

Вимірювання фізико-хімічних величин

УДК 681.121

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

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

ДОСЛІДЖЕННЯ ТОРЦЕВИХ СОПЕЛ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ МАЛИХ ВИТРАТ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

Проведені експериментальні дослідження торцевих сопел, які входять в склад установки для дослідження побутових лічильників газу по місцю експлуатації. В результаті досліджень було визначено значення комплексного коефіцієнта витрати для трьох торцевих сопел, як функцій від числа Рейнольдса. Здійснено апроксимацію комплексного коефіцієнта витрати від числа Рейнольдса, що дає можливість проводити вимірювання витрати газу з використанням торцевих сопел на повітрі і природному газі. Також проведений метрологічний аналіз отриманих результатів, який підтвердив можливість використання торцевих сопел в установках для дослідження побутових лічильників газу.

Ключові слова: торцеве сопло, комплексний коефіцієнт витрати, повітря, природний газ.

Вступ

Постановка проблеми. На сьогоднішній день газова промисловість України є однією із найважливіших галузей енергетичного напрямку економіки, оскільки частка природного газу у споживанні первинної енергії перевищує 45%. Значну частину якої складає використання газу в комунально-побутовій сфері.

Побутові лічильники газу (ПЛГ) при досягненні міжпіврічного терміну підлягають черговій повірці шляхом демонтажу і транспортування до органів Держспоживстандарту для перевірки метрологічних характеристик на спеціальних повірочних установках з використанням повітря як робочого середовища. У випадку невідповідності ПЛГ паспортним значенням останній підлягає ремонту або заміні на справний. Така методологія приводить до зниження точності і достовірності визначення метрологічних характеристик ПЛГ, оскільки повірка здійснюється на середовищі заміни, тобто повітрі.

Авторами розроблена установка для дослідження ПЛГ в умовах експлуатації з використанням природного газу [1]. В якості первинних перетворювачів в цій установці використані торцеві сопла, аналогічні до тих, якими комплектуються побутові газові плити. Це обґрунтовує актуальність їх дослідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз літературних джерел показав, що дослідження здійснюються здебільшого стосовно стандартних звужувальних пристроїв (ЗП) [2 – 4], які використовуються в якості первинних перетворювачів для

вимірювання великих витрат методом змінного перепаду тиску, що не відповідає умовам функціонування ПЛГ. Наявність нормативного документу [5] дає можливість використовувати для вимірювання малих витрат спеціальні ЗП, однак їх застосування є практично неможливим в запропонованій установці, так як в її конструктивному виконанні неможливо реалізувати відбір тиску до і після ЗП. Оскільки при роботі установки газ спалюється у пальниках, які містять торцеві ЗП для витікання газу у газоспальвальний вузол, доцільним є дослідження торцевих ЗП. Відомі праці щодо дослідження нестандартних торцевих ЗП стосуються їх виконання у вигляді діафрагм [6] і можуть бути застосовані також на великих витратах.

Дослідження торцевих ЗП, про які інформується в довіднику [7], виконувались переважно для великих витрати, а отримані значення коефіцієнта витрати різними авторами є не однозначними і суттєво відрізняються між собою.

Метою даної роботи є дослідження торцевих сопел для вимірювання малих витрат природного газу, при створенні установок для дослідження засобів обліку природного газу в комунально-побутовій сфері.

Викладення основного матеріалу

Стандартні ЗП, вимоги до конструкції та встановлення яких регламентовані в [8], використовують на трубах діаметром більше 50мм та для чисел Рейнольдса Re більших 10000. Тому їх застосування в установці для досліджень ПЛГ є неможливим,

оскільки параметри будинкових газових мереж не відповідають цим вимогам.

Спеціальні ЗП, вимоги до яких регламентовані [5], можуть використовуватися для малих Re (порядку 10^2-10^4), низьких тисках та діаметрах трубопроводу менших 50 мм. До них належать: подвійна діафрагма, діафрагма з вхідним конусом, сопло "чверть круга", сегментна діафрагма, зносостійка діафрагма і циліндричне сопло.

Виходячи із характеристик спеціальних ЗП для умов вимірювання малих витрат, кількісне значення яких може бути оцінене діапазоном робочих витрат ПЛГ (0,016–4) м³/год, в найбільшій мірі підходять торцеві сопла (рис. 1).

