

## МЕТОДИ І ПРИЛАДИ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ РІДКОЇ І ГАЗОПОДІБНОЇ ФАЗ

УДК 681.121

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА РОЗШИРЕННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ ПРИ ВИМІРЮВАННІ ВИТРАТИ ТОРЦЕВИМИ ЗВУЖУВАЛЬНИМИ ПРИСТРОЯМИ

*А. Г. Винничук*

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ,  
вул.Карпатська, 15, 76019, E-mail: feivt@nung.edu.ua*

*Проаналізовано можливість практичного застосування торцевих звужувальних пристроїв в установках для вимірювання витрати природного газу. Здійснені експериментальні дослідження закономірностей зміни коефіцієнта розширення природного газу при вимірюванні витрати торцевими звужувальними пристроями. Проведений порівняльний аналіз результатів теоретичних і експериментальних досліджень.*

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

*Проанализирована возможность практического применения торцевых сужающих устройств в установках для измерения расхода природного газа. Осуществлены экспериментальные исследования закономерностей изменения коэффициента расширения природного газа при измерении расхода торцевыми сужающими устройствами. Проведенный сравнительный анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований.*

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

*The possibility of frontal nozzles practical application in natural gas flow measurement devises was analyzed. The experimental researches established patterns of change natural gas expansion coefficient in the flow measurements with frontal nozzles using were implemented. A comparative analysis of theoretical and experimental research results was carried out.*

*Keywords: coefficient of expansion, flow, natural gas, frontal nozzle device.*

**Вступ.** Торцеві звужувальні пристрої (ЗП) застосовують при вимірювати витрати робочого середовища на вході, або на виході трубопроводу [1-3]. Їх можна розглядати як первинні перетворювачі витратомірів змінного перепаду тиску з наявністю вимірювального трубопроводу тільки з однієї сторони.

Аналіз літературних джерел [1-3] показав, що в ряді випадків набули практичного застосування торцеві ЗП, які виконані у вигляді сопел або діафрагм. Безперечною перевагою торцевих ЗП є достатність вимірювання тиску газу тільки перед або після ЗП.

При вивченні методологічних основ вимірювання витрати методом змінного перепаду тиску використовується теорія гідродинамічної подібності потоків. Потіки подібні, якщо є не тільки геометрична подібність поверхонь встановлених в них ЗП,

але і гідродинамічна їх подібність. Критерій гідродинамічної подібності потоків у витратометрії рідин і газів визначається переважно безрозмірним параметром – числом Рейнольдса  $Re$ , яке за своєю суттю є співвідношенням сил інерції і сил в'язкості потоку.

Застосування закону гідродинамічної подібності в значній мірі полегшує проведення експериментальних робіт, оскільки достатньо змінити одну з величин, наприклад швидкість, щоб оцінити вплив інших величин, що входять до числа  $Re$ . Коефіцієнт витрати визначається як функція від числа  $Re$ , яка справедлива для більшості випадків вимірювання витрати.

В цьому аспекті відомими є дослідження [4] щодо експериментального визначення коефіцієнта витрати ЗП в залежності від модуля ЗП  $m$  і  $Re$ . Для їх реалізації використовувалась

спеціально розроблена установка, на якій проводились вимірювання масової витрати  $Q_M$ , перепаду тиску на ЗП, температури  $T$  та тиску  $p$  води (робочого середовища).

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

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

За цих умов досліди проводились при різних значеннях швидкості води, тобто при коефіцієнті розширення  $\varepsilon=1$ . Розрахунок коефіцієнта витрати здійснювався з використанням функції виду  $\alpha = f(\text{Re}, m, D)$ .

Відомими також є дослідження [4], які проводились з метою визначення коефіцієнта розширення  $\varepsilon$ , який не рівний одиниці для стискуваних середовищ, наприклад, природного газу чи повітря. В процесі проведення експериментальних досліджень як робоче середовище використовувалось повітря, для якого вимірювались масова витрата  $Q_M$ , перепад тиску на ЗП, температура  $T$ , тиск  $p$  перед ЗП, температура навколишнього середовища і атмосферний тиск.

