

# Прикладні аспекти: вимірювання витрат та об'єму

УДК 681.121

А.Г. Винничук, О.Є. Середюк, Л.А. Витвицька

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ

## МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ УСТАНОВКИ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ ГАЗУ НА БАЗІ ТОРЦЕВИХ ЗВУЖУВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ

Запропоноване рішення установки для вимірювання витрати газу на базі торцевих звужувальних пристроїв. Проведено експериментальні дослідження з визначення комплексного коефіцієнта витрати застосовуваних в установці торцевих звужуючих пристроїв. Виконані метрологічні дослідження установки для вимірювання витрати газу шляхом визначення стандартних невизначеностей складових сумарної невизначеності та розроблена її метрологічна модель.

**Ключові слова:** торцевий звужувальний пристрій, невизначеність, природний газ, витрата.

### Вступ

**Постановка проблеми.** На даний час в Україні питання збереження природних енергоресурсів набуває особливого значення. Зокрема, і природного газу, близько 70 % якого Україна закуповує за кордоном. Одним із шляхів досягнення енергозбереження та підвищення ефективності використання природного газу є його точний і достовірний облік у промисловості і комунально-побутовій сфері. Тому є актуальним здійснення контролю метрологічних характеристик лічильників газу, в тому числі і побутових, без їх демонтажу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для часткового вирішення проблеми енергозбереження природних ресурсів розроблена установка для контролю метрологічних характеристик побутових лічильників газу в умовах їх експлуатації [1, 2], що дає можливість підвищити точність обліку природного газу комунальними споживачами.

**Метою роботи** є проведення метрологічного аналізу установки для вимірювання витрати газу на базі торцевих звужувальних пристроїв.

### Виклад основного матеріалу

Авторами розроблена установка, яка реалізує нову концепцію визначення метрологічних характеристик побутових лічильників газу, яка полягає у використанні торцевих звужувальних пристроїв (ЗП) для непрямого вимірювання витрати газу [1]. Вона передбачає використання в якості еталонних засобів спеціальних ЗП торцевого типу, які монтуються в технологічному обладнанні, що приєднане до газової магістралі послідовно з побутовими лічильниками газу [2]. У комплекті із ЗП застосовуються

відповідні засоби точного виміру тиску, перепаду тиску та температури газу.

Вираз для опосередкованого визначення витрати  $Q$  установкою на базі декількох одночасно функціонуючих торцевих ЗП має такий вигляд:

$$Q = \sum_{i=1}^n \alpha_i \varepsilon_i F_i \sqrt{2 \cdot \Delta P_i \frac{P_i \cdot T_C}{\rho_C P_C T_i K_i}}, \quad (1)$$

де  $\alpha_i$  – коефіцієнт витрати  $i$ -го ЗП;  $\varepsilon_i$  – поправковий множник на розширення газу в  $i$ -му ЗП;  $F_i$  – площа отвору  $i$ -го ЗП;  $\Delta P_i$  – перепад тиску на  $i$ -му ЗП;  $P_i$ ,  $T_i$  – тиск і температура газу перед  $i$ -тим ЗП;  $K_i$  – коефіцієнт стискуваності газу перед  $i$ -м ЗП;  $P_C$ ,  $T_C$ ,  $\rho_C$  – тиск, температура і густина газу за стандартних умов відповідно.

Авторами пропонується запровадження поняття комплексного коефіцієнта витрати  $N_K$  торцевих ЗП, зокрема, при здійсненні їх індивідуального градування, який визначається таким чином:

$$N_{K_i} = \alpha_i F_i \varepsilon_i. \quad (2)$$

Такий підхід дозволяє підвищити точність вимірювання витрати газу, що пройшов через ЗП, оскільки усувається похибка вимірювання геометричних розмірів ЗП та методична похибка визначення коефіцієнта розширення потоку при проходженні через ЗП. За умови вимірювання витрати одним торцевим ЗП та з врахуванням виразу (2), рівняння (1) набуває наступного вигляду:

$$Q = N_K \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta P \cdot P \cdot T_C}{\rho_C \cdot P_C \cdot T \cdot K}}. \quad (3)$$

На основі виразу (3) сформована метрологічна модель (рис. 1) вдосконаленого методу вимірювання витрати газу із застосуванням торцевих ЗП, яка відображає основні складові сумарної невизначеності вимірювання витрати  $U(Q)$ .

