdot T \cdot K_{ЗТ1}}{T_c};$$

Q_c – витрата газу через нещільності з'єднувальної трубки, зведена до стандартних умов, кг/с; ρ_c – густина природного газу за стандартних умов, кг/м³; $P_{ВХ}$ – тиск на вході в ЗТ, Па.

Розроблення моделі процесу витікання газу через нещільності виду "наскрізний отвір"

Витрату газового середовища через отвір випускання визначають за залежностями, що отримані на основі формули витікання газу через насадку (формула Сен-Венана-Ванцеля) [11]:

$$G = \alpha \cdot S \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \chi}{\chi - 1} \cdot p_1 \cdot \rho_1 \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{\chi}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\chi+1}{\chi}} \right]}, \quad (4)$$

де G – масова витрата газу, кг/с; α – коефіцієнт витрати; S – площа отвору витікання газу, м²; χ – показник адіабати, який для діапазонів параметрів газу, характерних для газорозподільних мереж, слід обчислювати за методом ГОСТ 30319.1-1996; p_1, p_2 – абсолютний тиск газу, відповідно на вході та виході сопла, Па; ρ_1 – густина газу за робочих умов на вході сопла, кг/м³.

Густину газу на вході сопла доцільно обчислити за рівнянням

$$\rho_1 = \frac{p_1 T_c}{P_c T_1 K} \rho_c, \quad (5)$$

де, окрім відомих, p_1 – абсолютний тиск природного газу на вході сопла, Па; P_c , T_c – тиск та температура за стандартних умов ($P_c = 101325$ Па, $T_c = 293,15$ К); K – коефіцієнт стисливості, який може бути обчислений із використанням спрощених даних про склад газу (ρ_c , x_a , x_y) за методами ДСТУ ISO 12213, ГОСТ 30319.2-96 або за методикою ДССДД 4-2002 [12].

Підставивши (5) у (4), після нескладних перетворень отримуємо рівняння для знаходження об'ємної витрати, зведеної до стандартних умов:

$$Q_c = \alpha SP_1 \sqrt{\frac{2 \cdot \chi}{\chi - 1}} \sqrt{\frac{T_c}{P_c}} \sqrt{\frac{1}{\rho_c TK} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{\chi}} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\chi+1}{\chi}} \right]} \quad (6)$$

Формула (6) може бути застосована для розрахунку витрати газового середовища за умови, що відношення тиску на виході сопла до тиску на його вході є більшим від критичного.

Обчислити значення критичного відношення тисків для конкретного газового середовища можна за відомою формулою [10, 11]:

$$\left(\frac{P_2}{P_1} \right)_{кр} = \left(\frac{2}{\chi + 1} \right)^{\frac{\chi}{\chi - 1}} \quad (7)$$

Формулу для визначення витрати при відношенні тисків, що дорівнює або менше за критичне, отримують, підставивши у формулу (6) вираз критичного відношення тисків (7). Після деяких простих перетворень отримано таке рівняння витрати для критичного режиму витікання газу:

$$Q_c = \alpha SP_1 \sqrt{\frac{T_c}{P_c}} \left(\frac{2}{\chi + 1} \right)^{\frac{1}{\chi - 1}} \sqrt{\frac{2\chi}{(\chi + 1)\rho_c TK}} \quad (8)$$

Отже, витрату витікання газового середовища в атмосферу через наскрізний отвір необхідно обчислювати залежно від відношення тиску на виході сопла до тиску на його вході за формулою

$$Q_c = \begin{cases} \alpha SP \sqrt{\frac{2\chi}{\chi - 1}} \sqrt{\frac{T_c}{P_c}} \sqrt{\frac{1}{\rho_c TK} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{\chi}} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\chi+1}{\chi}} \right]}, \\ \text{для } \left(\frac{P_2}{P_1} \right) > \left(\frac{P_2}{P_1} \right)_{кр}; \\ \alpha SP \sqrt{\frac{T_c}{P_c}} \cdot \left(\frac{2}{\chi + 1} \right)^{\frac{1}{\chi - 1}} \cdot \sqrt{\frac{2\chi}{(\chi + 1)\rho_c TK}}, \\ \text{для } \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \leq \left(\frac{P_2}{P_1} \right)_{кр}, \end{cases} \quad (9)$$

де P_2 – барометричний тиск, Па.