За результатами вимірювань обчислювався добуток  $\alpha\varepsilon$  для досліджуваного ЗП:

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

Безпосередньо коефіцієнт розширення  $\varepsilon$  робочого середовища при проходженні через досліджуваний ЗП визначався за виразом:

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

Дослідження проводились при різних швидкостях повітря. Коефіцієнт розширення визначався в наступному вигляді  $\varepsilon = f(\Delta p / p, m)$ .

**Постановка задачі.** Такий підхід дає можливість проводити перевірку результатів теоретичного моделювання витратомірів змінного перепаду тиску і досліджувати вплив газового середовища на роботу вказаних засобів вимірювання порівняно з їх функціонуванням на нестискуваному середовищі. Підтвердженням цього є сучасні наукові дослідження, які здійснювалися при вивченні спеціальних ЗП. Так, в Росії запропонована патенто захищена установка [5], з використанням якої з високою точністю можна встановити індивідуальну витратну

характеристику ЗП і, в тому числі, витратні характеристики різноманітних гідравлічних опорів.

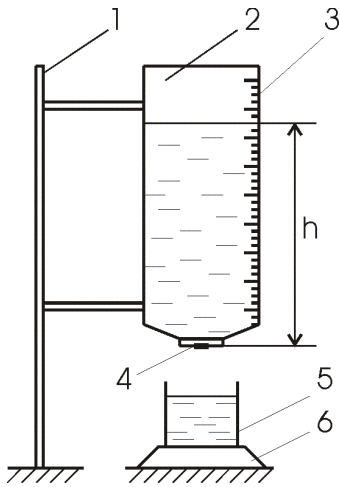
Такого виду дослідження дають змогу встановити залежності коефіцієнта витрати та коефіцієнта розширення для конкретної конструкції ЗП як функції від відносного модуля ЗП та числа Рейнольдса і на підставі цих досліджень вивести узагальнену аналітичну залежність для звужувальних пристроїв конкретної конструкції.

Для вирішення задачі визначення коефіцієнта розширення торцевих ЗП, які застосовують в установці для діагностування побутових лічильників газу, може бути використаний підхід, описаний в нормативному документі ГОСТ 8.563.1-97 та в роботі [4]. Такий підхід полягає у визначенні та подальшому порівнянні витратних характеристик торцевого ЗП на стискуваному (повітря) і нестискуваному (вода) середовищі за умови гідродинамічної подібності потоків.

**Метою даної роботи** є експериментальне дослідження коефіцієнта розширення робочого середовища при проходженні через торцеві звужувальні пристрої, які застосовують в установці для діагностування побутових лічильників газу.

**Виклад основного матеріалу.** Для практичної реалізації такого підходу розроблений експериментальний стенд (рис.1), за допомогою якого можна визначати коефіцієнт витрати  $\alpha$  торцевого ЗП або добутку  $\alpha F$  в залежності від модуля ЗП  $m$  і числа  $\text{Re}$  на воді ( $\varepsilon=1$ ). Стенд складається з закріпленої на штативі 1 циліндричної ємності для рідини 2 з контрольною лінійкою 3 для визначення рівня і відповідно перепаду тиску перед ЗП. В нижній частині ємності передбачений вузол для монтування досліджуваних торцевих ЗП 4. Витік води через торцевий ЗП відбувається в ємність 5, розміщену на електронній вазі 6.

Оскільки вимірювання витрати необхідно здійснювати при малих числах Рейнольдса, а теоретичне обґрунтування за таких умов вимірювання свідчить про можливу непостійність коефіцієнта витрати, доцільно при дослідженні встановити закономірності зміни коефіцієнта витрати торцевих ЗП. З метою підвищення точності вимірювання торцевими ЗП запропоновано використовувати комплексний коефіцієнт витрати  $N_K$  торцевих ЗП, який об'єднує коефіцієнт витрати  $\alpha$ , коефіцієнт розширення робочого середовища  $\varepsilon$  та конструктивні параметри ЗП як функцію від числа Рейнольдса.



1 – штатив; 2 – ємність для рідини;  
3 – контрольна лінійка; 4 – торцевий ЗП;  
5 – ємність; 6 – електронна вага

### Рисунок 1 - Стенд для визначення витратних характеристик на воді для торцевих ЗП

Для окремого ЗП його можна подати виразом:

$$N_{Ki} = \alpha_i \cdot F_i \cdot \varepsilon_i, \quad (4)$$

де  $F_i$  – площа отвору  $i$ -го торцевого ЗП.