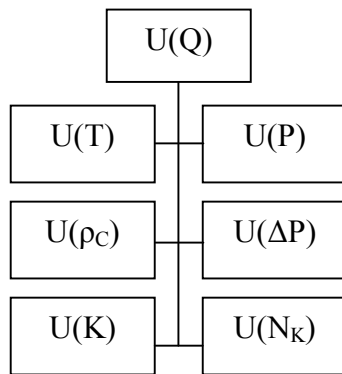


Рис. 1. Метрологічна модель вдосконаленого методу вимірювання витрати із застосуванням торцевих ЗП

Розрахунок сумарної невизначеності методу вимірювання витрати із застосуванням торцевих ЗП приведений нижче на підставі визначення стандартних невизначеностей типу А або В її складових.

На процес вимірювання витрати газу впливає ряд чинників, що формують складові невизначеності. Однією з них є невизначеність комплексного коефіцієнта витрати  $U(N_K)$  ЗП, числове значення якого визначається експериментальним шляхом з використанням еталонного засобу відтворення обсягу газу, наприклад дзвонової установки. Тому невизначеність комплексного коефіцієнта витрати ЗП визначається невизначеністю еталонного засобу відтворення обсягу газу  $U_B(N_K)$ , невизначеністю розрахунку комплексного коефіцієнта витрати при багаторазових вимірюваннях з використанням еталонного засобу відтворення обсягу газу  $U_A(N_K)$  невизначеністю розрахунку комплексного коефіцієнта витрати при багаторазових вимірюваннях з використанням еталонного засобу відтворення обсягу газу  $U_A(N_{Ka})$ .

Для дослідження ЗП застосовувалася еталонна дзвонова установка з межею відносної похибки передачі об'єму газу  $\pm 0,15\%$ . Приклади результатів дослідження двох торцевих ЗП приведені на рис. 2. При цьому число  $Re$  розраховувалося стосовно до діаметру вхідного ділянки торцевого ЗП [3].

Абсолютна похибка еталонної установки (граніця сумарної похибки  $0,15\%$ ) при відтворенні контрольного об'єму  $0,03 \text{ м}^3$  буде становити  $\Delta(V) = 0,03 \cdot 0,15/100 = 4,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$ . При цьому абсолютна похибка розрахунку комплексного коефіцієнта витрати при надлишковому тиску дзвонової установки  $1,5 \text{ кПа}$ , температури перед ЗП  $293 \text{ К}$ , а також густини повітря перед ЗП буде дорівнювати  $\Delta(N_K) = 2 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$ . Вважаючи рівномірним закон розподілу даної похибки, стандартна невизначеність за типом В комплексного коефіцієнта витрати дорівнює:

$$U_B(N_K) = \frac{\Delta(N_K)}{\sqrt{3}} = 1,155 \cdot 10^{-9}, \text{ м}^2. \quad (4)$$

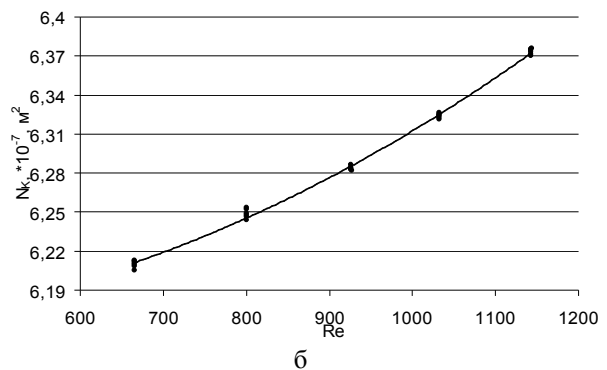
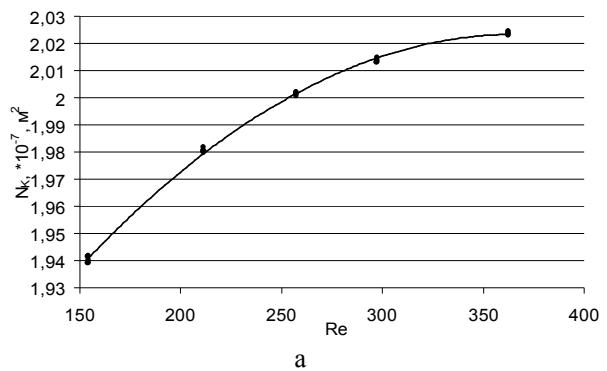


