

УДК 622.691.4

М. М. Якимів,  
здобувач за спеціальністю Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища,  
спеціаліст з Проектування і експлуатації газопроводів та газосховищ, ТзОВ «ДІПРОГАЗ», м.Київ

## ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ГАЗОПРОВІДІВ З ШЛЯХОВИМИ ВІДБОРАМИ ТА ВИТОКАМИ ГАЗУ

М. М. Iakymiv,  
PhD candidate, background Pipeline transmission, oil and gas storages,  
gas pipelines and gas storages engineering and operation specialist, DIPROGAZ Ltd., Kyiv

### THE GAS PIPELINES TRACK EXTRACTION AND MINOR GAS LEAKS ECONOMIC EFFICIENCY EVALUATION

*Розглядається задача про вплив шляхових відборів та малих витоків газу на гідравлічну та економічну ефективності транспортування газу по трубопроводах. Показано принцип виявлення витоків газу з подальшим уточненням коефіцієнта гідравлічної ефективності для зменшення похибок в розрахунках.*

*Considered the problem of the track extraction and gas leaks influence on the hydraulic and economic efficiency of the gas transmission through pipelines. The principles of detection of gas leaks from further refinement coefficient of hydraulic efficiency to reduce errors in the calculations.*

**Ключові слова:** коефіцієнт гідравлічної ефективності, економічна ефективність, аварійний витік, шляховий відбір.

**Keywords:** hydraulic efficiency coefficient, economic efficiency, emergency leakage, track extraction.

#### 1. Постановка проблеми.

Характерною особливістю газотранспортної системи України (ГТС) є наявність великої кількості шляхових відборів газу, які можуть бути постійнодіючими, або буферними, сталими за величиною, або змінними в часі. В процесі експлуатації ГТС спостерігаються малі витoki газу, які виникають за рахунок розгерметизації трубопроводів та арматури (нештатні ситуації) і які зазвичай важко діагностуються в зв'язку з тим, що їх поява практично не спотворює параметри режиму з одного боку, а візуальні спостереження не дають бажаного ефекту. Поява шляхових відборів або витоків газу викликає нестационарний процес в газопроводі, який супроводиться коливаннями параметрів в часі і викликає появу інерційних втрат енергії в газовому потоці. В зв'язку з сказаним загальні витрати енергії на транспортування газу при появі відборів зростають, що знижує економічну ефективність газотранспортної системи. Тому проблема ефективності газопроводів з шляховими відборами на сучасному етапі господарювання є актуальною.

#### 2. Аналіз досліджень і публікацій.

В літературі часто зустрічаються відомості про результати досліджень ефективності газопроводів і систем з шляховими відборами газу та аварійними витокami. Серед таких досліджень слід виділити роботи Бобровського С.А. [1], Грудза В.Я. [2], Щербаківа С.Г. [3], Яковлева С.І. [4] та інших. В приведених роботах аналізуються режими роботи газотранспортних систем з шляховими відборами, характер протікання нестационарних процесів, визначення величини витоків чи відборів. Однак питання гідравлічної та економічної ефективності таких газотранспортних систем залишаються поза увагою.

#### 3. Постановка завдання.

Метою даного дослідження є встановлення впливу шляхових відборів газу та аварійних витоків з газопроводу на гідравлічну ефективність газотранспортної системи і економічні її показники.

Аналіз літературних джерел вказує на пріоритетний напрямок застосування аналітичних методів досліджень проблеми, зокрема методів математичного моделювання з адаптацією отриманих результатів.

Діагностична модель газотранспортної системи повинна зв'язувати основні параметри режиму перекачування газу з діагностичними ознаками, до яких в першу чергу слід віднести коефіцієнт гідравлічної ефективності. Очевидно, що встановити точно місце аварійного витoku газу і його величину оперативно надзвичайно складно. Тому завдання ставиться наступним чином: встановити, в якій мірі впливає поява аварійного витoku з газопроводу на його гідравлічну ефективність, і, якщо цей вплив суттєвий, то необхідно при визначенні коефіцієнта ефективності вводити корективи в розрахунки, які враховували б наявність витоків газу.