Рівняння (9), на відміну від формул представлених у науково-технічних джерелах [10, 13], надає можливість обчислити витрату газового середовища зведено до стандартних умов. Рівняння містить параметри (показник адиабати, густину за стандартних умов, коефіцієнт стисливості), що залежать від фізико-хімічних властивостей середовища, тому надає можливість обчислити витрату для різних газових середовищ, зокрема, для природного газу та повітря.

У разі застосування рівняння (9) для конкретного середовища можуть бути обчислені критичні значення відношення тисків $(P_2/P_1)_{кр}$.

Усереднене значення показника адиабати для діапазонів зміни тиску та температури, характерних для газорозподільних мереж, становить: для природного газу $\chi = 1,306$; для повітря $\chi = 1,408$. Підставивши ці значення у формулу (7), отримуємо такі критичні відношення тисків: для природного газу $(P_2/P_1)_{кр} = 0,54$; для повітря $(P_2/P_1)_{кр} = 0,527$.

Отже, авторами отримано рівняння витрати витікання газу в атмосферу через наскрізний отвір у з'єднувальній трубці:

$$Q_c = \begin{cases} 0.1564\alpha SP \cdot \sqrt{\frac{1}{\rho_c TK} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{1.53} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{1.77} \right]}, \\ \text{для } \left(\frac{P_2}{P_1} \right) > 0,54; \\ 0.0359\alpha S \frac{P}{\sqrt{TK\rho_c}}, \\ \text{для } \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \leq 0,54. \end{cases} \quad (10)$$

Рівняння (10) може бути застосоване за умови, що відомі значення коефіцієнта витрати α . Цей коефіцієнт залежить і від геометричних характеристик сопла, і від режиму протікання газу. Зокрема, в роботах [10, 13] представлено результати досліджень витікання газу через отвори, конічні та профільовані сопла. Із цих результатів видно, що коефіцієнт витрати сопел залежить від геометричних характеристик, форми отвору, відношення тисків на виході та вході сопла та ін. параметрів.

На основі даних із [13] отримане таке рівняння коефіцієнта витрати

$$\alpha = 0,588 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^3 - 0,983 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^2 + 0,163 \left(\frac{P_2}{P_1} \right) + 0,843 \quad (11)$$

Для діапазону тиску газу в газорозподільних мережах ($0,1 \leq P \leq 1,2$ МПа) методична похибка рівняння (11) становить $\delta_m = 1,7\%$ із врахуванням похибки довідкових даних.

Для розрахунку витрати при критичному та надкритичному відношенні тисків слід застосову-

вати рівняння, отримане із врахуванням наступних положень: при критичному відношенні тисків швидкість газу в соплі досягає швидкості звуку, при подальшому зменшенні відношення вихідного та вхідного тисків швидкість газу в соплі і, отже, витрата в робочих умовах не змінюються. Хоча витрата в робочих умовах є постійною, витрата газу зведена до стандартних умов при надкритичному відношенні тисків збільшується із збільшенням густини газу, який протікає через отвір із постійною швидкістю.

Отже, авторами розроблена математична модель пневматичного каналу з наявними нещільностями для стаціонарного (усталеного) режиму руху у вигляді системи рівнянь (3), у якій для розрахунку витрати витікання газу в атмосферу через наскрізний отвір у з'єднувальній трубці слід застосувати рівняння (9).