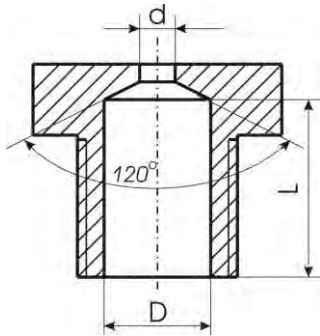


Рис. 1. Схематичне зображення торцевого сопла

Як відомо, розрахункові методи визначення коефіцієнта витрати ЗП мають значну методичну похибку, (0,35–0,6)%. Окрім того, на даний час відсутні методики розрахунку торцевих сопел, а адаптація уже розроблених методик приведе до підвищення методичної похибки. Тому з метою її зменшення доцільним є визначення комплексного коефіцієнта витрати експериментальним шляхом, у вигляді добутку коефіцієнта витрати α , площі поперечного перерізу F ЗП та коефіцієнта розширення ϵ робочого середовища [9].

Експериментальне визначення комплексного коефіцієнта $\alpha F \epsilon$ проводилося на еталонній установці дзвонової типу Темпо-1 (Інженерно-впровадницька фірма ТЕМПО, м. Івано-Франківськ) з границею сумарної відносної похибки передавання одиниці об'єму газу $\pm 0,15\%$ в діапазоні витрат (0,016–10) м³/год. Досліджувалися торцеві ЗП з діаметром вихідного отвору 0,56 мм, 1,0 мм, 1,5 мм, модулі m яких становлять 0,05; 0,16; 0,36 відповідно. Через кожне торцеве сопло при п'яти фіксованих значеннях надлишкового тиску в діапазоні (350–1650) Па пропускався контрольний об'єм $V_{дз} = 0,01$ м³. При цьому вимірювався час τ відтворення установкою контрольного об'єму, надлишковий тиск на ЗП $p_{ЗП}$ та під дзвоном $p_{дз}$, температуру на ЗП $T_{ЗП}$ та під дзвоном $T_{дз}$.

Формула для вимірювання витрати ЗП:

$$Q_C = \alpha \epsilon F \sqrt{2 \Delta p \cdot \frac{p \cdot T_C}{\rho_C \cdot p_C \cdot T \cdot K}}, \quad (1)$$

де Q_C – об'ємна витрата природного газу за стандартних умов; Δp – перепад тиску на ЗП; p_C, T_C – тиск і температура за стандартних умов; p, T – тиск і температура перед ЗП; ρ_C – густина природного газу за стандартних умов відповідно; K – коефіцієнт стисливості газу.

Контрольний об'єм відтворюється дзвоною установкою за робочих умов $p_{дз}, T_{дз}$, які відрізняються від стандартних, густина повітря під дзвоном $\rho_{дз}$ і перед ЗП $\rho_{ЗП}$ записується виразами:

$$\rho_{дз} = \rho_C \frac{p_{дз}}{p_C} \cdot \frac{T_C}{T_{дз}} \cdot \frac{1}{K_{дз}}, \quad (2)$$

$$\rho_{ЗП} = \rho_C \frac{p_{ЗП}}{p_C} \cdot \frac{T_C}{T_{ЗП}} \cdot \frac{1}{K_{ЗП}}. \quad (3)$$

Прирівнявши контрольний об'єм перерахований до стандартних умов з об'ємом, вимірним торцевим соплом на базі формул (1) – (3) отримуємо такий вираз для визначення $\alpha F \epsilon$:

$$\alpha F \epsilon = \frac{V_{дз}}{\tau} \cdot \sqrt{\frac{\rho_C \cdot T_C}{p_C \cdot K}} \cdot \frac{p_{дз}}{T_{дз}} \cdot \sqrt{\frac{T_{ЗП}}{2 \cdot \Delta p_{ЗП} \cdot \rho_{ЗП}}}. \quad (4)$$

Експериментальні дослідження торцевих сопел здійснювалися на повітрі. Використовуючи теорію гідродинамічної подібності є можливим переведення значення $\alpha F \epsilon$ до умов роботи на природному газі з коригуванням до Re . Тому доцільно подати залежність $\alpha F \epsilon$ не від витрати, а від Re , яке обчислюється наступним чином:

$$Re = \frac{4 \cdot Q \cdot \rho_{ЗП}}{\pi \cdot D \cdot \mu}; \quad (5)$$

$$Q = \frac{V_{дз}}{\tau}, \quad (6)$$

де Q – об'ємна витрата природного газу за робочих умов; μ – коефіцієнт динамічної в'язкості газу; D – діаметр прямолінійної ділянки трубопроводу до ЗП.

