

УДК 681.121

А.Г. Винничук, О.Є. Середюк, Т.В. Лютенко

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

## ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРАВЛІЧНИХ ВИТРАТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕСТАНДАРТНИХ ЗВУЖУВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ

Розроблено лабораторний стенд для експериментального визначення гідравлічних витратних характеристик нестандартних звужувальних пристроїв. Наведені результати експериментальних досліджень із застосуванням лабораторного стенду. Проведений метрологічний аналіз отриманих результатів експериментальних досліджень для торцевого сопла з діаметром вихідного отвору 1,5 мм.

**Ключові слова:** звужувальний пристрій, витратні характеристики, метрологічна модель, похибка.

### Вступ

Вирішення актуального завдання підвищення точності обліку природного газу можна досягнути шляхом застосування мобільної установки для діагностування побутових лічильників газу (ПЛГ) без проведення їх демонтажу та безпосередньо на місці експлуатації [1]. Принцип роботи установки передбачає застосування для вимірювання витрати нестандартних звужувальних пристроїв (ЗП), зокрема торцевих сопел. Методика вимірювання об'єму або витрати газу із використанням торцевих ЗП фактично є опосередкованим вимірюванням витрати, суть якої зводиться до застосування торцевих ЗП як еталонних засобів, які укомплектовані давачами тиску і температури робочого середовища.

Оскільки вимірювання витрати необхідно здійснювати при малих числах Рейнольдса  $Re$ , а теоретичне обґрунтування за таких умов вимірювання свідчить про можливу непостійність коефіцієнта витрати, доцільно при дослідженні встановити закономірності зміни коефіцієнта витрати торцевих ЗП.

В цьому аспекті відомими є дослідження [2] щодо експериментального визначення коефіцієнта витрати ЗП в залежності від модуля  $m$  і  $Re$ . Для їх реалізації використовувалась гідравлічна установка, на якій проводились вимірювання масової витрати  $Q_M$ , перепаду тиску на ЗП  $\Delta p$ , температури  $T$  та тиску  $p$  води (робочого середовища). З урахуванням її густини  $\rho$  для умов досліджень.

Коефіцієнт витрати  $\alpha$  при застосуванні експериментального підходу визначався з рівняння:

$$\alpha = Q_M / \left( \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2\rho \Delta p} \right). \quad (1)$$

За цих умов досліди стосуються випадку коли коефіцієнт розширення робочого середовища  $\varepsilon = 1$ . Розрахунок коефіцієнта витрати здійснювався з використанням функції виду  $\alpha = f(Re, m, D)$ .

Відомою також є методологія досліджень [3], яка дозволяє визначати коефіцієнт розширення  $\varepsilon$  для

стискуваних середовищ, наприклад, природного газу чи повітря при їх протіканні через ЗП. При цьому за результатами вимірювань масової витрати обчислюється добуток  $\alpha\varepsilon$ :

$$\alpha\varepsilon = Q_M / \left( \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2\rho \Delta p} \right). \quad (2)$$

Коефіцієнт розширення  $\varepsilon$  робочого середовища при проходженні через досліджуваний ЗП визначається за виразом:

$$\varepsilon = (\alpha\varepsilon) / \alpha. \quad (3)$$

Коефіцієнт розширення визначається в наступному вигляді:

$$\varepsilon = f(\Delta p / p, m).$$

Такий підхід дає можливість проводити перевірку результатів теоретичного моделювання витратомірів змінного перепаду тиску і досліджувати вплив виду робочого середовища на точність вимірювання. Підтвердженням цього є сучасні наукові дослідження [4], в яких запропоновано патентозахищену установку, з використанням якої можна встановити гідравлічну витратну характеристику ЗП.

Визначення гідравлічних витратних характеристик нестандартних ЗП дає можливість їх застосування після перерахунку для умов вимірюванні малих витрат газу.

**Метою роботи** є метрологічні дослідження експериментально визначених гідравлічних витратних характеристик нестандартних ЗП торцевого типу.

### Виклад основного матеріалу

Для практичної побудови гідравлічних витратних характеристик нестандартних ЗП розроблений лабораторний стенд (рис. 1), який забезпечує можливість визначення коефіцієнта витрати  $\alpha$  торцевого ЗП або добутку  $\alpha F$  в залежності від модуля ЗП  $m$  і числа  $Re$  на воді ( $\varepsilon = 1$ ). Стенд складається з закріпленої на штативі 1 ємності для рідини 2 з контрольною лінійкою 3 для визначення рівня і відповідно перепаду тиску на ЗП.

