

УДК 681.121

Л. Близняк

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра автоматизації теплових і хімічних процесів**МОДЕЛЮВАННЯ РІВНЯННЯ РОЗПОДІЛУ ТИСКУ ПРИРОДНОГО  
ГАЗУ В ГАЗОПРОВОДАХ РІЗНОГО ТИПУ**

© Близняк Л., 2003

**In this article the systematization of main types of gas pipe lines is realized. Besides, the Bernoulli equations for different gas pipe lines is reduced. The modelling of equations of pressure distribution of natural gas in different gas pipe lines is carried out.**

**Вступ**

Економія паливно-енергетичних ресурсів неможлива без їх обліку. Підвищення точності обліку природного газу – одне з основних завдань сьогодення. Важливим завданням для вирішення цієї задачі є підвищення точності визначення об'єму газу в газопроводі. Прості розрахунки показують, що підвищення точності визначення об'єму газу в системі газопроводів України хоча б на 0,1 % дасть змогу врахувати додатково 1 млн. м<sup>3</sup> природного газу [1].

**1. Постановка проблеми у загальному вигляді**

Точність визначення об'єму природного газу безпосередньо залежить від точності визначення його параметрів, в основному розподілу тиску в газопроводі. Тому виникає необхідність у визначенні рівнянь розподілу тиску в газопроводі, які б враховували тип газопроводу. Це уможливить зменшити похибку визначення розподілу тиску в газопроводі, а відтак і похибку визначення об'єму природного газу в газопроводі.

**2. Аналіз останніх досліджень і публікацій**

На сьогодні розрахунок розподілу тиску природного газу проводиться при стаціонарному режимі руху [2, 3]. Причому наводяться, як правило, рівняння для визначення тиску газу в газопроводі лише для магістральних газопроводів [2, 3]. Рівняння для визначення розподілу тиску в газопроводах невеликої довжини не наводяться. Крім того, не існує чіткої систематизації типів газопроводів та відповідних їм рівнянь розподілу тиску.

**3. Мета досліджень**

Отже, постає потреба у систематизації основних типів газопроводів та визначення рівняння розподілу тиску для кожного з них. Існує декілька задач визначення розподілу тиску в газопроводі при стаціонарному режимі руху:

- 1) визначення розподілу тиску в горизонтальному магістральному газопроводі;
- 2) визначення розподілу тиску в похилому магістральному газопроводі;
- 3) визначення розподілу тиску в горизонтальному газопроводі невеликої довжини;
- 4) визначення розподілу тиску в похилому газопроводі невеликої довжини.

**Диференційне рівняння розподілу тиску природного газу для різних типів газопроводів**

Параметри, які характеризують потік стиснутого середовища (швидкість, тиск, температура, густина), пов'язані співвідношеннями, які впливають із застосування

загальних законів збереження маси та енергії до будь-якої ізольованої або замкнутої системи матеріальних тіл.

Якщо стаціонарний дозвуковий режим потоку реального стиснутого газу в трубопроводах відбувається без його відбору чи притоку, закон збереження маси виражається рівнянням нерозривності потоку [4, 5, 6]

$$q_m = \rho v F = \text{const}, \quad (1)$$

де  $q_m$  – масова витрата природного газу;

$\rho$  – густина природного газу;

$v$  – лінійна швидкість природного газу в газопроводі;

$F$  – площа поперечного перерізу газопроводу.

Закон збереження енергії записується у формі механічної енергії у вигляді узагальненого рівняння Бернуллі [4, 5]

$$\frac{dp}{\rho} + g dz + \phi \left( \frac{dv^2}{2} \right) + g dh_l = 0. \quad (2)$$

У рівнянні (2) складова  $\frac{dp}{\rho}$  враховує зміну тиску на елементі довжини газопроводу і є від'ємною величиною. Складова  $g dz$  враховує силу тяжіння і може приймати як додатні так і від'ємні значення залежно від значення різниці вертикальних відміток газопроводу. Ця складова є малою порівняно з іншими складовими рівняння при перепадах вертикальних відміток газопроводу менше ніж 200 м, тому нею нехтують при розгляді горизонтальних газопроводів;  $\phi$  – коефіцієнт Коріоліса, який дорівнює відношенню дійсної кінетичної енергії потоку до її середнього значення [7]

$$\phi = \frac{\int v^3 dF}{\bar{v}^3 F}. \quad (3)$$

Коефіцієнт Коріоліса залежить від розподілу швидкостей потоку, який, своєю чергою, залежить від числа  $Re$  та шорсткості стінок трубопроводу. У випадку турбулентності потоку коефіцієнт Коріоліса для стаціонарного режиму приймає значення від 1,10 до 1,15. Для нестаціонарного режиму руху коефіцієнт Коріоліса може істотно відрізнятись від одиниці.