#### 4. Виклад основного матеріалу.

Для газопроводів без шляхових відборів і аварійних витоків газу величина коефіцієнта гідравлічної ефективності (E) входить в основне рівняння газопроводів і може бути визначена

$$E = \frac{Q}{c d^{2.5} \sqrt{\frac{P_H^2 - P_K^2}{\Delta Z T L}}} \quad (1)$$

де  $Q$  – фактична витрата газу в газопроводі;  $c$  – коефіцієнт, що залежить від вибору системи одиниць;  $d$  – внутрішній діаметр газопроводу;  $P_H$ ,  $P_K$  – тиски на початку і в кінці газопроводу;  $\Delta$  – теоретичне значення коефіцієнту гідравлічного опору;  $\Delta$  – відносна густина газу;  $Z$  – коефіцієнт стисливості;  $T$  – середня температура газу;  $L$  – довжина лінійної ділянки.

Якщо на віддалі  $i_q$  від початку знаходиться зосереджений відбір газу або аварійний витік з витратою  $q$ , то на основі (1) одержимо систему рівнянь

$$\begin{aligned} P_H^2 - P_K^2 &= \frac{\lambda Z T L Q^2}{c^2 d^5 E_q^2} \\ P_K^2 - P_q^2 &= \frac{\lambda Z T (L - i_q) (Q - q)^2}{c^2 d^5 E_q^2} \end{aligned} \quad (2)$$

де  $P_q$  – тиск в точці витoku газу.

Очевидно, що коефіцієнт гідравлічної ефективності газопроводу з витокм газу  $E_1$  до певної міри відрізнятиметься від коефіцієнта гідравлічної ефективності газопроводу без витокм газу  $E$ , оскільки дані величини отримані на основі різних математичних моделей. Сумісний розв'язок системи (2) і рівняння (1) дає залежність для співвідношення вказаних коефіцієнтів у вигляді

$$\delta = \frac{E_1}{E} = \left(1 - \frac{q}{Q}\right) \sqrt{1 - \frac{l_1}{L}} \quad (3)$$

Таким чином, метою дослідження є встановлення величини  $\delta$  та її залежності від величини витокм і його координати. На рис.1 приведено графічні залежності вказаного відношення від величини витокм газу і його розміщення на газопроводі. Аналіз графіків показує, що при величині витокм газу, що складає 0,1% від витрати в газопроводі коефіцієнт гідравлічної ефективності знизюється на 13,4%. З збільшенням величини витокм газу і його відстані від початку газопроводу вказане відхилення збільшується. Тому виникає необхідність певною мірою компенсувати вказане відхилення. Для цього необхідно знати величину і координату аварійного витокм, якщо такий існує. Пропонується аналізувати нестационарний процес в газопроводі, викликаний появою аварійного витокм газу.

Як відомо [ 1 ], нестационарний процес руху газу в лінійній ділянці газопроводу описується рівнянням

$$\frac{\partial P}{\partial x} = - \frac{\lambda \rho w^2}{2d} \quad (3)$$

де  $P$  - тиск газу;  $\rho$  - густина нафти;  $w$  - лінійна швидкість;

$d$  - внутрішній діаметр труби;  $x$  - лінійна координата.

Якщо в точці  $x_1$  трубопроводу має місце шляховий витокм газу масовою інтенсивністю  $m$ , то рівняння нерозривності газового потоку може бути записане в вигляді

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -c^2 \frac{\partial(\rho w)}{\partial x} + \frac{m}{F} \sigma(x - x_1) \quad (4)$$

де  $c$  - швидкість звуку в середовищі;  $F$  - площа перерізу труби;  $t$  - час;

$\sigma(x - x_1)$  - одинична функція Хевісайда.

В роботі [ 2 ] показано, що для моделювання нестационарного ізотермічного процесу, викликаного включенням шляхового відбору, точність визначення діагностичної ознаки не виходить за межі 1,5% в випадку лінеаризації рівняння руху. З цією метою вводиться поняття осередненої в часі лінійної швидкості  $\bar{w}$ , яка входить в коефіцієнт лінеаризації  $2a = \lambda \bar{w} 2d$ . Тоді з (3) і (4) шляхом виключення масової швидкості можна одержати рівняння

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \frac{2a}{c^2} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{2am}{F} \delta(x - x_1) \quad (5)$$

Дане рівняння може бути покладене в основу створення діагностичної моделі газопроводу з аварійним витокм продукту, в якій діагностичною ознакою слід вважати коефіцієнт лінеаризації  $2a$ .