В нижній частині ємності передбачений вузол з вмонтованим гнучким шлангом 7 для задавання різних значень гідравлічного тиску, на кінці якого знаходиться досліджуваний торцевий ЗП 4. Вітик води через торцевий ЗП відбувається в ємність 5, розміщену на електронній вазі 6.

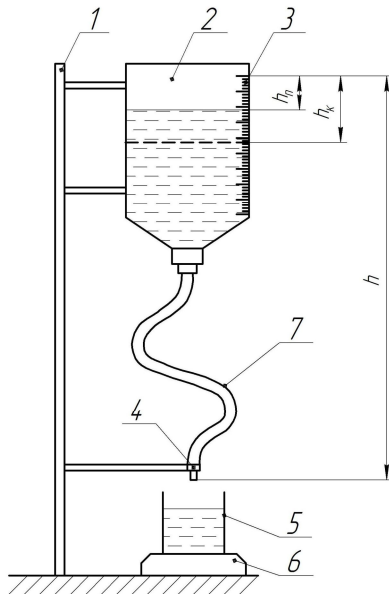


Рис. 1. Принципова схема лабораторного стенду для дослідження гідравлічних витратних характеристик звужувальних пристроїв: 1 – штатив; 2 – ємність для рідини; 3 – контрольна лінійка; 4 – торцевий ЗП; 5 – ємність; 6 – електронна вага; 7 – гнучкий шланг

При проведенні досліджень фіксувався рівень води для визначення гідростатичного тиску перед торцевим ЗП при початку експерименту і після закінчення витіку порції рідини.

Алгоритм обчислення витратних характеристик торцевих ЗП здійснюється наступним чином.

Вхідними параметрами для реалізації цього алгоритму є: маса рідини, що витікла через ЗП у мірну посудину  $m$ ; час витікання рідини  $\tau$ ; температура води  $T$ ; висота на якій розміщений початок відлікової шкали відносно кінця ділянки перед звуженням торцевого сопла  $h$ ; початкова висота розміщення рідини у ємності відносно початку відлікової шкали  $h_p$ ; кінцева висота розміщення рідини у ємності відносно початку відлікової шкали  $h_k$ .

За виміряною температурою води визначаємо її динамічну в'язкість  $\mu$ :

$$\mu = 2.414 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{\frac{247.8}{T-140}} \quad (4)$$

Визначаємо перепад тиску на торцевому ЗП  $\Delta p$  за формулою:

$$\Delta p = \left( h - \frac{h_p + h_k}{2} \right) \cdot \rho \cdot g, \quad (5)$$

де  $\rho$  – густина води;  $g$  – сила земного тяжіння.

Розраховуємо об'ємну витрату рідини  $Q_v$ :

$$Q_v = \frac{m}{\tau \cdot \rho} \quad (6)$$

Обчислюємо добуток коефіцієнта витрати  $\alpha$  на площу поперечного перерізу сопла  $F$ :

$$\alpha F = Q_v / \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta p}{\rho}} \quad (7)$$

Визначаємо число Рейнольдса для відповідного добутку  $\alpha F$  за формулою:

$$Re = \frac{4 \cdot Q_v \cdot \rho}{\pi \cdot d \cdot \mu}, \quad (8)$$

де  $d$  – діаметр вхідної прямолінійної ділянки перед ЗП, який рівний 2,5 мм.

Експериментальні дослідження проводились для сопел різних діаметрів вихідних отворів  $d_0$  і різних довжин прямолінійного участку  $L$ . Це пов'язано із тим, що конструктивне виконання нестандартних ЗП, може впливати на їх коефіцієнт витрати для визначення якого відсутні відомі алгоритми розрахунку. Внаслідок виконання дослідів було отримано 168 наборів даних. Для прикладу, в табл. 1 наведено експериментально отримані дані для торцевого ЗП із діаметром вихідного отвору  $d_0 = 1,5$  мм і довжиною прямолінійної ділянки  $L = 6$  мм.