Експериментальні дослідження проводились на трьох торцевих ЗП з модулями 0,04; 0,16; 0,36.

При проведенні досліджень вимірювався час витікання контрольного об'єму води  $t$ , її маса  $m$ , температура  $T$  і одночасно фіксувався рівень води в ємності  $h$  для визначення гідростатичного тиску перед торцевим ЗП.

За результатами кожного з вимірювань розраховувались масова витрата води  $Q_{MB}$  та перепад тиску на ЗП  $\Delta p$  за виразами:

$$Q_{MB} = \frac{m}{t}, \quad (5)$$

$$\Delta p = \rho_B \cdot g \cdot h, \quad (6)$$

де  $\rho_B$  – густина води за умов досліджень.

Для кожної досліджуваної точки при різних умовах дослідження згідно з (1) визначалося число  $Re$  та добуток коефіцієнта витрати  $\alpha$  і площі отвору ЗП  $F$  при проведенні досліджень на воді ( $\varepsilon=1$ ). Виходячи з умов гідродинамічної подібності потоків для отриманого числа  $Re$  визначався комплексний коефіцієнт витрати  $N_K = f(Re)$ . З врахуванням виразів (1) та (4) вираз для визначення коефіцієнта розширення

робочого середовища у відповідності до (3) набуває вигляду:

$$\varepsilon = N_K \cdot \sqrt{2\rho_B \Delta p} / Q_{MB}. \quad (7)$$

На рис. 2 наведена ілюстрація експериментально отриманих результатів у сукупності з теоретично розрахованими для циліндричного сопла та конусної діафрагми [3].

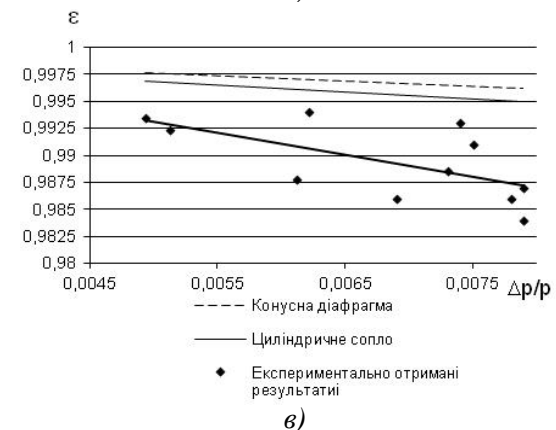
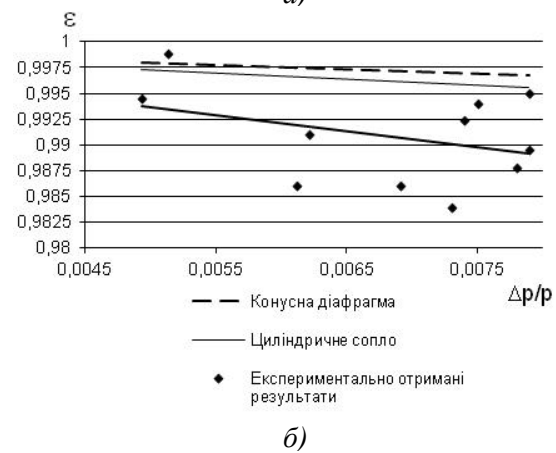
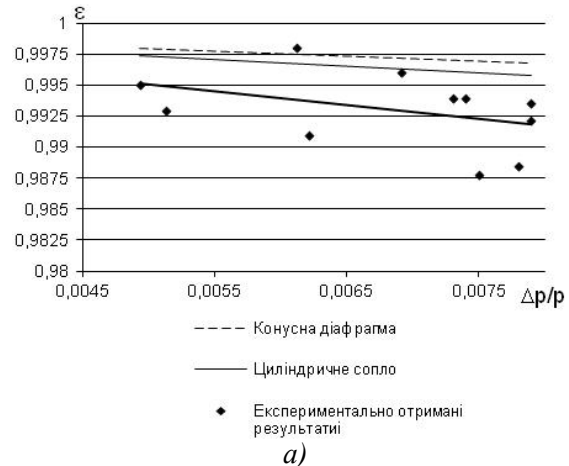


