*ISSN 1993-9981 Методи та прилади контролю якості, № 23, 2009*

УДК 518:006.91

# МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ГАЗОВОЇ МЕРЕЖІ НА ТОЧНІСТЬ ПЕРЕВІРОЧНИХ УСТАНОВОК ДЛЯ ПОБУТОВИХ ЛІЧИЛЬНИКІВ ГАЗУ

***О.Є. Середюк, А.Г. Винничук***

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

*Проаналізовані математичні моделі впливу фізичних параметрів газової мережі на функціонування мобільної перевірочної установки для побутових лічильників газу. Здійснені експериментальні дослідження встановлених закономірностей втрат тиску в трубопроводах газової мережі з використанням розробленої експериментальної установки. Проведений порівняльний аналіз результатів теоретичних і експериментальних досліджень.*
*Ключові слова: побутовий лічильник газу, мобільна повір очна установка, число Рейнольда, втрата тиску, гумовий шланг.*

*Проанализированы математические модели влияния физических параметров газовой сети на функционирование мобильной проверочной установки для бытовых счетчиков газа. Осуществлены экспериментальные исследования установленных закономерностей потерь давления в трубопроводах газовой сети с использованием разработанной экспериментальной установки. Выполнен сравнительный анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований.*
*Ключевые слова: бытовой счетчик газа, мобильная поверь глазная установка, число Рейнольда, потеря давления, резиновый шланг.*

*Mathematical models of gas network physical parametres influence on functioning of mobile verifying installation for common gas meters were analyzed. Experimental researches of the gas network pressure loss established laws with used of the developed experimental installation were carried out. A comparative analysis of theoretical and experimental research results was carried out.*
*Keywords: domestic meter of gas, mobile trust an eye setting, number of Reynold, loss of pressure, rubber hose.*

Один із напрямків раціонального використання природного газу полягає в підвищенні точності обліку природного газу [1,2], що неможливо без дослідження метрологічних характеристик лічильників і витратомірів газу під час їх експлуатації. При цьому для побутових лічильників газу (ПЛГ) доцільним є проведення їх досліджень без демонтажу безпосередньо на місці експлуатації з використанням в якості робочого середовища природного газу [1].

Для вирішення питання перевірки правильності функціонування ПЛГ можна використовувати спосіб визначення їх метрологічних характеристик за допомогою діагностувальних установок [3]. Їх створення передбачає використання еталонного засобу опосередкованого вимірювання витрати природного газу [4], суть якого зводиться до коригування показів еталонного засобу з урахуванням тиску і температури природного газу. Для реалізації такого підходу необхідно дослідити зміну тиску і температури природного газу при його протіканні газовою мережею від ПЛГ до еталонного засобу вимірювання.

Аналіз літературних джерел показав, що відомі функціональні залежності зміни параметрів природного газу стосуються перш за все питань проектування систем газопостачання населених пунктів [5] або трубопровідного транспортування газу взагалі [6].

Відомі наукові дослідження [7], де розглядаються прикладні питання вивчення гідродинамічних процесів в еталонних витратовимірювальних установках. Однак наведені в них залежності і результати розрахунків стосуються втрат тиску для різних видів місцевих опорів (згин, розширення або звуження, переходи при зміні діаметра труби). Результати досліджень здійснені тільки для еталонних повірочних установок і не конкретизують числових значень використаних при цьому коефіцієнтів у розрахункових формулах.

Тому доцільним є експериментальне

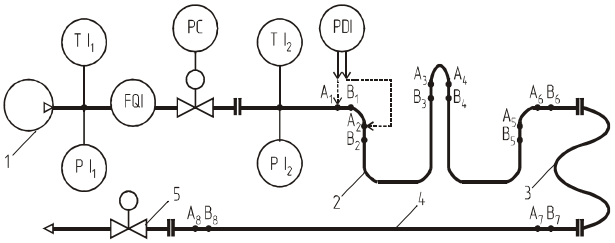
визначення апроксимаційних залежностей втрат тиску для різних видів місцевих опорів трубопроводів будинкових і квартирних мереж газопроводів. Крім того, необхідним є розроблення узагальнених закономірностей для різних діапазонів чисел Рейнольдса з урахуванням ламінарного, перехідного і турбулентного режимів потоку газу.