Доповнюють рівняння (5) початкові та граничні умови. Для довільного нестационарного процесу як початкові умови можуть бути використані параметри стаціонарного режиму системи як передісторія.

Як граничні умови використовуються значення тиску на початку газової мережі  $P(x, t) = P_0$  та масової витрати в її кінці, тобто  $M(L, t) = M_1$ . На практиці початковий тиск, як правило, підтримується сталим, але витрата в кінці магістралі переважно величина змінна в часі. В наслідок цього модель (5) не допускає розв'язку в аналітичній формі. Можлива реалізація поставленої задачі числовими методами, серед яких найбільш ефективний кінцево-різницький. Однак задачі параметричного діагностування систем газопостачання відносяться до класу обернених задач, для котрих кінцево-різницькі методи характеризуються нестійкістю і вимагають значних затрат часу на реалізацію.

З метою аналітичного визначення характеру нестационарного процесу при появі витокм з газопроводу і енергетичних втрат при цьому розглянемо ділянку трубопроводу довжиною  $L$  і діаметром  $d$ , в точці  $l_1$  якої має місце аварійний витокм з масовою витратою  $q$ , яку вважатимемо сталою в часі. Зв'язок між зміною тиску  $P(x, t)$  та масовою витратою  $Q(x, t)$  в газопроводі при наявності шляхового витокм продукту визначається системою рівнянь

$$\frac{\partial P}{\partial x} = - \frac{1}{F} \frac{\partial Q}{\partial t} - \frac{2a}{F} Q \quad (6)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = - \frac{c^2}{F} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{qc^2}{F} \delta(x - l_1)$$

$\delta(x - l_1)$  - функція джерела Дірака.

В момент появи аварійного витокм тиск на початку трубопроводу змінився до величини  $P(0, t) = P_1$ , а в кінці  $P(L, t) = P_2$ . Тоді розв'язок задачі може бути представлений у вигляді

$$P(x, t) = \left(1 - \frac{x}{L}\right) \sum_{n=1}^{\infty} [P_1 - P_2 (-1)^n] + \frac{qL}{c^2} \left( \frac{x(L-l_1)/L_1 \sin \omega_0 t \leq l_1}{l_1(L-l_1)/L_1 \sin \omega_0 t > l_1} \right) +$$

$$\frac{2}{c^2} \left(1 - \frac{x}{L}\right) e^{-ax} \sum_{n=1}^{\infty} [(P_H - P_1) - (P_K - P_2)(-1)^n] \frac{1}{\omega_0} (\sin \omega_0 t + \cos \omega_0 t) -$$

$$\frac{qL}{\pi c^2} e^{-ax} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n \omega_0} \sin \frac{n\pi x}{L} [\cos(\omega_0 t + \varphi) - \cos(\omega_0 t - \varphi)] *$$

$$[\sin(\omega_0 t + \varphi) - \sin(\omega_0 t - \varphi)] \quad (7)$$

Результати розрахунків отримані в вигляді залежностей безрозмірної витрати в початковому перерізі системи від безрозмірного часу. Їх аналіз показує, що максимальна похибка лінеаризованої моделі, тобто відхилення її результатів від результатів, одержаних за загальною моделлю, характерна для моменту початку стабілізації процесу і за величиною не перевищує 1,5%.

Як відомо, оцінка міри нестационарності газового потоку в газопроводі може бути дана, виходячи з числового значення критерію нестационарності.

Технологічний режим роботи газопроводу вважається квазістаціонарним у тому випадку, якщо величина критерію нестационарності складає  $N_c < 1,4 \cdot 10^6$ . В іншому випадку режим руху газу вважається нестационарним і зі зростанням величини критерію нестационарності ступінь нестационарності потоку (тобто ступінь впливу інерційних сил) збільшується.

За даними аналітичних досліджень нестационарного руху газу в гіпотетичному газопроводі обчислено критерій нестационарності за методикою [4]. При цьому, якщо в розв'язку (7) прийняти, що час прямує до безмежності, то отримаємо характеристику стаціонарного режиму роботи газопроводу, для якого критерій нестационарності рівний нулю.

