



УДК 681.32

# ОЦІНКА КІЛЬКОСТІ ГАЗУ, ЯКИЙ ВИТІКАЄ З ОТВОРУ В ТРУБОПРОВОДІ

**Ю. Дементьєв**, кандидат технічних наук, доцент кафедри ПКТА,  
Вінницький національний технічний університет,  
**С. Дементьєв**, кандидат технічних наук, провідний інженер,  
**В. Білоус**, директор,  
**В. Іванов**, головний метролог,  
НВФ «Енергооблік», м. Вінниця

*Досліджено на експериментальній установці втрату газу, який витікає з отвору в трубопроводі для побутового, середнього та високого тисків. Запропоновано просту практичну методику визначення кількості втраченого газу через отвір у трубопроводі з еквівалентною площею один квадратний міліметр для докритичного та критичного режимів витікання.*

*Experimental studies on installing the loss of gas, which flows out of the hole in the pipeline for domestic, medium and high pressure. A simple practical method for determining the amount of gas lost through the hole in the pipeline with an equivalent area of one square millimeter for the pre-critical and critical modes leakage.*

**Ключові слова:** витікання газу, отвір трубопроводу, режим витікання, експериментальна установка, витрата.  
**Keywords:** the flow of gas, the opening of the pipeline, the expiration mode, the experimental setup, the flow rate.

**П**ід час експлуатації мереж трубопроводів із будь-яким газом, а особливо природним, який постачається населенню та промисловим споживачам, виникає задача оцінення втрати газу за виявлення отворів у трубопроводі, через які газ витікає в атмосферу. Отвори можуть бути різної природи — умисне пошкодження, корозія тощо. За виявлення отвору постає задача оцінення кількості втраченого крізь нього газу. В [1], [2] пропонуються моделі визначення кількості втраченого газу, але вони не враховують коефіцієнта звуження струменя газу, що впливає на реальний результат порівняно з теоретичною моделлю.

## ОСНОВНА ЧАСТИНА

Оскільки після виявлення отворів у трубопроводі надходження газу споживачам не припиняється, можна вважати, що тиск газу у трубопроводі та його температура є сталими значеннями.

За наявності отвору у трубопроводі еквівалентною площею  $F$  (м<sup>2</sup>) з абсолютною температурою газу в трубопроводі  $T_1$  (°K), абсолютним тиском  $P_1$  (Па) та густиною  $\rho_1$  (кг/м<sup>3</sup>) газ витікає у зовнішнє середо-

вище з абсолютним тиском  $P_2$  (Па), температурою газу  $T_2$  (°K) зі швидкістю  $W_2$  (м/с), яка залежить від режиму витікання газу: докритичного чи критичного.

За докритичного режиму витікання газ розширюється від значення тиску в трубопроводі  $P_1$  до тиску зовнішнього середовища  $P_2$ , і швидкість витікання газу  $W_{2d}$  є меншою від місцевої швидкості звуку, і значення  $W_{2d}$  зростає зі зменшенням значення  $\beta = P_2/P_1$ , поки величина  $\beta$  не досягне критичного значення  $\beta_{kp}$ , тобто докритичний режим витікання газу існує за умови:

$$\beta_{kp} < \beta < 1, \quad (1)$$

а значення  $\beta_{kp}$  є лише функцією показника адіабати газу [1]:

$$\beta_{kp} = \left(\frac{2k}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}}. \quad (2)$$

За критичного режиму витікання газу в разі виконання умови:

$$0 < \beta \leq \beta_{kp}, \quad (3)$$

швидкість витікання досягає значення місцевої швидкості звуку, і ніяке збільшення різниці тиску між зовнішнім середовищем та всередині трубопроводу не змінює швидкості витікання газу.

Витікання газу відбувається зі сталою швидкістю  $W_{2k}$  із значенням критичного тиску газу  $P_{kp}$  на виході каналу витікання.

Знаючи  $\beta_{kp}$  та  $P_2$ , можна обчислити значення критичного тиску за співвідношенням:

$$P_{kp} = P_2 / \beta_{kp}. \quad (4)$$

Так, наприклад, якщо адіабата природного газу  $k \approx 1.32$ , тоді  $P_{kp} = 1.845 P_2$ .