Метою роботи є теоретичне і фізичне моделювання впливу параметрів газової мережі на точність перевірочних установок для побутових лічильників газу, зокрема, за умов зміни витрат газу в діапазоні (0–10)м$^3$/год.

При моделюванні закономірностей зміни тиску природного газу в газовій мережі необхідно досліджувати вплив таких параметрів: довжина трубопроводу, його діаметр, шорсткість внутрішньої поверхні, матеріал трубопроводу (сталь, резина), місцеві опори (згини, вузли під'єднання гнучкого шланга) [6].

З метою вирішення вказаного створена експериментальна установка для фізичного моделювання впливу тиску і температури робочого середовища при зміні витрати природного газу в будинкових і квартирних мережах (рис.1). Установка реалізована на базі сталевого трубопроводу з умовним діаметром $D_y$=15мм із згинами труби (колін на 90° і 180°) і ділянкою гнучкого трубопроводу з гумово-технічного шлангу, який використовується в побуті для під'єднання газоспоживного обладнання (плити, котли і т.п.).

Джерелом потоку повітря в установці є повітродувка на базі порохотяга 1, який відтворює витрати в діапазоні (0–30)м$^3$/год. при максимальному надлишковому тиску на його виході 8 кПа. На виході джерела 1 розміщений мембранний ПЛГ типорозміру G6 (позначення FQI), на якому вимірюється тиск і температура повітря (прилади $PI_1$ і $TI_1$, відповідно). Надлишковий тиск на вході дослідних ділянок 2−4 установки регулюється за допомогою регулятора витрати РС з вихідним тиском в діапазоні (0,5–7) кПа, а відтворювана витрата при цьому формується задавачем 5. На вході дослідної ділянки 1 вимірюються надлишковий тиск і температура повітря (прилади $PI_2$ і $TI_2$ відповідно). Криволінійна 2 і прямолінійна 4 ділянки трубопроводу містять спеціальні отвори $A_1$–$A_8$ для під'єднання штуцерів для вимірювання втрат тиску дифманометром PDI на окремих елементах і ділянках трубопровода. В стенді передбачені аналогічні місця ($B_1$–$B_8$) для встановлення первинних перетворювачів вимірювання температури і градієнта температури досліджуваних ділянок трубопроводу.




*1-джерело витрати; 2- криволінійна ділянка трубопровода; 3- гнучкий гумовий шланг; 4- прямолінійна ділянка труботровода; 5- задавач витрати*

**Рисунок 1 – Функціональна схема експериментальної установки**

Спочатку здійснювалося теоретичне моделювання втрат тиску газу за умов наявності в трубопроводі ламінарного, перехідного і турбулентного режимів течії. При цьому використовувалися відомі апроксимаційні залежності [5,6,8] для різних видів гідравлічних опорів.

Втрати тиску на тертя в трубі $\Delta p_{тр}$ можна визначити за формулою[5]:

$$\Delta p_{тр} = \lambda_{тр} \frac{l}{D} \frac{\rho v^2}{2}, \qquad (1)$$

де $l$ – довжина досліджуваної ділянки труби, $D$ – внутрішній діаметр труби, ρ - густина робочого середовища, $v$ – швидкість руху робочого середовища, $\lambda_{тр}$ – коефіцієнт опору одиниці відносної довжини ділянки труби.

Значення коефіцієнта $\lambda_{тр}$ залежить від числа Рейнольдса Re, шорсткості внутрішніх стінок труби Δ і внутрішнього діаметра $D$ труби наступним чином [8]:

$$\lambda_{тр} = \begin{cases} \dfrac{64}{\mathrm{Re}} & при\ \mathrm{Re} \le 2000, \\ \dfrac{1}{(1{,}8 \lg \mathrm{Re} - 1{,}64)^2} & при\ 2000 < \mathrm{Re} \le 4000, \\ \dfrac{0{,}3164}{\mathrm{Re}^{0{,}25}} & при\ 4000 < \mathrm{Re} \le 10\dfrac{D}{\Delta}, \\ 0{,}11\left(\dfrac{\Delta}{D} + \dfrac{68}{\mathrm{Re}}\right)^{0{,}25} & при\ 10\dfrac{D_0}{\Delta} < \mathrm{Re} \le 560\dfrac{D}{\Delta}, \\ 0{,}11\left(\dfrac{\Delta}{D}\right)^{0{,}25} & при\ \mathrm{Re} > 560\dfrac{D}{\Delta}. \end{cases} \qquad (2)$$