Для кожного з режимів розраховувалося значення ККД газопроводу, при цьому враховувалася дія виключно сил інерції в потоці. Очевидно, що максимальне значення ККД  $\eta_0$  відповідає нульовому значенню критерію нестационарності потоку. Тоді кожен нестационарний режим оцінювався відносною величиною ККД

$$\bar{\eta} = \frac{\eta}{\eta_0}$$

У такий спосіб побудовано залежність величини відносного ККД газопроводу від критерію нестационарності, яка у вигляді графіка приведена на рисунку 2.

Із графіка видно, що при квазістаціонарних режимах течії газового потоку в трубах ( $N_f < 1,4 \cdot 10^{-6}$ ) інерційні сили виконують незначний обсяг роботи, що зумовлює зниження відносного ККД газопроводу до 2%. Зростання критерію нестационарності викликає збільшення обсягу роботи сил інерції в газовому потоці, що призводить до зниження величини відносного

Так, при значенні критерія нестационарності  $N_f = 5,0 \cdot 10^{-6}$  величина відносного ККД зменшується на 19%, а з досягненням значення критерію нестационарності  $N_f = 8,2 \cdot 10^{-6}$  зниження відносного ККД досягає 43%. На практиці режими експлуатації газопроводів із такими великими значеннями критерію нестационарності зустрічаються рідко. Проте, слід мати на увазі, що інерційні сили в газовому потоці можуть призвести до суттєвого зниження ККД газопроводу, тому експлуатація газопроводів найбільш ефективна при стаціонарних та квазістаціонарних режимах.

#### 6. Висновки.

Проведені дослідження інерційних втрат енергії на основі математичного моделювання режиму роботи газопроводу з аварійними витокami дозволили встановити закономірність впливу нестационарності газового потоку на величину енерговтрат. Показано, що при квазістаціонарних режимах течії газового потоку спостерігається зниження відносного ККД газопроводу до 2%, зростання нестационарності викликає збільшення обсягу роботи сил інерції, що призводить до зниження величини відносного ККД газопроводу. Так, при значенні критерія нестационарності  $N_f = 2,0 \cdot 10^{-6}$  величина відносного ККД зменшується на 19%, а з досягненням значення критерію нестационарності  $N_f = 2,6 \cdot 10^{-6}$  зниження відносного ККД досягає 43%. На практиці режими експлуатації газопроводів із такими великими значеннями критерію нестационарності зустрічаються рідко. Проте, слід мати на увазі, що інерційні сили в газовому потоці можуть призвести до суттєвого зниження ККД газопроводу, тому експлуатація газопроводів найбільш ефективна при стаціонарних та квазістаціонарних режимах.

#### Література.

1. Бобровский С. А. Движение газа в газопроводе с путевым отбором / С.А. Бобровский, С.Г. Щербakov, М.А. Гусейнзаде – М.: Наука, 1972. – 193 с.
2. Грудз В.Я. Обслуживания и ремонт газопроводов / В.Я. Грудз, Д.Ф.Тимків, В.Б. Михалків та ін. // Івано-Франківськ, Лілея-НВ, 2009 – 710с.
3. Щербakov С.Г. Проблемы трубопроводного транспорта нефти и газа. М.: Наука 1982 – 205 с.
4. Яковлев Е.И. Анализ неустановившихся процессов в нитках магистрального газопровода статистическими методами / Е.И. Яковлев // Изв. вузов. Нефть и газ. – 1968. – № 2. – С.72–76.

#### References.

1. Bobrovskiy, S.A. Sherbakov, S.G. and Guseinadze, M.A. (1972), Dvizhenie gaza v gazoprovode s putevim otborom [The gas flow with the track extraction], Nauka, Moscow, Russia.
2. Grudz, V.I. Tumkiv, D.F. and Mikhalkiv, V.B. (2009), Obslugovuvannya i remont gazoprovodiv [The maintenance and repair of the gas pipelines], Lileya, Ivano-Frankivsk, Ukraine.
3. Sherbakov, S.G. (1982), Problemi truboprovodnogo transporta nefiti i gaza [The problems of the gas and oil pipeline transport], Nauka, Moscow, Russia.
4. Iakovlev, E.I. (1968), "Statistical methods analysis of transient processes in the gas pipeline", Oil and Gas, vol.2, pp. 72-76.

Стаття надійшла до редакції 12.05.2015 р.



ТОВ "ДКС Центр"