За докритичного режиму витікання газу та припущення, що газ ідеальний, а витікання є ізентропним, швидкість витікання  $W_{d2}$  (м/с) та масова витрата газу  $G_d$  (кг/с) визначаються співвідношеннями [1]:

$$W_{d2} = \sqrt{\frac{2k}{k-1} P_1 \rho_1^{-1} \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \quad (5)$$

$$G_d = F \sqrt{\frac{2k}{k-1} P_1 \rho_1 \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}. \quad (6)$$

За критичного режиму витікання газу швидкість витікання  $W_{k2}$  (м/с) та масова витрата газу  $G_k$  (кг/с) визначаються співвідношеннями [1]:

$$W_{k2} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} P_1 \rho_1^{-1}}, \quad (7)$$

$$G_k = F \sqrt{k \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k}} P_1 \rho_1}. \quad (8)$$

Тоді годинні об'ємні витрати газу за докритичного режиму витікання за робочих умов  $Q_d^{py}$  та за стандартних умов  $Q_d^{cy}$  (за температури 293.15 °K та тиску 101325 Па) визначаються співвідношеннями:

$$Q_d^{py} = 3600 G_d \rho_1^{-1}, \quad Q_d^{cy} = 3600 G_d \rho_c^{-1}. \quad (9)$$

Відповідно для критичного режиму витікання годинні об'ємні витрати

$$Q_k^{py} = 3600 G_k \rho_1^{-1}, \quad Q_k^{cy} = 3600 G_k \rho_c^{-1}, \quad (10)$$

де  $\rho_c$  — густина газу за стандартних умов, а значення густини  $\rho_1$  у співвідношеннях (6) та (8) можна обчислити як

$$\rho_1 = \rho_c \frac{293.15 P_1}{101325 T_1 K_Z}, \quad (11)$$

де  $K_Z$  — коефіцієнт стисливості газу.

Для порівняння, наприклад, у [2] пропонується обчислювати витрату газу за секунду  $Q_{kod}^{py}$  (м<sup>3</sup>/с) за робочих умов за співвідношенням

$$Q_{kod}^{py} = F \sqrt{2g \frac{k}{k+1} (P_1 - P_2) \rho_1^{-1}}, \quad (12)$$

де  $F$  — площа отвору в трубопроводі, м<sup>2</sup>;  $g$  — прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;  $k$  — показник адіабати газу, який дорівнює 1.4;  $P_1$  — абсолютний тиск у трубопроводі, кг/м<sup>2</sup>;  $P_2$  — барометричний тиск зовнішнього середовища, кг/м<sup>2</sup>;  $\rho_1$  — густина газу в трубопроводі, кг/м<sup>3</sup>.

Годинну ж витрату газу за стандартних умов за моделлю (12)  $Q_{kod}^{cy}$  (м<sup>3</sup>/год) можна обчислити за співвідношенням:

$$Q_{kod}^{cy} = 3600 Q_{kod}^{py} K_{kor}, \quad (13)$$

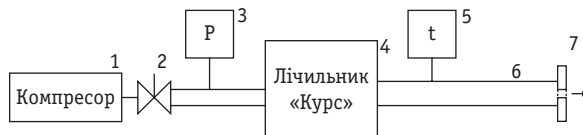


Рис. 1. Схема експериментальної установки

Fig. 1. Diagram of the experimental setup

де коефіцієнт корекції

$$K_{kor} = \frac{293.15 P_1}{101325 T_1 K_Z}. \quad (14)$$

Для перевірки адекватності моделей обчислення витрати за витікання газу (6), (8), (12) змонтовано експериментальну установку з ультразвуковим лічильником об'єму газу «Курс» (рис. 1). Елементи установки мають такі значення: 1 — компресор, 2 — голчастий регулювальний клапан подавання повітря, 3 — перетворювач тиску, 4 — ультразвуковий лічильник газу «Курс», 5 — перетворювач температури, 6 — трубопровід, 7 — штуцер з отвором діаметром  $d$ .

Експерименти проведено з повітрям температурою  $t = 20,5$  °C ( $k = 1,402$ ,  $\rho_c = 1,20445$  кг/м<sup>3</sup>) із отворами в боковому перерізі вихідної труби у виді тонкої стінки діаметром  $d = 0,9$  мм,  $d = 1,3$  мм та  $d = 1,7$  мм. Витрата повітря визначалася лічильником об'єму «Курс», який під час експериментів працював у режимі повірки. Результати експерименту зведено до таблиці.