За результатами досліджень побудовані наступні залежності комплексного коефіцієнта витрати торцевих сопел від Re $\alpha F \epsilon = f(Re)$ (рис. 2).

Оскільки отримані значення комплексного коефіцієнта витрати носять нелінійний характер і за кількісними характеристиками між собою суттєво відрізняються, то здійснено апроксимацію отриманих залежностей з метою можливості їх практичного застосування при вимірюванні витрати газу торцевими соплами:

– для ЗП, яке характеризується $m = 0,05$:

$$\alpha F \epsilon(Re) = -1,84 \cdot 10^{-13} Re^2 + 1,35 \cdot 10^{-10} Re + 1,78 \cdot 10^{-7}, \quad (7)$$

– для ЗП, яке характеризується $m = 0,16$:

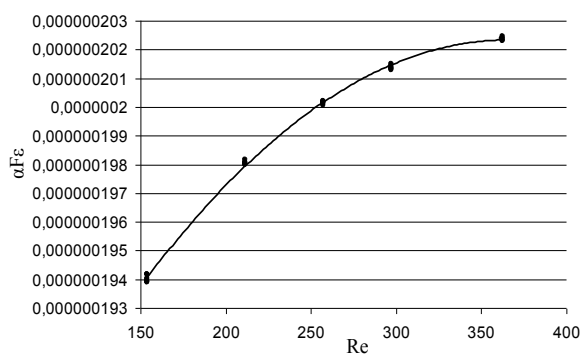
$$\alpha F_{\epsilon}(Re) = 2,43 \cdot 10^{-14} Re^2 - 1,03 \cdot 10^{-11} Re + 6,17 \cdot 10^{-7}, \quad (8)$$

– для ЗП, яке характеризується $m = 0,36$:

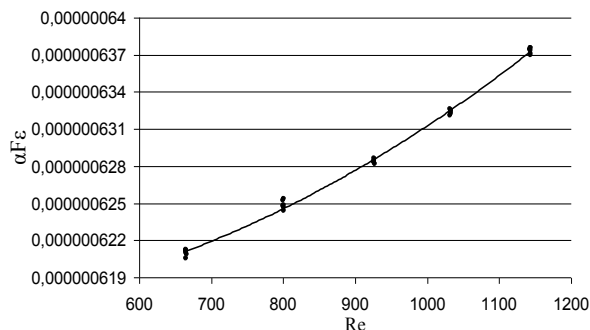
$$\alpha F_{\epsilon}(Re) = 6,3 \cdot 10^{-14} \cdot Re^2 - 2,65 \cdot 10^{-10} \cdot Re + 1,42 \cdot 10^{-6}. \quad (9)$$

Достовірність апроксимації для наведених виразів (7) – (9) становить 0,99.

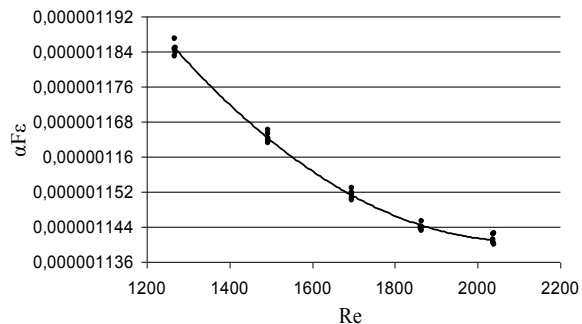
Для визначення комплексного коефіцієнта витрати торцевих сопел був використаний робочий еталон об'єму газу дзвонового типу Темпо-1 з границею сумарної відносної похибки передавання одиниці об'єму газу $\pm 0,15\%$ в діапазоні витрат $(0,016 \dots 10) \text{ м}^3/\text{год}$. Ця похибка кількісно буде оцінювати невиключену систематичну похибку (НСП) $\Theta_{\alpha F_{\epsilon}}$ визначення коефіцієнта αF_{ϵ} .