Моделювання та дослідження впливу тиску газу, геометричних характеристик пошкодження та з'єднувальної лінії на результат вимірювання тиску/перепаду тиску

Як видно з рівнянь математичної моделі пневматичного каналу з нещільностями (3) і (9), тиск у точці витікання газу, а відповідно і витрата газу через нещільності, залежать від параметрів газу та характеристик пневматичного каналу, а також характеристик пошкодження з'єднувальної трубки, а саме:

- тиску газу на вході в з'єднувальну трубку $P_{ВХ}$ (див. рис. 1);
- довжини з'єднувальної трубки від точки з'єднання з вимірювальним трубопроводом до точки витікання газу із з'єднувальної трубки $L_{ОТВ}$; ця довжина може включати еквівалентну довжину трубки, що відтворює вплив місцевих гідравлічних опорів, наявних у з'єднувальній трубці;
- внутрішнього діаметра з'єднувальної трубки $D_{ЗТ}$;
- умовного діаметра отвору, що відтворює сумарну площу наскрізного пошкодження з'єднувальної трубки $D_{ВИТ}$, або діаметра d каналу витікання газу, утвореного різбовим з'єднанням, та довжини цього каналу l .

Для стаціонарного режиму руху газу у вимірювальному трубопроводі витратоміра, а відповідно і в з'єднувальній трубці, рух газу у секції з'єднувальної трубки від місця витікання газу до камери вимірювального перетворювача відсутній. Тому тиск газу в камері вимірювального перетворювача P_K буде дорівнювати тиску газу в точці пошкодження з'єднувальної трубки $P_{ВИТ}$. Отже, результат вимірювання тиску газу визначатиметься саме тиском у точці пошкодження з'єднувальної трубки $P_{ВИТ}$.

Для обчислення тиску газу $P_{ВИТ}$ у точці витікання газу із з'єднувальної трубки систему рівнянь

(3) розв'язано числовим методом. Тиск $P_{ВИТ}$ та витрата газу через отвір витікання є взаємопов'язаними параметрами, тому розв'язування системи рівнянь (3) виконано ітераційним шляхом.

Умову виходу з ітераційного процесу визначено за допустимим відхиленням тиску $P_{ВИТ}$ в попередній та поточній ітерації:

$$\frac{|P_{ВИТ(i)} - P_{ВИТ(i-1)}|}{P_{ВИТ(i)}} < 1 \cdot 10^{-8}. \quad (12)$$

З точки зору аналізу впливу витікання газу через нещільності з'єднувальної трубки на вимірюване значення тиску газу у ВТ, доцільно проаналізувати різницю тисків газу у вимірювальному трубопроводі (у вхідному отворі з'єднувальної трубки) та тиску газу в точці витікання. Ця різниця тисків $\Delta P_{ВИТ}$ є додатковою абсолютною похибкою вимірювання тиску газу, що зумовлена витіканням газу через нещільності з'єднувальної трубки:

$$\Delta P = \Delta P_{ВИТ} = P_{ВИТ} - P_{ВХ}. \quad (13)$$

Графіки залежностей похибки ΔP від тиску на вході в з'єднувальну трубку $P_{ВХ}$ та умовного діаметра наскрізного отвору $D_{ВИТ}$ від 0,1 до 4,0 мм для геометричних характеристик з'єднувальної трубки $D_{ЗТ} = 6$ мм, $L_{ОТВ} = 5$ м, $L_{ОТВ} = 10$ м представлені на рис. 2.

Аналіз результатів моделювання показує, що витікання газу через нещільності з'єднувальної трубки призводить до виникнення додаткової систематичної похибки вимірювання тиску газу, що має від'ємний знак; тобто занижує вимірюване значення тиску газу. Зростання тиску у вимірювальному трубопроводі призводить до зростання за модулем абсолютної похибки ΔP вимірювання цього тиску, що зумовлена витіканням газу через нещільності з'єднувальної трубки. Витрата витікання газу через отвір у з'єднувальній трубці, а, відповідно, і похибка вимірювання тиску залежать від діаметра наскрізного отвору $D_{ВИТ}$. Зростання діаметра отвору призводить до зростання за модулем абсолютної похибки ΔP .