Рис. 2. Залежність комплексного коефіцієнта витрати торцевих ЗП від числа Рейнольдса:

- а – діаметр отвору ЗП  $0,56 \text{ мм}$ , діаметр вхідного ділянки ЗП  $2,5 \text{ мм}$ ;
- б – діаметр отвору ЗП  $1,00 \text{ мм}$ , діаметр вхідного ділянки ЗП  $2,5 \text{ мм}$

Стандартна невизначеність типу А під час розрахунку комплексного коефіцієнта витрати при багаторазових вимірюваннях визначалася на основі розрахунку незміщених середньоквадратичних відхилень значень комплексного коефіцієнта витрати від його середнього значення. При цьому дана складова невизначеності не перевищувала

$$U_A(N_K) = 9,74 \cdot 10^{-11}, \text{ м}^2.$$

На основі експериментальних даних, за якими побудовані апроксимаційні криві (рис. 2), отримано значення середньоквадратичних відхилень апроксимованих залежностей від експериментальних даних, які будуть визначати стандартну невизначеність типу А, що чисельно дорівнює

$$U_A(N_{Ka}) = 3,390 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2.$$

Отже, сумарна невизначеність комплексного коефіцієнта витрати буде рівна:

$$U(N_K) = \sqrt{U_B(N_K)^2 + U_A(N_K)^2 + U_A(N_{Ka})^2} = 1,204 \cdot 10^{-9}, \text{ м}^2. \quad (5)$$

Для вимірювання надлишкового тиску перед ЗП використовується дифманометр типу ROZEMOUNT (верхня межа вимірювання  $4 \text{ кПа}$ , межа допустимої зведеної похибки  $\pm 0,075\%$ ). При цьому абсолютна похибка дифманометра становитиме:

$$\Delta(\Delta P) = \frac{0,075 \cdot 4}{100} = 0,003, \text{ кПа.} \quad (6)$$

Враховуючи, що абсолютна похибка визначає стандартну невизначеність типу В, то за умови рівномірного закону розподілу, невизначеність вимірювання надлишкового тиску перед ЗП складатиме:

$$U_B(\Delta P) = \frac{\Delta(\Delta P)}{\sqrt{3}} = 1,73 \cdot 10^{-3}, \text{ кПа.} \quad (7)$$

Абсолютний тиск на вході ЗП визначається сумою атмосферного і надлишкового тисків. Атмосферний тиск вимірюється барометром типу бамм-1В (верхня межа вимірювання 106 кПа, межа допустимої зведеної похибки  $\pm 0,2\%$ , абсолютна похибка 0,212 кПа). Тому сумарна абсолютна похибка визначення тиску на вході ЗП дорівнює  $\Delta(P) = 0,212 + 0,003 = 0,215$  кПа. Звідси стандартна невизначеність типу В вимірювання абсолютного тиску при рівномірному законі розподілу дорівнює:

$$U_B(P) = \frac{\Delta(P)}{\sqrt{3}} = 0,124, \text{ кПа.} \quad (8)$$

Температура газу вимірюється датчиком температури з верхньою межею вимірювання  $50^\circ\text{C}$  і абсолютною похибкою  $\Delta(T) = 0,3^\circ\text{C}$ . Тому стандартна невизначеність типу В вимірювання температури дорівнює:

$$U_B(T) = \frac{\Delta(T)}{\sqrt{3}} = 0,173, ^\circ\text{C.} \quad (9)$$

Невизначеність обчислення коефіцієнта стисливості газу розраховується на основі відомої з нормативних документів методичної похибки його визначення  $\pm 0,13\%$  і середнього його значення при робочих умовах установки, рівного 0,9990. Тому абсолютна похибка дорівнює  $\Delta(K) = 0,00129$ . Звідси стандартна невизначеність розрахунку коефіцієнта стисливості:

$$U_B(K) = \frac{\Delta(K)}{\sqrt{3}} = 7,452 \cdot 10^{-4}. \quad (10)$$

Невизначеність визначення густини газу за стандартних умов визначається за результатами його хроматографічного аналізу лабораторним хроматографом типу "Кристал-2000М", абсолютна похибка якого складає  $\Delta(\rho_C) = 0,002$  кг/м<sup>3</sup>.

Тому стандартна невизначеність типу В даної складової дорівнює:

$$U_B(\rho_C) = \frac{\Delta(\rho_C)}{\sqrt{3}} = 1,154 \cdot 10^{-3}, \text{ кг/м}^3. \quad (11)$$

Розрахунок сумарної невизначеності вимірювання витрати газу даною установкою здійснюється на основі непрямого вимірювання згідно (3) з урахуванням коефіцієнтів вагомості кожної складової невизначеності при номінальних значеннях змінних параметрів:

$$U(Q) =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial N_K} \cdot U(N_K)\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial \rho_C} \cdot U(\rho_C)\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial T} \cdot U(T)\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial \Delta P} \cdot U(\Delta P)\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial P} \cdot U(P)\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial K} \cdot U(K)\right)^2}. \quad (12)$$

В (12) частковими похідними записані відповідні коефіцієнти вагомості, розраховані за вказаними нижче формулами, для номінальних значень робочих параметрів установки ( $N_K = 6 \times 10^{-7}$  м<sup>2</sup>,  $\Delta P = 2000$  Па,  $\rho_C = 0,7$  кг/м<sup>3</sup>,  $P = 103325$  Па,  $K = 0,999$ ,  $T = 293$  К):

$$\frac{\partial Q}{\partial N_K} = \sqrt{2} \frac{\Delta P \cdot P \cdot T_C}{T \cdot \rho_C \cdot P_C \cdot K} = 76,37, \text{ м/с;} \quad (13)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial \rho_C} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\rho_C \cdot \sqrt{\rho_C}} \cdot N_K \cdot \sqrt{2} \frac{\Delta P \cdot P \cdot T_C}{T \cdot P_C \cdot K} = -2,14 \cdot 10^{-10}, \text{ м}^6 / (\text{с} \times \text{кг}); \quad (14)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial T} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{T \cdot \sqrt{T}} \cdot N_K \cdot \sqrt{2} \frac{\Delta P \cdot P \cdot T_C}{\rho_C \cdot P_C \cdot K} = -7,82 \cdot 10^{-8}, \text{ м}^3 / (\text{с} \times \text{К}); \quad (15)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial \Delta P} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{\Delta P}} \cdot N_K \cdot \sqrt{2} \frac{P \cdot T_C}{T \cdot \rho_C \cdot P_C \cdot K} = 1,14 \cdot 10^{-8}, \text{ м}^3 / (\text{с} \times \text{Па}); \quad (16)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial P} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{P}} \cdot N_K \cdot \sqrt{2} \frac{\Delta P \cdot T_C}{T \cdot \rho_C \cdot P_C \cdot K} = 2,22 \cdot 10^{-10}, \text{ м}^3 / (\text{с} \times \text{Па}); \quad (17)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial K} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{K \cdot \sqrt{K}} \cdot N_K \cdot \sqrt{2} \frac{\Delta P \cdot P \cdot T_C}{T \cdot \rho_C \cdot P_C} = -2,29 \cdot 10^{-5}, \text{ м}^3 / \text{с.} \quad (18)$$

Теоретично розрахована витрата газу, виміряна розробленою установкою для зазначених вище номінальних параметрів робочого середовища становить  $4,58 \cdot 10^{-2}$  м<sup>3</sup>/с.