Для визначення втрат тиску $\Delta p_{гш}$ на тертя в гумовому гнучкому шлангу приймемо, що його коефіцієнт опору $\lambda_{гш}$ буде відповідати умовам протікання потоку у гладкостінних трубах. Тому

втрати тиску можуть бути розраховані за формулою (1), а значення $\lambda_{гш}$ визначається наступними формулами [8]:

$$\lambda_{гш} = \begin{cases} \dfrac{64}{\mathrm{Re}} \ при\ \mathrm{Re} \le 2000, \\ \dfrac{0{,}3164}{\mathrm{Re}^{0{,}25}} \ при\ 2000 < \mathrm{Re} \le 4000, \\ \dfrac{1}{(1{,}8 \lg \mathrm{Re} - 1{,}64)^2} \ при\ \mathrm{Re} > 4000. \end{cases} \quad (3)$$

Втрати тиску на опір згину труби визначається за формулою [6]:

$$\Delta p_{зг} = 0{,}0175\, \lambda_{зг} \delta^0 \frac{R}{D} \cdot \frac{\rho v^2}{2}, \quad (4)$$

де $\Delta p_{зг}$ - втрати тиску на опір одного коліна, $\delta^0$ – кут згину труби, $R$ – радіус згину труби, $\lambda_{зг}$ - коефіцієнт опору одного згину труби на $90^0$.

При цьому значення коефіцієнта $\lambda_{зг}$ визначається наступним чином [8]:

$$\lambda_{зг} = \begin{cases} \dfrac{20}{\mathrm{Re}^{0{,}65}} k^{0{,}175} \ при\ 50 < \mathrm{Re}\sqrt{k} \le 600, \\ \dfrac{10{,}4}{\mathrm{Re}^{0{,}55}} k^{0{,}225} \ при\ 600 < \mathrm{Re}\sqrt{k} \le 1400, \\ \dfrac{5}{\mathrm{Re}^{0{,}45}} k^{0{,}275} \ при\ 1400 < \mathrm{Re}\sqrt{k} \le 5000. \end{cases} \quad (5)$$

де $k = D/2R$ - параметр геометричної форми згину.

З урахуванням конкретної форми внутрішнього поперечного перерізу гумового гнучкого шланга розрахунок втрат тиску на ньому повинен передбачати обчислення втрат на окремих місцевих опорах, зокрема, на переході від внутрішнього діаметру сталевої труби 16мм до 6мм у місці затискання кріплення штуцера шланга і перехід від цієї ділянки до фактичного значення діаметру 9мм гумового шланга, а також наступний зворотний перехід, тобто від 9мм до 6мм і далі до 16мм. Тому втрати тиску при звуженні потоку $\Delta p_{зв}$ визначаються за формулою [6]:

$$\Delta p_{зв} = \zeta_{мзв}\, \rho v^2 \big/ 2, \quad (6)$$

де $\zeta_{мзв}$ - коефіцієнт місцевого гідравлічного опору при звуженні потоку.

Значення $\zeta_{мзв}$ при $\mathrm{Re} < 10^4$ вибираються з діаграми [8], а при $\mathrm{Re} \ge 10^4$ розраховуються за формулою Борда-Карно [8]:

$$\zeta_{мзв} = 0{,}5\left(1 - F_1/F\right)^2, \quad (7)$$

де $F$, $F_1$ – площі поперечного перерізу ділянки до і після звуження труби, відповідно.

Втрати тиску $\Delta p_{мрш}$ на ділянці розширення визначається за формулою (6). Значення $\zeta_{мрш}$ при $\mathrm{Re} < 3{,}3 \cdot 10^3$ вибираються з діаграми [8], а при $\mathrm{Re} \ge 3{,}3 \cdot 10^3$ розраховуються за формулою Борда-Карно [8]:

$$\zeta_{мрш} = \left(1 - F_2/F\right)^2, \quad (8)$$

де $F_2$, $F$ – площі поперечного перерізу ділянки до і після розширення труби, відповідно.