Із таблиці видно, що витрата повітря за лічильником «Курс»  $Q_{ліч}^{py}$  менша за значенням порівняно з моделями (6), (8) та (12) через ефект стиснення струменя газу за витікання через отвір, коли площа струменя газу менша від площі отвору. Величина стиснення струменя характеризується коефіцієнтом стиснення струменя  $K_c$ , значення якого в експериментах наведено у таблиці.

Оскільки модель (12) не розрізняє докритичного та критичного режимів витікання газу, визначимо коефіцієнт стиснення струменя за моделями (6), (8) для докритичного режиму витікання  $K_{cd}$  та критичного режиму витікання  $K_{ck}$  як середнє арифметичне для кожного з режимів за експериментальними даними із таблиці. У результаті отримано такі значення:

$$K_{cd} = 0,671, \quad K_{ck} = 0,740. \quad (15)$$

Тому для отримання практичних значень витрати газу необхідно площу отвору в моделі (6), (8) помножити на коефіцієнт стиснення струменя (15).

Для швидкого практичного оцінення об'єму втраченого природного газу за стандартних умов протягом години використаємо отримані результати на експериментальній установці з повітрям та побудуємо графіки залежності об'ємного витоку природного газу

Витрата повітря за лічильником порівняно з моделями (6), (8) та (12) за діаметрами отворів  $d = 0,9$  мм,  $1,3$  мм та  $1,7$  мм

Air flow in the counter compared with the models (6), (8) and (12) holes with a diameters  $d = 0.9$  mm,  $1.3$  mm and  $1.7$  mm

№	Абсол. тиск $P_1$ , кПа	Витрата «Курс» $Q_{ліч}^{pv}$ , р.у., м <sup>3</sup> /год	Витрата за моделями (6), (8), $Q_p^{cy}$ , р.у., м <sup>3</sup> /год	Витрата за моделлю (12) $Q_{код}^{pv}$ , р.у., м <sup>3</sup> /год	Коеф. стиснення струменя $K_c = Q_{ліч}^{pv} / Q_p^{pv}$ за моделями (6), (8)	Коеф. стиснення струменя $K_c = Q_{ліч}^{pv} / Q_{код}^{pv}$ за моделлю (12)
Діаметр отвору $d = 0,9$ мм ( $P_2 = 97450$ Па)						
1	100,05	0,0886	0,149	0,116	0,5946	0,7639
2	102,83	0,1232	0,209	0,164	0,5894	0,7512
3	135,70	0,2745	0,417	0,381	0,6583	0,7205
4	173,90	0,3383	0,454	0,476	0,7452	0,7107
5	180,00	0,3469	0,455	0,486	0,6307	0,7138
6	188,40	0,3515	0,455	0,498	0,7725	0,7058
Діаметр отвору $d = 1,3$ мм ( $P_2 = 97450$ Па)						
1	99,900	0,1786	0,303	0,234	0,5894	0,7632
2	102,90	0,2644	0,438	0,344	0,6128	0,7802
3	135,90	0,5696	0,870	0,796	0,6540	0,7156
4	173,10	0,6803	0,947	0,990	0,7184	0,6872
5	180,40	0,6745	0,949	1,015	0,7107	0,6645
6	189,3	0,6755	0,949	1,043	0,7118	0,6476
Діаметр отвору $d = 1,7$ мм ( $P_2 = 97500$ Па)						
1	98,800	0,3555	0,502	0,389	0,7082	0,9139
2	102,65	0,5184	0,730	0,573	0,7101	0,9047
3	136,20	1,0649	1,490	1,364	0,7147	0,7807
4	176,00	1,2256	1,620	1,709	0,7565	0,7171
5	185,10	1,2527	1,623	1,761	0,7718	0,7113
6	192,50	1,2473	1,623	1,798	0,7685	0,6937

від надлишкового тиску газу в трубопроводі за отвору в трубопроводі з еквівалентною площею  $1$  мм<sup>2</sup>.