Таблиця 1  
Експериментально отримані набори вхідних даних

| № | h, мм | h <sub>п</sub> , мм | h <sub>к</sub> , мм | m, кг | τ, с  | t, °C |
|---|-------|---------------------|---------------------|-------|-------|-------|
| 1 | 604   | 0                   | 26                  | 0,633 | 244,1 | 18,7  |
| 2 |       | 26                  | 53                  | 0,629 | 245,0 | 18,6  |
| 3 |       | 53                  | 82                  | 0,626 | 248,1 | 18,5  |
| 4 | 1042  | 0                   | 26                  | 0,619 | 189,0 | 18,6  |
| 5 |       | 26                  | 52                  | 0,619 | 191,0 | 18,6  |
| 6 |       | 52                  | 80                  | 0,608 | 188,9 | 18,7  |
| 7 | 1774  | 0                   | 26                  | 0,615 | 148,1 | 18,6  |
| 8 |       | 26                  | 52                  | 0,601 | 146,2 | 18,5  |
| 9 |       | 52                  | 80                  | 0,606 | 148,6 | 18,6  |

Для аналітичного встановлення закономірностей зміни витратних характеристик торцевих ЗП за даними табл. 1 проведено апроксимацію даних поліномом 2-го порядку (рис. 2):

$$\alpha F = 2.081 \cdot 10^{-6} - 3.574 \cdot 10^{-10} \cdot Re + 4.112 \cdot 10^{-14} \cdot Re^2$$

Після проведення експериментальних досліджень важливим завданням є визначення їх метрологічних характеристик, що є необхідним для підтвердження можливості застосування отриманих залежностей витратних характеристик торцевих ЗП.

Для оцінки сумарної похибки при визначенні витратних характеристик розроблено метрологічну модель, яка дає можливість кількісно оцінити результуюче значення похибки [5].

В основу метрологічної моделі покладено алгоритм, що аналітично описується (5)–(7). Викорис-

товуючи ці формули отримаємо математичну модель визначення витратних характеристик торцевих сопел:

$$\alpha F = \frac{m}{\tau \cdot \rho \sqrt{2 \cdot g \cdot \left( h - \frac{h_{\text{п}} + h_{\text{к}}}{2} \right)}} \quad (9)$$

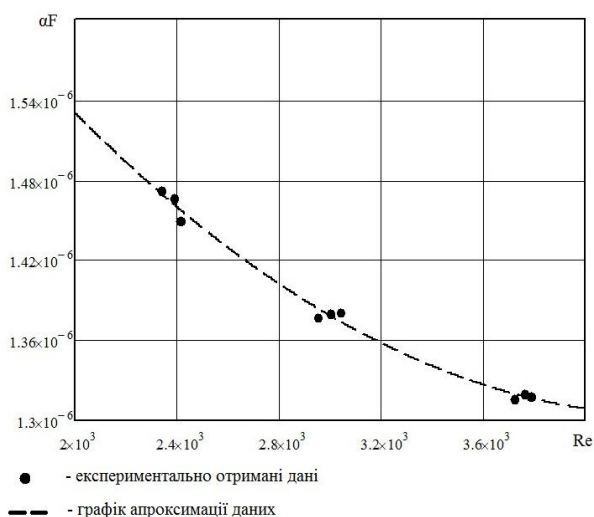


Рис. 2. Вигляд експериментально отриманих результатів досліджень торцевого сопла з  $d_0 = 1,5$  мм

На основі (9) сформовано метрологічну модель проведених досліджень (рис. 3), яка відображає основні складові сумарної похибки  $\delta$  та взаємозв'язок між її складовими.

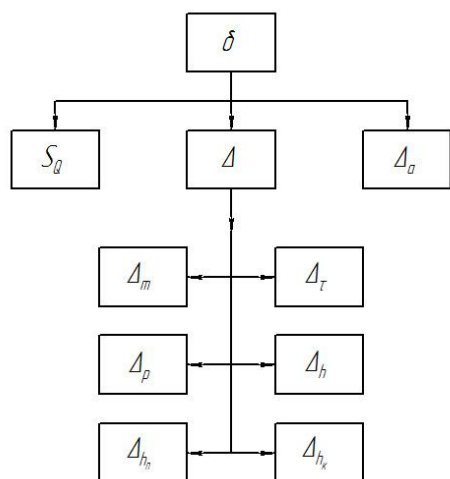


Рис. 3. Метрологічна модель досліджень витратних характеристик торцевих ЗП

Метрологічна модель враховує такі складові сумарної похибки  $\delta$  визначення витратних характеристик:  $S_Q$  – випадкова похибка;  $\Delta$  – похибка розрахунку витратної характеристики ЗП;  $\Delta_m$  – НСП вимірювання маси води;  $\Delta_\tau$  – НСП вимірювання часу витікання води;  $\Delta_\rho$  – НСП вимірювання густини води;  $\Delta_h$  – НСП вимірювання висоти розміщення ємності відносно сопла;  $\Delta_{h_{\text{п}}}$  – НСП вимірювання поча-

ткового рівня рідини у ємності;  $\Delta_{h_{\text{к}}}$  – НСП вимірювання кінцевого рівня рідини у ємності відносно початку відлікової шкали;  $\Delta_a$  – НСП апроксимації.

