

УДК 621.643.053, 006.91:681.121.089

РОЗРАХУНОК ОБ'ЄМНОЇ ВТРАТИ ПРИРОДНОГО ГАЗУ ЧЕРЕЗ НЕЩІЛЬНОСТІ З'ЄДНАНЬ В ТРУБОПРОВОДІ

Демченко В.Г., к.т.н., Коник А.В., к.т.н., Погорєлова Н.Д., Хоменко М.В.

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст, 2а, Київ, 03057, Україна

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2024.8>

Розглянуто важливу проблему матеріальних втрат природного газу при його транспортуванні та розподілі. Визначено можливі місця розгерметизації трубопроводу при транспортуванні газу та на газорозподільному пункті. Наведено результати чисельного аналізу об'ємної втрати газу через негерметичність різьбового з'єднання. Встановлено графічні залежності змін показників витратоміра від тиску та проведено оцінку економічної складової об'ємних втрат через нещільність з'єднань, через які відбувається витік газу.

This work considers the important problem of material losses of natural gas during its transportation and distribution. Possible places of depressurization of the pipeline during gas transportation and at the gas distribution point have been determined. The results of the numerical analysis of the volume loss of gas due to the leakiness of the threaded connection are given. Graphical dependences of changes in flowmeter indicators on pressure were established and the economic component of volumetric losses due to leaky connections through which gas leakage occurs was evaluated.

Бібл. 9, рис.6, табл. 1.

Ключові слова: витік газу, розрахунок об'ємних втрат, різьбове з'єднання.

У 2022 році на території України було видобуто 18,01 млрд м³ газу [1]. До початку повномасштабного вторгнення за дозволом НКРЕКП допустимий об'єм технологічних втрат газу при транспортуванні становив приблизно 5% (тобто 0,9 млрд м³ газу) на рік [2]. У грошовому вираженні це становить 7,164 млрд. грн. (розрахунок проведено за вартістю газу для населення: 1 м³ газу коштує 7,96 грн) [3].

Крім того, необхідно враховувати матеріальні втрати газу, які не підлягають точному аналітичному визначенню. До них відносяться втрача газу через нещільності з'єднань, через які відбуваються витіки. Витік газу відбувається через порушення герметичності трубопроводів найчастіше на фланцевих та різьбових з'єднаннях у газорозподільних пунктах (далі через порушення герметичності ГРП). Причини пошкодження можуть бути несхожі, як і об'єм втрат та їх наслідки. Потрібно зазначити, що окрім значних економічних втрат, витік газу негативно впливає на здоров'я людей та має шкідливий вплив на оточуюче середовище внаслідок високої вибухопожежонебезпеки та його токсичної дії.

З урахуванням вищезазначеного зменшення об'ємних втрат газу через порушення герметичності та їх розрахунок є актуальним науковим питанням.

Метою роботи є дефініція місць витіку газу, проведення розрахунку об'ємних втрат газу внаслідок порушення герметичності на різьбовому з'єднанні та оцінка їх економічної складової.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- визначити можливі місця витіку газу;
- встановити причини пошкоджень, що спричиняють витік газу;
- розглянути вплив негерметичності різьбового з'єднання на роботу витратоміру;
- розрахувати об'ємні втрати газу та їх вплив на економічну складову.

Об'єкт досліджень – газовий трубопровід ГРП.**Предмет досліджень** – розрахунок об'ємних втрат газу через порушення герметичності.**Можливі місця витіку газу та їх причини порушення герметичності**

Транспортування газу до споживача здійснюється трубопроводами з редукацією тиску на ГРП. Найбільш розповсюдженими причинами матеріальних втрат є порушення герметичності в місцях з'єднання труб та пошкодження цілісності труби. На ГРП можливі порушення герметичності на перехідниках (муфтах), під накидними гайками та на різьбових з'єднаннях. Причини таких порушень герметичності можуть бути:

- зміна хімічних та фізичних властивостей герметика або його відсутність;
- використання невідповідних матеріалів;
- фізичне пошкодження деталей трубопроводу та ГРП;
- втручання (відкручування, провертання чи знімання) в різьбові з'єднання.

Для запобігання самовільного втручання в конструкції ГРП встановлюють пломби кваліфіковані співробітники відповідальні за якість та безпеку його роботи [4]. Приклад порушення щільності різьбового з'єднання продувної труби та пломбування ГРП наведений на рисунку 1.

В даному випадку в місці переходу використано фторопласт, що може стати однією з причин витоку газу, рисунок 1. Зазначимо, що коефіцієнт температурного розширення фторопласту становить $\alpha_f = 25 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, а коефіцієнт температурного розширення сталі становить $\alpha_s = 12,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, тобто майже у 20 разів менше. Отже, в холодну пору року на такому з'єднанні в неопалювальному приміщенні може виникнути негерметичність внаслідок температурного звуження металу на різьбовому з'єднанні та утворенні нещільності прилягання витків.

Для вчасного виявлення витоку газу необхідно проводити планові технічні огляди та перевірку стану герметичності за допомогою газоаналізатора та мильної емульсії.

Розрахунок об'ємних втрат газу через негерметичність різьбового з'єднання

Порядок розрахунку на прикладі метричної різьби з'єднання, яка має найбільше розповсюдження у використанні при встановленні елементів ГРП, представлено на рисунку 2.

Сторони гайки і болта мають порожнини, порожнина зі сторони болта має більшу площу перерізу, рисунок 2. Тому у розрахунку витікання газу через різьбове з'єднання до уваги приймаємо більшу площу перерізу.

Розрахункова схема представлена на рисунку 3. Переріз, через який відбувається витікання газу, виділено сірим кольором. Площу перерізу визначаємо за методикою, викладеною в [6].