Під час побудови графіків скористаємося моделями (9), (10) та експериментальними даними із таблиці для врахування коефіцієнтів стиснення струменя  $K_{cd}$ ,  $K_{ck}$  для побутового значення тиску газу, середнього та високого тисків, що мають місце для більшості промислових та побутових споживачів газу. За побудови графіків приймемо, що густина газу за стандартних умов  $\rho_c = 0.70$  кг/м<sup>3</sup>, барометричний тиск  $P_b = 98$  кПа, температура газу  $t = 20.5$  °С, адіабата природного газу  $k \approx 1.32$ . Тоді згідно з (4) значення критичного тиску становитиме  $P_{kp} = 183.5$  кПа.

Графік залежності об'єму втраченого газу від тиску газу для побутових споживачів наведено на рис. 2.

Графік залежності об'єму втраченого газу від значення середнього тиску газу наведено на рис. 3.

Графік залежності об'єму втраченого газу від значення високого тиску газу наведено на рис. 4.

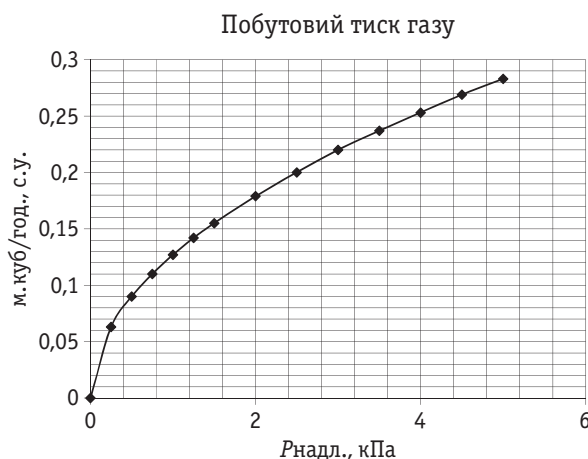


Рис. 2. Об'єм втраченого газу за стандартних умов протягом години за докритичного режиму витікання та еквівалентної площі отвору к трубопроводі  $1$  мм<sup>2</sup> за побутового тиску газу

Fig. 2. The amount consumed gas at standard conditions for one hour at the pre-critical mode and equivalent leakage area of the hole in the pipe  $1$  mm<sup>2</sup> in the domestic gas pressure

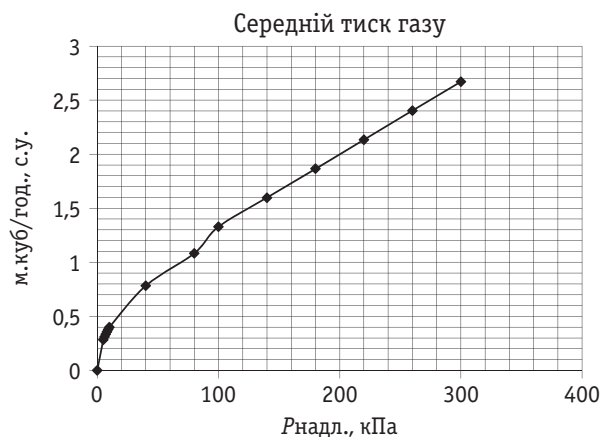


Рис. 3. Об'єм втраченого газу за стандартних умов протягом години за докритичного та критичного режимів витікання з еквівалентною площею отвору в трубопроводі 1 мм<sup>2</sup> та середнім тиском газу  
Fig. 3. The amount consumed gas at standard conditions for one hour at the pre-critical and critical modes of equivalent leakage area of the hole in the pipe 1 mm<sup>2</sup> and medium pressure gas

### ВИСНОВКИ

Отже, в роботі проаналізовано витікання газу із отвору в трубопроводі та математичні моделі визначення кількості втраченого газу для докритичного та критичного режимів витікання. На експериментальній установці проведено експерименти