Для чисельної оцінки границі сумарної похибки проаналізуємо кожен із вище вказаних її складових, визначити її величину та вагомість впливу на результуюче значення.

При опосередкованих вимірюваннях та відомому рівнянні вимірювань (9) величина сумарної похибки вимірювань  $\Delta_B$  визначається за виразом:

$$\Delta_B = k \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial f(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_i} \Delta x_i \right]^2} \quad (10)$$

де  $k$  – коефіцієнт, що визначається прийнятою довірчою ймовірністю  $P_3$ ;  $x_i$  –  $i$ -й параметр, виміряний прямим методом;  $n$  – кількість параметрів виміряних прямим методом;  $\Delta x_i$  – фактичне значення похибки вимірювання  $i$ -го параметра, виміряного прямим методом.

При  $P_3 = 0,95$  % коефіцієнт  $k = 1,1$  [5].

Часткова похідна по масі, часу витікання, густині води, висоті початку мірної лінійки відносно кінця ділянки перед звуженням ЗП, початковим та кінцевим рівням води в посудині відповідно, визначаються рівняннями:

$$\frac{\partial \alpha F}{\partial m} = \frac{1}{\tau \rho \sqrt{2g \left( h - \frac{h_{\text{п}} + h_{\text{к}}}{2} \right)}}, \quad (11)$$

$$\frac{\partial \alpha F}{\partial \tau} = - \frac{m}{\tau^2 \rho \sqrt{2g \left( h - \frac{h_{\text{п}} + h_{\text{к}}}{2} \right)}}, \quad (12)$$

$$\frac{\partial \alpha F}{\partial \rho} = - \frac{m}{\tau \rho^2 \sqrt{2g \left( h - \frac{h_{\text{п}} + h_{\text{к}}}{2} \right)}}, \quad (13)$$

$$\frac{\partial \alpha F}{\partial h} = - \frac{m}{2 \tau \rho \sqrt{\left( 2g \left( h - \frac{h_{\text{п}} + h_{\text{к}}}{2} \right) \right)^3}}, \quad (14)$$

$$\frac{\partial \alpha F}{\partial h_{\text{п}}} = \frac{m}{4 \tau \rho \sqrt{\left( 2g \left( h - \frac{h_{\text{п}} + h_{\text{к}}}{2} \right) \right)^3}}, \quad (15)$$

$$\frac{\partial \alpha F}{\partial h_{\text{к}}} = \frac{m}{4 \tau \rho \sqrt{\left( 2g \left( h - \frac{h_{\text{п}} + h_{\text{к}}}{2} \right) \right)^3}}. \quad (16)$$

Із врахуванням похибки вимірювальних засобів, які входять у склад лабораторного стенда вибираємо такі систематичні складові, які входять у рівняння (11) – (16):

$$\Delta_m = 0,001 \text{ кг}; \Delta_\tau = 0,2 \text{ с}; \Delta_\rho = 1 \text{ кг/м}^3; \Delta_h = 0,005 \text{ м}; \Delta_{h_{\text{п}}} = 0,001 \text{ м}; \Delta_{h_{\text{к}}} = 0,001 \text{ м}.$$

Згідно формули (10) сумарна похибка вимірювань  $\Delta_B = 8,57 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$ . Тоді похибка визначення добутку  $\alpha F$  буде рівною:

$$\Delta = \frac{\Delta_B \cdot 100}{\alpha F} = \frac{8,57 \cdot 10^{-9} \cdot 100}{1,47 \cdot 10^{-6}} = 0,58 \text{ \%}.$$

Випадкову похибку  $S_Q$  оцінимо за допомогою середнього квадратичного відхилення результатів спостережень:

$$S_Q = \frac{1}{\alpha F} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\alpha F_i - \overline{\alpha F})^2}{n-1}} \cdot 100\%, \quad (17)$$

де  $n$  – число дослідів;  $i$  – номер дослідів;  $\alpha F_i$  – значення витратної характеристики ЗП при  $i$ -му досліді;

$\overline{\alpha F} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha F_i$  – середнє значення витратної характеристики ЗП.