Моделювання складових невизначеності при реалізації розробленої установки показало, що її сумарна невизначеність становить  $9,086 \cdot 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/с, а з урахуванням коефіцієнта охоплення  $k_0=2$  розширена невизначеність не перевищить  $3,424 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с.

Аналізуючи для досліджуваних значень параметрів установки відносно невизначеність, отримуємо її значення рівні 0,2% і 0,4% для відносної сумарної і відносної розширеної невизначеностей відповідно. Обчислене значення невизначеності вимірювання витрати газу установкою на базі торцевих ЗП обґрунтовує можливість її практичної реалізації для дослідження метрологічних характеристик побутових лічильників газу.

## Висновки

Проведений метрологічний аналіз розробленої установки на базі торцевих ЗП для вимірювання витрати газу за умов функціонування побутових лічильників газу, що дає можливість їх метрологічного дослідження та контролю без демонтажу. Розроблена метрологічна модель установки для вимірювання витрати газу, яка враховує основні фактори впливу на точність вимірювання. Чисельно оцінено складові невизначеності вимірювання та розрахована її сумарна невизначеність, яка становить  $9,086 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{с}$  (0,2%) і розширена невизначеність склала  $3,424 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$  (0,4%).

Отримані результати підтверджують достатньо високу точність вимірювання витрати газу розробленою установкою та доцільність її використання для контролю побутових лічильників газу в умовах експлуатації.

## Список літератури

1. Пат. 16522 У Україна, МПК (2006) G 01 F 25/00. Спосіб діагностування та перевірки побутових лічильників газу / О.Є. Середюк, С.А. Чеховський, А.Г. Винничук, М.І. Гончарук, Б.І. Прудніков; заявник і патентовласник Івано-Франківський націон.техн. ун-т нафти і газу. – № u200601289; заявл. 09.02.06; опубл. 15.08.06, Бюл. № 8.
2. Середюк О.Є. Мобільна установка для бездемонтажного діагностування побутових лічильників газу / О.Є. Середюк, А.Г. Винничук // Нафтогазова енергетика. – 2007. – № 3(4). – С. 76-80.
3. Seredyuk Orest. Budowa, analiza i ocena niepewności pomiarów zestawu kalibracyjnego do sprawdzenia gazonierzy i użytkownika / O. Seredyuk, A. Vynnychuk, L. Vitvitskiy, Z. Warsza // Pomiar Automatyka Kontrola (Польща). – 2012. – P. 9-14.

Надійшла до редколегії 14.02.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук., проф. В.С. Костишин, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ.

## МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ГАЗА НА БАЗЕ ТОРЦЕВЫХ СУЖАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

А.Г. Винничук, О.Є. Середюк, Л.А. Витвицкая

*Предложено решение установки для измерения расхода газа на базе торцевых сужающих устройств. Проведены экспериментальные исследования по определению комплексного коэффициента расхода применяемых в установке торцевых сужающих устройств. Выполнены метрологические исследования установки для измерения расхода газа путем определения стандартных неопределенностей составляющих суммарную неопределенность и разработана ее метрологическая модель.*

**Ключевые слова:** торцевое сужающее устройство, неопределенность, природный газ, расход.

## METROLOGICAL ANALYSIS OF INSTALLATION FOR GAS FLOW MEASUREMENT WITH FACE-END NOZZLES USING

A.G. Vynnychuk, O.J. Serejduk, L.A. Vytvytska

*In this article was proposed the solution of installation for gas flow measurement with face-end nozzles using. An experimental research was carried out to determine the complex flow coefficient used in the face-end nozzles. Metrological research of installation was realized for gas flow measuring by determining the standard uncertainty components of total uncertainty and developed its metrological model.*

**Keywords:** face-end nozzle, uncertainty, natural gas, gas flow.