Рисунок 2 - Залежність коефіцієнта розширення ЗП з модулями 0,04 (а), 0,16 (б) та 0,36 (в) при вимірюванні витрати повітря

За результатами експериментально отриманих даних шляхом проведення апроксимації встановлені наступні аналітичні залежності зміни коефіцієнта розширення торцевих ЗП при роботі на повітрі:

$$\varepsilon(\Delta p / p) = -1,1144 \cdot \Delta p / p + 1,0006, m=0,04, (8)$$

$$\varepsilon(\Delta p / p) = -1,5404 \cdot \Delta p / p + 1,0013, m=0,16, (9)$$

$$\varepsilon(\Delta p / p) = -2,049 \cdot \Delta p / p + 1,0034, m=0,36. (10)$$

Для встановлення аналітичних залежностей зміни коефіцієнта розширення  $\varepsilon$  досліджуваних торцевих ЗП при роботі на природному газі, виходимо з умови пропорційності зміни коефіцієнта розширення кожного виду ЗП по відношенню до його зміни від переходу на інше робоче середовище:

$$\frac{\varepsilon - \varepsilon_K}{\varepsilon_{Ц} - \varepsilon_K} = \frac{\Delta\varepsilon - \Delta\varepsilon_K}{\Delta\varepsilon_{Ц} - \Delta\varepsilon_K}, (11)$$

де  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon_K$ ,  $\varepsilon_{Ц}$  – коефіцієнт розширення торцевого ЗП, конусної діафрагми та циліндричного сопла, обчислений згідно з [3] за умови роботи на повітрі відповідно;  $\Delta\varepsilon$ ,  $\Delta\varepsilon_K$ ,  $\Delta\varepsilon_{Ц}$  – різниця коефіцієнтів розширення при роботі на повітрі і природному газі для торцевого ЗП, конусної діафрагми та циліндричного сопла відповідно.

Розв'язавши вираз (11) та врахувавши, що  $\Delta\varepsilon = \varepsilon - \varepsilon_z$  (різниця коефіцієнтів розширення при роботі на повітрі і природному газі для торцевого ЗП), отримуємо наступний вираз для визначення коефіцієнта розширення  $\varepsilon_z$  торцевих ЗП при роботі на природному газі:

$$\varepsilon_z = \varepsilon + \Delta\varepsilon_K - \frac{(\varepsilon - \varepsilon_K)(\Delta\varepsilon_{Ц} - \Delta\varepsilon_K)}{(\varepsilon_{Ц} - \varepsilon_K)}. (12)$$

За результатами обчислень згідно з (12) та після апроксимації отриманих даних аналітичні залежності для визначення коефіцієнта розширення торцевих ЗП на природному газі

набувають наступного вигляду:

$$\varepsilon_z(\Delta p / p) = -1,1951 \cdot \Delta p / p + 1,0008, m=0,04, (13)$$

$$\varepsilon_z(\Delta p / p) = -1,7765 \cdot \Delta p / p + 1,0018, m=0,16, (14)$$

$$\varepsilon_z(\Delta p / p) = -2,3875 \cdot \Delta p / p + 1,0045, m=0,36. (15)$$

На рис.3 наведені залежності зміни коефіцієнта розширення для різних типів ЗП.

З метою визначення поправкового коефіцієнта  $k_\varepsilon = f(\Delta p / p)$  на зміну значення коефіцієнта розширення торцевих ЗП визначалось співвідношення коефіцієнтів розширення для одного і того ж ЗП, розрахованих для природного газу і повітря відповідно. За результатами обчислень отримані наступні аналітичні залежності:

$$k_\varepsilon(\Delta p / p) = -0,0816 \cdot \Delta p / p + 1,0002, m=0,04, (16)$$

$$k_\varepsilon(\Delta p / p) = -0,2398 \cdot \Delta p / p + 1,0005, m=0,16, (17)$$

$$k_\varepsilon(\Delta p / p) = -0,3439 \cdot \Delta p / p + 1,0012, m=0,36. (18)$$