Вплив витікання газу із з'єднувальної трубки на похибку вимірювання тиску залежить від місця виникнення нещільності. Із збільшенням довжини з'єднувальної трубки $L_{ОТВ}$ від точки з'єднання з вимірювальним трубопроводом до точки витікання газу похибка ΔP зростає. Похибка ΔP вимірювання тиску газу у вимірювальному трубопроводі залежить від втрат тиску під час руху газу від ВТ вздовж з'єднувальної трубки до місця витікання газу. Якщо витікання газу має місце на невеликій віддалі від місця з'єднання цієї трубки з вимірювальним трубопроводом, то вплив витікання газу на тиск у камері вимірювального перетворювача буде незначним. Це пояснюється тим, що газ не буде рухатися вздовж з'єднувальної трубки (оскільки компенсація витоків відбувається

у початковому фрагменті трубки) і, відповідно, вздовж з'єднувальної трубки не буде формуватися

втрата тиску, яка безпосередньо визначатиме зміну тиску в камері вимірювального перетворювача.

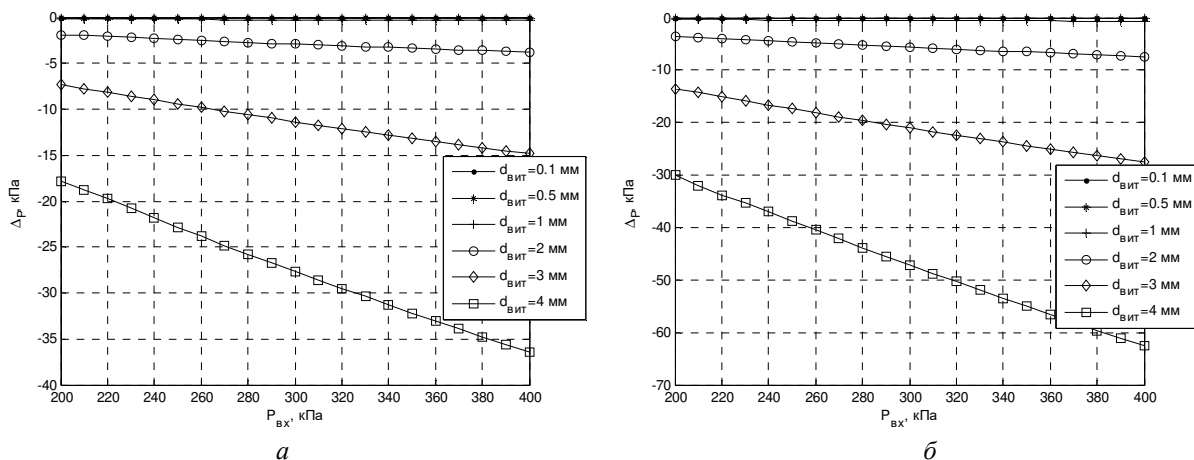


Рис. 2. Графіки залежності $\Delta P = f(P_{vx})$ для $D_{zt} = 6$ мм: а) довжина ЗТ від ВТ до точки витікання $L_{отв} = 5.0$ м; б) довжина ЗТ від ВТ до точки витікання $L_{отв} = 10$ м

Якщо витікання газу відбувається у місці з'єднання імпульсної трубки з вимірювальним перетворювачем тиску чи перепаду тиску, то вплив витікання газу на значення тиску у камері вимірювального перетворювача є більшим. Водночас, зміна тиску, обумовлена таким витіканням газу, визначатиметься довжиною з'єднувальної трубки, її внутрішнім діаметром, місцевими гідравлічними опорами у з'єднувальній трубці (за їх наявності) та інтенсивністю витікання газу через наявну нещільність. Всі ці фактори формують певний гідравлічний опір з'єднувальної трубки, який визначає втрати тиску під час руху газу від вимірювального трубопроводу до камери перетворювача перепаду тиску або тиску.

З точки зору визначення впливу додаткової систематичної похибки Δp на результат вимірювання тиску газу важливим є порівняння цієї похибки з граничною абсолютною похибкою вимірювального перетворювача тиску. Для порівняння з результатами моделювання застосуємо значення граничної абсолютної похибки вимірювального перетворювача з верхньою границею діапазону вимірювання 400 кПа, з основною приведеною похибкою 0,075 % та граничною абсолютною похибкою $\Delta_{гр} = 0,3$ кПа, оскільки саме такі високоточні перетворювачі застосовують у багатьох системах обліку природного газу.