а



б



в

Рис. 2. Залежність коефіцієнта αF_{ϵ} від числа Рейнольдса
а – ЗП з $m = 0,05$; б – ЗП з $m = 0,16$; в – ЗП з $m = 0,36$

Оцінка середнього квадратичного відхилення (СКВ) середнього значення, що характеризує випадкову складову похибки визначення добутку αF_{ϵ} здійснювалося за алгоритмом:

$$\overline{\sigma[\alpha F_{\epsilon}]} = \sqrt{\left(\frac{\partial \alpha F_{\epsilon}}{\partial \tau} \cdot \overline{\sigma[\tau]}\right)^2 + \left(\frac{\partial \alpha F_{\epsilon}}{\partial p_{дз}} \cdot \overline{\sigma[p_{дз}]}\right)^2 + \left(\frac{\partial \alpha F_{\epsilon}}{\partial T_{дз}} \cdot \overline{\sigma[T_{дз}]}\right)^2 + \left(\frac{\partial \alpha F_{\epsilon}}{\partial T_{ЗП}} \cdot \overline{\sigma[T_{ЗП}]}\right)^2 + \left(\frac{\partial \alpha F_{\epsilon}}{\partial p_{ЗП}} \cdot \overline{\sigma[p_{ЗП}]}\right)^2 + \left(\frac{\partial \alpha F_{\epsilon}}{\partial \Delta p_{ЗП}} \cdot \overline{\sigma[\Delta p_{ЗП}]}\right)^2}, \quad (10)$$

де $\frac{\partial \alpha F_{\epsilon}}{\partial \tau}$, $\frac{\partial \alpha F_{\epsilon}}{\partial p_{дз}}$, $\frac{\partial \alpha F_{\epsilon}}{\partial T_{дз}}$, $\frac{\partial \alpha F_{\epsilon}}{\partial T_{ЗП}}$, $\frac{\partial \alpha F_{\epsilon}}{\partial p_{ЗП}}$, $\frac{\partial \alpha F_{\epsilon}}{\partial \Delta p_{ЗП}}$ –

коефіцієнти вагомості впливу часу, тиску під дзвоном, температури під дзвоном, температури на вході торцевого ЗП, тиску на вході торцевого ЗП та надлишкового тиску на ЗП на результат визначення добутку αF_{ϵ} відповідно; $\overline{\sigma[\tau]}$, $\overline{\sigma[p_{дз}]}$, $\overline{\sigma[T_{дз}]}$, $\overline{\sigma[T_{ЗП}]}$, $\overline{\sigma[p_{ЗП}]}$, $\overline{\sigma[\Delta p_{ЗП}]}$ – СКВ середнього значення вхідних параметрів (часу, тиску під дзвоном, температури під дзвоном, температури на вході ЗП, тиску на вході ЗП відповідно).

Обчислення СКВ середнього значення для кожного вхідного параметра здійснювалося за залежністю, конкретизованою для вимірювання часу відтворення контрольного об'єму:

$$\overline{\sigma[\tau]} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tau_i - \bar{\tau})^2}{n(n-1)}}, \quad (11)$$

де τ_i – час протікання контрольного об'єму при i -у вимірюванні; $\bar{\tau}$ – середнє значення часу протікання контрольного об'єму за n вимірювань.

За аналогічною формулою знаходять СКВ для інших вхідних параметрів.

Результати обчислень за формулами (10), (11) із врахуванням коефіцієнтів вагомості, які обчислені на базі формули (4) показали, що значення СКВ середнього значення експериментально визначеного добутку αF_{ϵ} не перевищує 0,055%.

Для можливості практичного використання комплексних коефіцієнтів витрати торцевих сопел була проведена їх апроксимація як функція від числа Re . Процедура апроксимації внесла певну методичну похибку $\Theta_{(\alpha F_{\epsilon})a}$. Для оцінки її величини вибираємо максимальне відносне значення СКВ апроксимації, тобто $\Theta_{(\alpha F_{\epsilon})a} = \pm 0,1\%$.

Ще однією складовою визначення $\alpha F_{\epsilon} = f(Re)$ є похибка Θ_{Re} від визначення Re , оскільки по його значенню за апроксимаційними залеж-

ностями визначається величина комплексного коефіцієнта витрати αF_ε . Виходячи з цього нам необхідно оцінити похибку визначення числа Re з врахуванням її коефіцієнту вагомості, а саме:

$$\Theta_{Re} = \frac{\partial(\alpha F_\varepsilon)}{\partial Re} \cdot \frac{\delta Re}{\alpha F_\varepsilon}, \quad (12)$$

де $\frac{\partial(\alpha F_\varepsilon)}{\partial Re}$ – значення коефіцієнта вагомості зміни Re; δRe – похибка визначення Re.

Наприклад, при протіканні природного газу через ЗП з вхідним внутрішнім діаметром $D = 2,5$ мм за витрати $0,25$ м³/год, що відповідає $Re = 2050$, що відповідає середньому значенню комплексного коефіцієнта витрати $\alpha F_\varepsilon = 2 \cdot 10^{-7}$, згідно (12) похибка $\Theta_{Re} = 0,007\%$.