Отримані результати підтверджують загальну закономірність підвищення коефіцієнта розширення із зростанням співвідношення  $\Delta p / p$ , а також дещо змінений характер функціональної залежності порівняно з циліндричними соплами і конусною діафрагмою. Зміна характеру стосується меншого значення коефіцієнта розширення із відомими нестандартними ЗП. Так, для ЗП з  $m=0,36$  (рис.2) за співвідношення  $\Delta p / p = 0,005 - 0,3\%$  і на  $0,75\%$  для  $\Delta p / p = 0,008$ . При цьому розходження зростає із збільшенням  $m$ . Крім того, з графіків очевидним є розкид експериментальних даних в межах  $0,5\%$ , що можна пояснити похибкою використаних засобів вимірювань експериментального стенду. Однею із причин наявності систематичної похибки може бути конструктивна неадекватність вузла монтажу торцевого ЗП при його функціонуванні на повітрі і на воді.

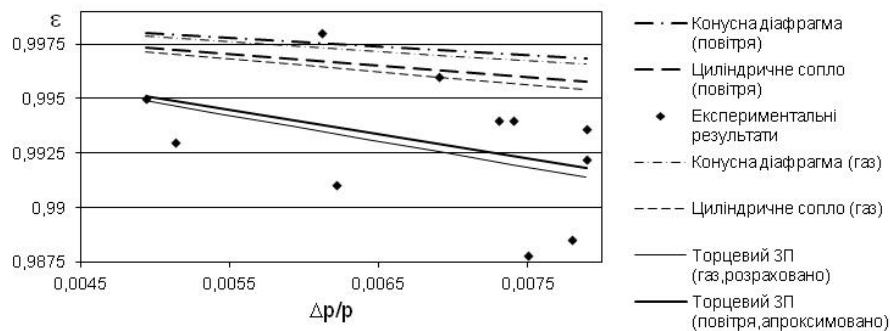


Рисунок 3 - Залежність коефіцієнта розширення ЗП ( $m=0,04$ ;  $d=0,5$  мм) при вимірюванні витрати повітря і природного газу

## ВИСНОВКИ

Сфера практичного застосування торцевих ЗП в газовому обладнанні є доволі широкою. Методика вимірювання об'єму і витрати газу із використанням торцевих ЗП фактично є опосередкованим вимірюванням витрати, суть якої зводиться до застосування торцевих ЗП як зразкових засобів, які укомплектовані давачами тиску і температури робочого середовища.

Проведені дослідження дають змогу встановити залежність коефіцієнта розширення для конструкції торцевого ЗП як функції від відносного модуля ЗП і числа Re та вивести узагальнену аналітичну залежність зміни коефіцієнта розширення для ЗП конкретної конструкції.

1. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества вещества: Справочник: изд. 4-е, переработ. и доп. / П.П. Кремлевский – Л.: Издат. Машиностроение, 1989. – 704 с.  
2. Пістун Є.П. Нормування витратомірів змінного перепаду тиску/ Є. П. Пістун, Л. В. Лесовой – Львів: Вид-во ЗАТ «Інститут енергоаудиту та обліку енергоносіїв», 2006. –

576 с. 3. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества вещества: Справочник: Кн.1 / П. П. Кремлевский. – СПб.: Политехника, 2002. – 409 с. 4. Кабза Е. Математическое моделирование расходомеров с сужающими устройствами / Е. Кабза; [пер. с польского; под ред. П. П. Кремлевского]. –Л.: Машиностроение: Ленинградское отделение, 1981. – 115 с. 5. Пат. 2164667 Российская Федерация, G 01 F 25/00. Установка для стендовых исследований расходных характеристик гидравлических расходомеров. / Вежневцев П. Д., Маклаков Н. Н., Зверев В. М., Голиков А. Н., Попов А. В.; заявники и патентовладельники – ФГУП «Исследовательский центр им. Келдыша М.В.». – № 9911327272/28; заявл. 17.06.01; опубл. 27.03.01.

**Поступила в редакцію 13.12.2015р.**

**Рекомендували до друку: докт. техн. наук, проф. Середюк О. Є., докт. техн. наук, проф. Пістун Є. П.**