На базі алгоритму (1)–(8) здійснене теоретичне моделювання втрат тиску для умов експериментальної установки, що відображено пунктирними лініями на рис. 2 – рис. 4 для різних типів місцевих опорів. При цьому за експериментальними даними знайдені аналітичні залежності втрат тиску від числа Рейнольдса і відтворюваної в стенді витрати шляхом апроксимації експоненційними функціями і поліномами другого порядку, що подано в табл.1.

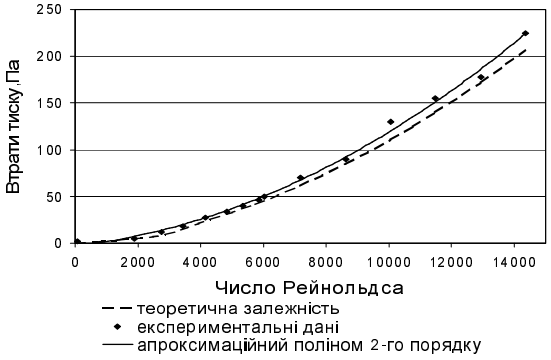



**Рисунок 2 – Залежність втрат тиску на тертя в трубі від числа Рейнольдса на прямолінійній ділянці труби (з розрахунку на 1м)**

Оскільки при експериментальних дослідженнях первинними інформативними параметрами були витрата газу $Q$ за робочих умов, яка обчислювалася за допомогою лічильника газу і хронометра, то обчислення числа Re здійснювалося за відомою формулою [8]:

$$\mathrm{Re} = \frac{4Q\rho}{\pi D \mu}, \quad (9)$$

де μ - коефіцієнт динамічної в'язкості повітря.




**Рисунок 3 – Залежність втрат тиску на опір згину 900 від числа Рейнольдса**

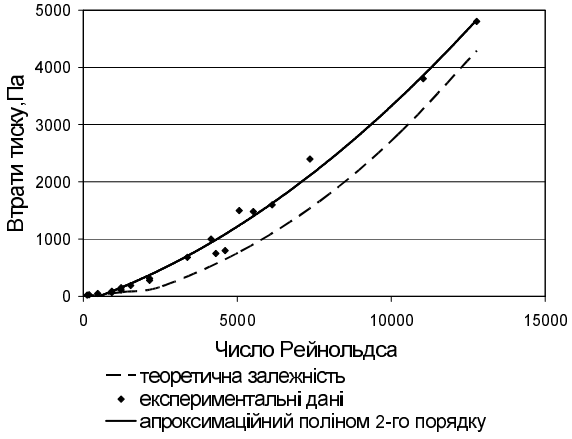



**Рисунок 4 – Залежність втрат тиску на резиновому гнучкому шлангу від числа Рейнольдса**

**Таблиця 1 – Результати фізичного моделювання втрат тиску в будинкових газопроводах**

| Вид ділянки трубопроводу | Вид апроксимаційної залежності | Достовірність апроксимації |
|---|---|---|
| Прямолінійна (втрати тиску на 1м довжини) | $\Delta p(\mathrm{Re}) = 8\cdot 10^{-7}\,\mathrm{Re}^2 + 0{,}0038\,\mathrm{Re} - 2{,}9869$ | 0,9965 |
| | $\Delta p(\mathrm{Re}) = 5{,}4079 e^{0{,}0003\,\mathrm{Re}}$ | 0,8804 |
| | $\Delta p(Q) = 1{,}7245 Q^2 + 5{,}4997 Q - 2{,}9869$ | 0,9965 |
| | $\Delta p(Q) = 5{,}4079 e^{0{,}4336 Q}$ | 0,8804 |
| Згин на 900 | $\Delta p(\mathrm{Re}) = 10^{-7}\,\mathrm{Re}^2 + 0{,}0008\,\mathrm{Re} + 0{,}051$ | 0,9923 |
| | $\Delta p(\mathrm{Re}) = 0{,}807 e^{0{,}0003\,\mathrm{Re}}$ | 0,6532 |
| | $\Delta p(Q) = 0{,}2124 Q^2 + 1{,}2056 Q + 0{,}051$ | 0,9923 |
| | $\Delta p(Q) = 0{,}807 e^{0{,}4515 Q}$ | 0,6532 |
| Гнучкий гумовий шланг з двома приєднувальними штуцерами (довжина шланга 2м) | $\Delta p(\mathrm{Re}) = 2\cdot 10^{-5}\,\mathrm{Re}^2 + 0{,}1843\,\mathrm{Re} - 95{,}323$ | 0,9897 |
| | $\Delta p(\mathrm{Re}) = 78{,}224 e^{0{,}0004\,\mathrm{Re}}$ | 0,8145 |
| | $\Delta p(Q) = 102{,}97 Q^2 + 470{,}93 Q - 95{,}323$ | 0,9897 |
| | $\Delta p(Q) = 78{,}224 e^{1{,}0681 Q}$ | 0,8145 |