Під час порівняння додаткової систематичної похибки ΔP з граничною абсолютною похибкою вимірювального перетворювача тиску ($\Delta_{гр} = 0,3$ кПа) визначено значення діаметра отвору витікання газу, за якого додаткова систематична похибка вимірювання тиску досягає основної похибки вимірювального перетворювача тиску. За результатами порівняльного аналізу можна зробити висновок, що для тиску газу в трубопроводі

400 кПа додаткова систематична похибка вимірювання тиску ΔP , зумовлена витіканням газу через отвір у з'єднувальній трубці, стає співмірною з основною похибкою вимірювального перетворювача тиску за умови, що діаметр отвору має значення більше 0,75 мм. Очевидно, що такий отвір легко виявити органолептичним способом навіть без застосування спеціальних приладів, а витікання газу через такий отвір супроводжується акустичними ефектами, які сприяють виявленню пошкоджень.

Висновки

У роботі запропонована математична модель пневматичного каналу вимірювального перетворювача тиску газу, а також виконано моделювання та дослідження впливу тиску газу, геометричних характеристик пошкодження та з'єднувальної лінії на результат вимірювання тиску/перепаду тиску. За результатами моделювання, можна зробити такі висновки:

- 1) Наявність нещільності з'єднувальної трубки та витікання газу через цю нещільність призводить до виникнення додаткової систематичної похибки вимірювання тиску газу, що має від'ємний знак; тобто наявність нещільності призводить до заниження вимірюваного значення тиску газу.
- 2) Зростання тиску у вимірювальному трубопроводі призводить до зростання за модулем абсолютної похибки Δp вимірювання цього тиску, що зумовлена витіканням газу через нещільності з'єднувальної трубки.
- 3) Витрата витікання газу через отвір у з'єднувальній трубці, а, відповідно, і похибка вимірювання тиску залежать від діаметра наскрізного отвору $D_{вит}$. Зростання діаметра отвору призводить до зростання за модулем абсолютної похибки Δp .

4) Вплив витікання газу із з'єднувальної трубки на похибку вимірювання тиску залежить від місця виникнення нещільності. Із збільшенням довжини з'єднувальної трубки $L_{отв}$ від точки з'єднання з вимірювальним трубопроводом до точки витікання газу похибка Δp зростає.

5) Для абсолютного тиску газу 400 кПа додаткова систематична похибка вимірювання тиску ΔP , зумовлена витіканням газу через отвір у з'єднувальній трубці, стає співмірною з основною похибкою вимірювального перетворювача тиску за умови, що діаметр отвору має значення більше 0,75 мм. Такі випадки витікання газу легко виявити органолептичним способом.

Отримані результати дають змогу врахувати додаткові складові невизначеності вимірювання витрати та об'єму природного газу, спричинені пошкодженнями імпульсних трубок вимірювального перетворювача тиску (перепаду тиску) та можуть слугувати основою для розроблення нормативного документу з оцінювання додаткових похибок вимірювання об'єму газу та коригування об'єму газу під час пошкодження з'єднувальних трубок у системах обліку природного газу.