Висновки

Проведені експериментальні дослідження, в результаті яких було визначено числові значення комплексного коефіцієнта витрати для трьох торцевих сопел, як функцій від числа Рейнольдса.

За результатами досліджень здійснена апроксимація комплексного коефіцієнта витрати від числа Рейнольдса, яка дає можливість проводити вимірювання витрати газу з використанням торцевих сопел на повітрі і природному газі.

Здійснений метрологічний аналіз результатів досліджень торцевих сопел, який підтвердив можливість їх використання як еталонних пристроїв для вимірювання малих витрат повітря і природного газу.

Список літератури

1. 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.
2. Пістун Є.П. Нормування витратомірів змінного перепаду тиску / Є.П. Пістун, Л.В. Лесовой. – Львів:

3. Вид-во ЗАТ «Інститут енергоаудиту та обліку енергоносіїв», 2006. – 576 с.

4. Лесовой Л.В. Визначення поправного коефіцієнта на шорсткість внутрішньої поверхні трубопроводу під час вимірювання витрати газу / Л.В. Лесовой, Р.М. Федоришин // *Вісник: Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація*. – 2005. – № 537. – С. 148-154.

5. Пістун Е. П. Уточнение поправочного коэффициента на притупление входной кромки диафрагмы расходомеров переменного перепада давления / Е.П. Пістун, Л.В. Лесовой, Р.М. Федоришин // *Коммерческий учет энергоносителей: материалы 22-й Междунар. научн.-практ. конф.* – Санкт-Петербург, 2005. – С. 421-428.

6. Методические указания. Расход жидкостей и газов. Методика выполнения измерений с помощью специальных сужающими устройствами: РД 50-411-83. – [Введен с 1983-06-17]. – М: Изд-во стандартов, 1984. – 262 с.

7. Рис В.Ф. Коэффициенты расхода торцевых диафрагм при несстенном входе воздуха / В.Ф. Рис, Н.А. Широков // *Энергомашиностроение*. – 1984. – № 10. – С. 13-14.

8. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества вещества: справочник / П.П. Кремлевский. – СПб.: Политехника, 2002. – Кн. 1. – 409 с.

9. Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами: РД 50-213-80. – [Введен с 1982-01-01]. – М: Изд-во стандартов, 1982. – 318 с.

10. Середюк О.Є. Експериментальне визначення коефіцієнта витрати спеціальних звужувальних пристроїв / О.Є. Середюк, А.Г. Винничук // *Приладобудування 2011: стан і перспективи: 10-та міжнар. наук.-техн. конф., 19-20 квітня 2011 р., Київ: зб. наук. праць* – К.: ПБФ, НТУУ «КПІ», 2011. – С. 230-231.

Надійшла до редколегії 31.08.2011

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОРЦЕВЫХ СОПЕЛ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ РАСХОДОВ ПРИРОДНОГО ГАЗА

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

Проведены экспериментальные исследования торцевых сопел, которые входят в состав установки для исследования бытовых счетчиков газа по месту эксплуатации. В результате исследований были определены значения комплексного коэффициента расхода для трех торцевых сопел, как функций от числа Рейнольдса. Осуществлено аппроксимацию комплексного коэффициента расхода от числа Рейнольдса, что дает возможность проводить измерения расхода газа с использованием торцевых сопел на воздухе и природном газе. Также проведен метрологический анализ полученных результатов, который подтвердил возможность использования торцевых сопел в установках для исследования бытовых счетчиков газа.

Ключевые слова: торцевое сопло, комплексный коэффициент расхода, воздух, природный газ.

RESEARCH OF THE BUTT-END NOZZLES FOR MEASURING OF NATURAL GAS SMALL FLOW

A.G. Vynnychuk, O.E. Seredyuk, L.A. Vytvytska

The experimental study of butt-end nozzles, which are included in the device for domestic gas meters studies in the operation place were done. As a result of research it was determined the value of complex gas flow coefficient for

three butt-end nozzles as a function of Reynolds number. The approximation of complex gas flow coefficient as a function of Reynolds number, which makes it possible to measure gas flow using butt-end nozzle in the air and natural gas, were done. Also the metrological analysis of the results were held, it confirmed possible of using of butt-end nozzles in device for domestic gas meters investigation.

Keywords: *butt-end nozzle, complex gas flow coefficient, air, natural gas.*