З врахуванням умов проведення експериментальних досліджень, які відповідали надлишковому тиску повітря 2,5 кПа, температурі $20^0$С і відповідному розрахованому значенню витрати в $м^3$/год. для сталевої труби з внутрішнім діаметром 16 мм, можна подати такий спрощений вираз для взаємозв'язку витрати газу і числа Рейнольдса:

$$Q = 0{,}000696\,\mathrm{Re}\,. \qquad (10)$$

Аналогічні до формули (10) вирази можна отримати для діаметрів інших участків трубопроводу експериментальної установки, а також для інших параметрів тиску і температури робочого середовища з врахуванням виразу (9).

Порівняльний аналіз експериментально встановлених закономірностей втрат тиску на місцевих опорах з отриманими аналогічними залежностями на базі теоретичних моделей виявив розбіжність експериментально отриманих результатів з теоретичними даними, які можуть досягати (10–15)Па на 1м прямолінійної ділянки трубопроводу і (2–4)Па на опір згину на $90^0$, що, на погляд авторів, визначається параметрами фактичної шорсткості внутрішньої поверхні трубопроводів. Поряд з цим втрати тиску на гнучкому шлангу відрізняються від теоретично встановлених більш суттєво (до 500Па), що є

наслідком відсутності на даний час теоретичної моделі для гнучкого гумового шлангу з під'єднувальними штуцерами реальної конструкції.

## ВИСНОВКИ

Проведені теоретичні і експериментальні дослідження вказують на необхідність обов'язкового врахування втрат тиску в будинкових і квартирних мережах при розробленні перевірочних установок для побутових лічильників газу. Це дозволить підвищити точність установок для проведення випробувань ПЛГ по місцю їх експлуатації з використанням природного газу.

Отримані результати експериментальних досліджень також можуть бути використані для реальних умов будинкових і квартирних мереж газопроводів.

*1. Гончарук М.І., Чеховський С.А., Середюк О.Є. Раціональне використання природного газу як одна із складових збереження його ресурсів // Нафтова і газова промисловість. – 2005.– №2.– С.3–10. 2. Пістун Є.П. Облік та економія природного газу // Нафтова і газова промисловість. – 2000. – №2.– С.43–47. 3. Середюк О.Є., Чеховський С.А., Винничук А.Г. Техніко-метрологічні засади побудови діагностувальних установок для побутових лічильників газу.// Нафтова і газова промисловість.– 2006.– №6. – С.38–42. 4. Пат. 16522 U Україна, МПК (2006) G 01 F 25/00. Спосіб діагностування та перевірки побутових лічильників газу/ Середюк О.Є., Чеховський С.А., Винничук А.Г. та ін. – №u200601289; заявл. 09.02.06; опубл. 15.08.06, Бюл.№8. 5. Середюк М.Д., Малик В.Я., Болонний В.Т. Проектування та експлуатація систем газопостачання населених пунктів. – Івано-Франківськ: Факел, 2003.– 436с. 6. Трубопровідний транспорт газу/М.П. Ковалко, В.Я. Грудз, В.Б.Михалків [та ін.]. –К.: Арена, 2002.–598с. 7. Вощинський В.В. Аналіз схем передачі одиниці об'єму газу робочими еталонами при повірці лічильників газу// Методи та прилади контролю якості. – 2002. – №9. – С.48–52. 8. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1992. – 672с.*

**Поступила в редакцію 18.11.2009р.**

**Рекомендував до друку докт. техн. наук, проф. Костишин В.С.**