Література

- [1] Є. П. Пістун, Л. В. Лесовой, *Нормування витратомірів змінного перепаду тиску*, Львів, 2006.
- [2] R. Fedoryshyn, F. Matiko, Y. Pistun, "Prospects for improving the accuracy of natural gas accounting and for reducing gas unbalances", *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium*, pp.485–486, 2008.
- [3] ДСТУ ГОСТ 8.586.1:2009 (ISO 5167-1:2003) Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини й газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 1. Принцип методу вимірювання та загальні вимоги (ГОСТ 8.586.1-2005, IDT; ISO 5167-1:2003, MOD), Київ, 2010.
- [4] ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009 (ISO 5167-2:2003). Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини й газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 2. Діафрагми. Технічні вимоги (ГОСТ 8.586.2-2005, IDT; ISO 5167-2:2003, MOD), Київ, 2010.
- [5] ДСТУ ГОСТ 8.586.5:2009. Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини й газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 5. Методика виконання вимірювань (ГОСТ 8.586.5-2005, IDT), Київ, 2010.
- [6] M. J. Reader-Harris, J. M. McNaught, *Impulse Lines for Differential-Pressure Flowmeters. Best Practice Guide*. NEL. East Kilbride, Glasgow, G75 0QU, United Kingdom, 2005.
- [7] G. Chakraborty. "Effect of Various Parameters on Natural Gas Measurement and its Impact on UFG". *Kuala Lumpur, World Gas Conference*, 2012.
- [8] M. Reader-Harris, *Orifice Plates and Venturi Tubes: Experimental Fluid Mechanics*. NEL, Glasgow, UK. Springer International Publishing, 2015.
- [9] R. Fedoryshyn, F. Matiko, O. Pistun, R. Brylinskyi, O. Masniak, "Impulse mode of natural gas flow and its effect on metering system accuracy", *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium*, pp. 956–962, 2020.
- [10] Г. Г. Черный, *Газовая динамика*, Москва, 1988.
- [11] Ye. Pistun, H. Matiko, H. Krykh, "Mathematical Models of Throttle Elements of Gas-hydrodynamic Measuring Transducers", *Energy Engineering and Control Systems*, vol. 5, no. 2, pp. 94–107, 2019.
- [12] ДССДД 4-2002 Газ природний. Методика розрахунку коефіцієнта стисливості у діапазоні тиску 12 ... 25 МПа, Київ, 2002.
- [13] М. Е. Дейч, *Техническая газодинамика*, Москва, 1974.

УДК 681.121.84:519.85

F. D. Matiko, I. V. Kostyk, H. F. Matiko, S. B. Onysyk

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

MATHEMATICAL MODEL OF PNEUMATIC CHANNEL OF GAS PRESSURE MEASURING TRANSDUCER

The paper is devoted to the study of the impact of operational factors, particularly gas leakage through the damages of pneumatic channels of measuring transducers of gas pressure and pressure drop, on the measuring result of these parameters and, therefore, on the measured value of gas flow rate and volume using pressure differential flowmeters. During the operation of gas metering units, connecting tubes, valve blocks, and averaging chambers of the standard primary device must be hermetic. However, they may become non-tight because of operational factors, and gas leakage may occur. Such leaks distort the measured pressure drop or pressure value, which can lead to a distortion of the measurement result of the gas flow rate by the metering unit.

The authors developed a mathematical model of a pneumatic channel of gas pressure measuring transducer with existing damage. For this purpose, a mathematical model of the connecting tube, which connects the pressure averaging chamber with the pressure transducer chamber, has been developed for the stationary gas mode. A mathematical model of gas leakage through damage like "through-hole" was also developed. Based on the mathematical model of the connecting tube and the model of the process of gas leakage through the hole, a mathematical model of the pneumatic channel with a gas leakage hole was obtained.

Modeling and investigating the impact of gas pressure, geometric characteristics of damage, and connecting line on the measuring result of pressure or pressure drop was performed. Particularly, the value of the negative systematic error of the gas pressure measurement, which occurs as a result of gas leakage through the hole in the connecting tube, is calculated for a set of fixed values of the geometric characteristics of the pneumatic channel.

The paper shows that an increase in the pressure in the measuring tube leads to an increase in the modulus of pressure absolute error caused by the gas leakage through the hole in the connecting tube. The gas flow rate through the hole in the connecting tube and, accordingly, the pressure measurement error depends on the diameter of the through-hole and the location of the leakage. An increase in the hole diameter leads to an increase in the modulus of the absolute error of the pressure measurement.

As the length of the connecting tube from the connection point with the measuring pipeline to the point of gas outflow increases, the pressure measurement error increases by the modulus.

Keywords: pressure measuring transducer; connecting tubes; gas leakage; mathematical model; systematic error.

*Надійшла до редакції
30 жовтня 2022 року*

*Рецензовано
22 листопада 2022 року*



© 2022 Copyright for this paper by its authors.
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).