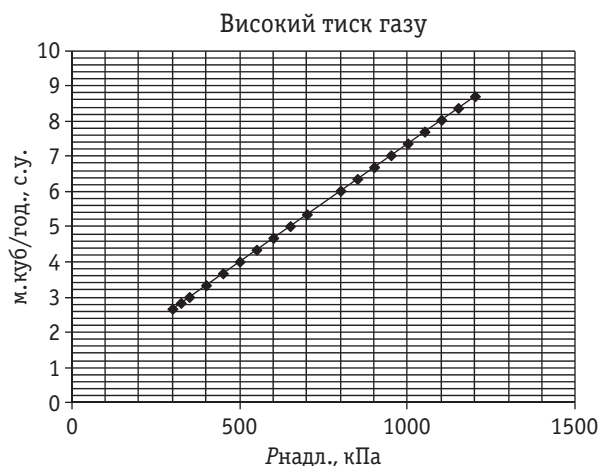


Рис. 4. Об'єм втраченого газу за стандартних умов протягом години за критичного режиму витікання та еквівалентної площі отвору у трубопроводі 1 мм<sup>2</sup> за високого тиску газу  
Fig. 4. The amount consumed gas under standard conditions at the critical hour standby leakage and equivalent square hole in the pipe 1 mm<sup>2</sup> high-pressure gas

з перевірки адекватності моделей та запропоновано уточнену практичну методику швидкого визначення кількості втраченого газу з еквівалентним отвором 1 мм<sup>2</sup> та врахуванням результатів експерименту для побутового тиску газу, середнього тиску та високого тиску газу в трубопроводі.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Vukalovic M.P., Novikov I. Technical Thermodynamics. — М.: Energy, 1968. — 496 p.
2. База рішень НКРЕКР №2494 від 30.09.2015. «Кодекс газорозподільних систем» (Base decisions NKREKR №2494 from 30.09.2015. «Code gas distribution systems»). — 170 с/р.
3. Удосконалення методів діагностування витоків з газових мереж/ Стасюк Р.Б.: Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. — Івано-Франківськ (Improved methods of diagnosing leakage from gas pipelines / Stasiuk R.B.: thesis for the degree of candidate of technical sciences. — Ivano-Frankivsk), 2015. — 144 с/р.
4. Володарський Є.Т., Кухарчук В.В., Поджаренко В.О., Сердюк Г.Б. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю. — Вінниця: Велес (Volodarsky E.T., Kukharchuk V.V. Podzharenko V.A., Serdyuk G.B. Measurement software measurement and control. — Ball: Velez), 2001. — 219 с/р.
5. Лапач С.М., Чубенко А.В., Бабіч П.М. Статистичні методи в медико-біологічних дослідженнях із застосуванням Excel. К.: МОРІОН (Laracho S.M., Chubenko A.V., Babich P.M. Statistical methods in biomedical studies using Excel. K.: MORION), 2000. — 320 с/р.
6. Гончарук М.І. Аналіз причин втрат природного газу / М.І. Гончарук // Нафтова і газова промисловість (Goncharuk M.I., Analysis of the causes of natural gas / M.I. Goncharuk // Oil and gas industry). — 2003. — №1, — С/Р. 51—53.
7. Гончарук М.І. Корозія та розгерметизація трубопроводів / М.І. Гончарук // Нафтова і газова промисловість (Goncharuk M.I., Corrosion and pipeline depressurization / M.I. Goncharuk (Oil and gas industry). — 2003. — № 2. — С/Р. 56—57.
8. Грудз В.Я. Діагностування малих витоків з трубопроводу / В.Я. Грудз, В.Д. Фейчук // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ (V. Hrudz, Diagnosing small leaks from the pipeline / V.J. Hrudz, V.Y. Hrudz, V.D. Feychuk // Exploration and development of oil and gas fields). — 1999. — № 36. — С/Р. 42—44.
9. Абрамович Н. Прикладная газовая динамика / Н. Абрамович. — М.: Наука (Abramovich N. Applied Gas Dynamics / A.N. Abramovich. — М.: Nauka), 1969. — 544 с/р.
10. Середюк М.Д. Проектування та експлуатація газопостачання населених пунктів: навч. посібник / М.Д. Середюк, В.Я. Малик, В.Т. Болонний — Івано-Франківськ: Факел (Seredyuk M.D., Design and operation of gas settlements: teach. manual M.D. Seredyuk, V.Y. Malik, V.T. Bolonnyu — Ivano-Frankivsk: Flare), 2003. — 140 с/р.

Отримано / received: 27.04.2016.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. С.М. Злепком (Україна).  
Prof. S.M. Zlepko, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.