За даними табл. 1 на підставі формули (17) отримаємо  $S_Q = 0,62 \text{ \%}$ .

Невилучену систематичну похибку апроксимації  $\pm \Delta_a$  обчислимо для даних табл. 1 за виразом:

$$\Delta_a = \frac{2}{\alpha F_{a \min} + \alpha F_{a \max}} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (\alpha F_i - \alpha F_a)^2} / (n-1) \cdot 100\%, \quad (18)$$

де  $\alpha F_a$  – величина апроксимованого значення витратної характеристики ЗП;  $\alpha F_{a \min}$  та  $\alpha F_{a \max}$  – відповідно мінімальне та максимальне значення апроксимованого значення витратної характеристики ЗП.

Обчисливши формулу (18) отримаємо НСП апроксимації:  $\Delta_a = 0,35\%$ .

Сумарна допустима похибка  $\delta$  визначення витратних характеристик ЗП представляє собою суму випадкової похибки  $S_Q$ , похибки вимірювання  $\Delta$  та похибки апроксимації  $\Delta_a$ . Допустима похибка буде рівною:

$$\delta = S_Q + \Delta + \Delta_a = 0,62 + 0,58 + 0,35 = 1,55\% .$$

## Висновки

На основі проведених досліджень встановлені залежності коефіцієнта витрати для конкретної конструкції ЗП діаметром 1,5 мм і довжиною вхідною ділянки 6 мм від числа  $Re$ .

Проведено кількісний аналіз складових похибок, який відкриває напрямки досягнення необхідної точності побудови витратних характеристик нестандартних ЗП, чим в кінцевому результаті може бути досягнуто підвищення точності вимірювання витрати і об'єму природного газу в побутовій сфері.

## Список літератури

1. Seredyuk O. Wyznaczenie parametrow metrologicznych gazomierza domowego bez jego demontazu / O. Seredyuk, A. Vynnychuk, L. Vitvitskiy, Z. Warsza // *Polski Instalator*. – 2011. – №11. – P. 44-50.
2. Кабза Е. Математическое моделирование расходомеров с сужающими устройствами / Е. Кабза; [пер. с польского; под ред. П. П. Кремлевского]. – Л.: Машиностроение: Ленинград, 1981. – 115 с.
3. Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини й газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Част. 2. Діафрагми. Технічні вимоги: ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009. – [Чинний від 2010-04-01]. – К.: Держстандарт України, 2009. – 92 с. – (Державний стандарт України).
4. Пат. 2164667 Российская Федерация, G 01 F 25/00. Установка для стендовых исследований расходных характеристик гидравлических расходомеров. / Вежнев П.Д., Маклаков Н.Н., Зверев В.М., Голиков А.Н., Попов А.В.; заявники і патентовласники – ФГУП «Исследовательский центр им. Келдыша М.В.». – № 9911327272/28; заявл. 17.06.01; опубл. 27.03.01.
5. Метрологія та вимірювальна техніка: підруч. для студ. вищих навч. закл. / Є.С. Поліщук, М.М. Дорожжовець, В.О. Яцук [та ін.]; за ред. проф. Є.С. Поліщука. – Львів: Бескид Біт, 2003. – 544 с.

Надійшла до редколегії 5.03.2015

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

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ РАСХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕСТАНДАРТНЫХ СУЖАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

А.Г. Винничук, О.Е. Середюк, Т.В. Лютенко

*Разработан лабораторный стенд для экспериментального определения гидравлических расходных характеристик нестандартных сужающих устройств. Приведены результаты экспериментальных исследований торцевых сопел с применением лабораторного стенда. Выполнен метрологический анализ полученных результатов экспериментальных исследований для торцевого сопла с диаметром выходного отверстия 1,5 мм.*

**Ключевые слова:** сужающее устройство, расходные характеристики, метрологическая модель, погрешность.

## RESEARCH OF HYDRAULIC CONSUMABLES CHARACTERISTICS NON-NARROWING DEVICES

A.G. Vynnychuk, O.J. Serediuk, T.V. Liutenko

*The laboratory stand for the experimental determination of the hydraulic characteristics of unconventional supplies narrowing devices. The experimental results using the laboratory model. Conducted metrological analysis of the experimental results for the mechanical nozzle with a outlet diameter 1.5 mm.*

**Keywords:** narrowing device, consumables characteristics, metrological model error.