Складова  $\frac{dv^2}{2}$  враховує втрати швидкісного напору, приймає додатні значення і є істотною при значних перепадах тиску на малій довжині газопроводу, наприклад, у відводах газопроводу так званих шлейфах. Складова  $g dh_l$  враховує втрати тиску по довжині  $l$  газопроводу внаслідок тертя.

Рівнянь (1) і (2) недостатньо для розв'язування практичних задач, оскільки кількість невідомих, які вони містять, перевищує кількість рівнянь. Для визначення цих невідомих необхідно доповнити систему ще двома рівняннями. Втрати тиску на елементарній довжині  $dx$  подамо у вигляді формули Дарсі – Вейсбаха [4, 5]

$$dh_x = \frac{\lambda}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} dx, \quad (4)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт гідравлічного опору, який при турбулентному режимі руху газу визначається за формулою Альтшуля [7]

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{R_{ш}}{D} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}, \quad (5)$$

де  $R_{ш}$  – еквівалентна шорсткість газопроводу.

Густина природного газу змінюється по довжині газопроводу залежно від зміни тиску і температури. Залежність, що пов'язує тиск, температуру і густину природного газу, виражається рівнянням стану [4, 5]

$$\frac{p}{\rho} = ZR_r T. \quad (6)$$

Зміну різниці вертикальних відміток газопроводу можна записати у вигляді рівняння [5]

$$dz = \frac{\Delta z}{1} dx. \quad (7)$$

З урахуванням формули (3) і рівнянь (1), (4), (6) і (7) рівняння Бернуллі набуде вигляду

$$\frac{dp}{\rho} + g \frac{\Delta z}{1} dx + \frac{q_m^2 ZR_r T}{F^2} \left( \frac{\phi}{2} d \left( \frac{1}{p} \right)^2 + \frac{\lambda}{2Dg} \cdot \frac{1}{p^2} dx \right) = 0. \quad (8)$$

Для різних газопроводів рівняння Бернуллі матиме інший вигляд. Розглянемо можливі варіанти диференційного рівняння (2).

Так, при розгляді горизонтальних газопроводів невеликої довжини (наприклад, відводи або шлейфи) зникає складова, що враховує сили тяжіння. Тому за умови  $\Delta z < 200$  м диференційне рівняння для визначення розподілу тиску в газопроводі невеликої довжини матиме вигляд

$$\frac{dp}{\rho} + \phi \left( \frac{dv^2}{2} \right) + gdh_1 = 0. \quad (9)$$

У випадку горизонтальних магістральних газопроводів зникає складова, що враховує зміну швидкості природного газу по довжині газопроводу (оскільки зміна швидкісного напору на великій довжині газопроводу є неістотною). Диференційне рівняння для визначення розподілу тиску у магістральному горизонтальному газопроводі при цьому матиме вигляд

$$\frac{dp}{\rho} + gdh_1 = 0. \quad (10)$$

Для похилого газопроводу невеликої довжини диференційне рівняння для визначення тиску природного газу по довжині газопроводу матиме такий самий вигляд, як рівняння (2).

Для похилих магістральних газопроводів диференційне рівняння для визначення розподілу тиску газу матиме вигляд

$$\frac{dp}{\rho} + gdz + gdh_1 = 0. \quad (11)$$

### Визначення рівняння розподілу тиску для різних типів газопроводів

Для практичного застосування рівнянь (9) – (12) визначимо рівняння розподілу тиску природного газу в газопроводах, розглянутих вище типів, та тиск природного газу на виході звужуючого пристрою.

У першому випадку з урахуванням формули (4) і рівнянь (1) і (6) та інтегрування одержаного рівняння по тиску від  $p_1$  до  $p_x$  та по довжині газопроводу від 0 до  $l$  тиск  $p_x$  у довільній точці  $x$  газопроводу визначатиметься за рівнянням

$$p_x^2 - 4\phi A_1 \cdot \ln p_x = p_1^2 - 4\phi A_1 \cdot \ln p_1 - \frac{2\lambda A_1}{D} \cdot x, \quad (12)$$

де  $A_1$  – коефіцієнт, який визначається за формулою

$$A_1 = \frac{8q_m^2 Z R_T}{\pi^2 D^4}. \quad (13)$$

Для магістральних горизонтальних газопроводів рівняння розподілу тиску в газопроводі визначаємо аналогічно до попереднього випадку, з тією лише різницею, що рівняння (1) та (6) та формулу (4) підставляємо у рівняння (10). Після відповідних перетворень, одержимо

$$p_x = \sqrt{p_1^2 - 2 \frac{\lambda}{D} \cdot x}. \quad (14)$$

Тиск природного газу в похилому газопроводі знаходимо в результаті підстановки рівнянь (1), (6) і (7) та формули (4) у рівняння (2) та подальшого інтегрування по тиску  $p$  від  $p_1$  до  $p_x$  і по довжині газопроводу від 0 до  $x$ . В результаті таких перетворень одержимо рівняння вигляду

$$p_x^2 - 4\phi A_1 \cdot \ln p_x = p_1^2 - 4\phi A_1 \cdot \ln p_1 - \left( A_2 + \frac{\lambda}{D} A_1 \right) \cdot x, \quad (15)$$

де  $A_2$  – коефіцієнт, що визначається за формулою

$$A_2 = \frac{g \Delta z}{Z R_T}. \quad (16)$$

Для похилого магістрального газопроводу тиск  $p_x$  природного газу визначаємо внаслідок підстановки рівнянь (1), (6) і (7) та формули (4) у рівняння (11). Після цього здійснюємо інтегрування одержаного рівняння так, як це описано вище. Внаслідок проведених перетворень одержимо рівняння вигляду

$$p_x = \sqrt{p_1^2 - 2 \left( A_2 + \frac{\lambda}{D} A_1 \right) \cdot x}. \quad (17)$$

Отримані кінцеві рівняння для визначення розподілу тиску газу в різних газопроводах наведені у таблиці.

**Рівняння Бернуллі та рівняння для визначення розподілу тиску газу  
в газопроводах різного типу**

№ з/п	Тип газопроводу	Рівняння Бернуллі	Рівняння для визначення розподілу тиску природного газу в газопроводі
1	Горизонтальний невеликої довжини	$\frac{dp}{\rho} + \phi \left( \frac{dv^2}{2} \right) + gdh_1 = 0$	$p_x^2 - 4\phi A_1 \cdot \ln p_x = p_1^2 - 4\phi A_1 \cdot \ln p_1 - \frac{2\lambda A_1}{D} \cdot x$
2	Горизонтальний магістральний	$\frac{dp}{\rho} + gdh_1 = 0$	$p_x = \sqrt{p_1^2 - 2 \frac{\lambda}{D} A_1 \cdot x}$
3	Похилий невеликої довжини	$\frac{dp}{\rho} + gdz + \phi \left( \frac{dv^2}{2} \right) + gdh_1 = 0$	$p_x^2 - 4\phi A_1 \cdot \ln p_x - p_1^2 - 4\phi A_1 \cdot \ln p_1 - \left( A_2 + \frac{\lambda}{D} A_1 \right) \cdot x$
4	Похилий магістральний	$\frac{dp}{\rho} + gdz + gdh_1 = 0$	$p_x = \sqrt{p_1^2 - 2 \left( A_2 + \frac{\lambda}{D} A_1 \right) \cdot x}$

### Висновки

Проведено систематизацію основних типів газопроводів, здійснено моделювання розподілу тиску в газопроводах різного типу та виведено рівняння розподілу тиску у цих газопроводах. Результати досліджень, наведені у таблиці, можуть застосовуватись на газотранспортних підприємствах при визначенні розподілу тиску в газопроводах. Крім того, отримані результати досліджень застосовуватимуться для подальших досліджень нестационарних потоків природного газу.

1. Гордієнко І.А., Коломєєв В.М., Фролов А.Ф. Стан вимірювання кількості та параметрів якості природного газу у системі ДК “Укртрансгаз” // *Нафтова і газова промисловість*. – 2000. – №5. – С. 44 – 47. 2. Вольський Э.П., Константинова И.М. *Режимы работы магистрального газопровода*. – Л., – 1970. 3. Яковлев Е.И., Зверева П.В. и др. *Моделирование трубопроводного транспорта нефтехимических производств*. – М., – 1987. 4. Лесовой Л.В., Близняк Л.В. Вплив фактора стискуваності на розподіл тиску в магістральному газопроводі // *Вимірювальна техніка та метрологія*. – 2002. – №59. – С. 171 – 173. 5. Лесовой Л.В., Близняк Л.В. Розрахунок розподілу тиску природного газу по довжині похилого газопроводу з врахуванням фактора стискуваності // *Вісн. НУ “Львівська політехніка”*. – 2002. – №452. – С. 198 – 203. 6. Пистун Е.П., Лесовой Л.В. *О точности определения количества природного газа в магистральных трубопроводах / Контрольно-измерительная техника*. – 1987. – Вып. 42. – С. 17 – 21. 7. ГОСТ 8.563.1-97, ГОСТ 8.563.2-97. *Рекомендации по практическому применению: Метод. материал*. – Казань, 2002.