Для розрахунку необхідно знати параметри різьбового з'єднання для визначення кроку [7]. Тоді:

$$x = \frac{P}{4} \quad (1)$$

$$R = 0,14434 \cdot P \quad (2)$$

Проміжний кут:

$$\alpha = \arcsin \frac{x}{D} \quad (3)$$

Центральний кут:

$$\varphi = \alpha \frac{360}{\pi} \quad (4)$$

Площа круга:

$$S = \pi \frac{D^2}{4} \quad (5)$$

Площа сектора:

$$S_c = S \frac{\varphi}{360} \quad (6)$$



Рис. 1. Приклад порушення щільності різьбового з'єднання на ГРП

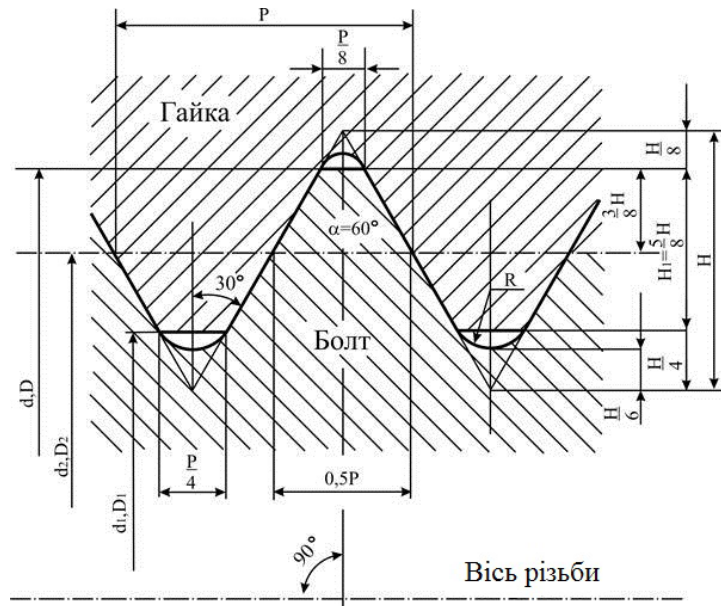


Рис. 2. Параметри профілю метричної різьби [5], де: H - висота вихідного рівностороннього трикутника;
 H_1 - робоча висота профілю; $d = D$ - номінальні значення зовнішніх діаметрів болта і гайки;
 $d_1 = D_1$ - номінальні значення внутрішніх діаметрів болта і гайки;
 $d_2 = D_2$ - номінальні значення середніх діаметрів болта і гайки; d_3 - величина внутрішнього діаметра по дну западин; α - кут профілю різьби ($\alpha = 60^\circ$); P - крок різьби ($Pn = P \times n$ - хід багатоходових різьб;
 n - число ходів); R - радіус закруглення дна западини різьби болта

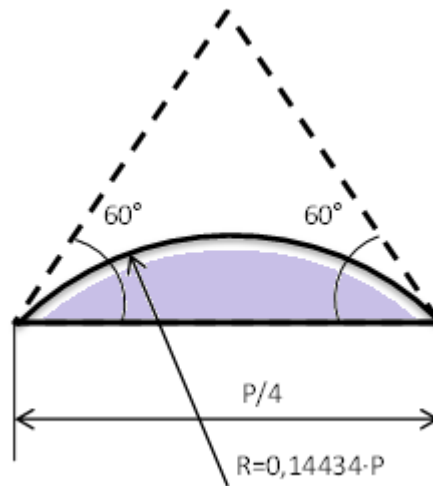


Рис. 3. Фрагмент різьбового з'єднання

Площа сегмента:

$$S_{св2} = S_c - \frac{x \cdot D \cdot \sin \alpha}{4} \quad (7)$$

Еквівалентний діаметр перерізу:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{св2}}{\pi}} \quad (8)$$

Визначаємо довжину порожнини, через яку втрачається газ. Оскільки різьбове з'єднання повинно мати не менше трьох витків, приймаємо, що з'єднання має три і більше витки. Зі збільшенням числа витків втрати газу будуть зменшуватись, оскільки подовжується шлях його руху. Тоді довжина:

$$l = \pi \cdot D_p \cdot n \quad (9)$$

де D_p - діаметр різьби, n - число витків.

Масова витрата газу визначається за формулою [5]:

$$M = S_{свг} \sqrt{\frac{(P_n^2 - P_k^2) \cdot d}{\lambda \cdot z \cdot R \cdot T_{cp} \cdot l'}} \quad (10)$$

де P_n – початковий тиск, у нашому випадку - абсолютний тиск (манометричний тиск плюс атмосферний) у газопроводі;

P_k – кінцевий тиск;

λ – коефіцієнт гідравлічного опору. Він залежить від витрати газу, тому зазвичай для попереднього розрахунку приймається значення 0,01.

z – коефіцієнт стисливості газу, який визначається за формулою:

$$z = 1 - 5,5 \frac{P_{cp} \cdot \Delta^{1,5}}{T_{cp}^{3,5}}, \quad (11)$$

де P_{cp} , T_{cp} – середні тиск газу і температура відповідно;

Δ – відносна густина газу за повітрям.

Розраховуємо середній тиск:

$$P_{cp} = \frac{2}{3} \left(P_n + \frac{P_k^2}{P_n + P_k} \right) \quad (12)$$

Враховуємо, що температура на короткому відрізку практично незмінна. Для визначення об'ємної втрати оцінюємо густину газу за умов витікання:

$$\rho = \frac{P_{cp}}{z \cdot R \cdot T_{cp}} \quad (13)$$

Отже, об'ємна втрата:

$$q = \frac{M}{\rho} \quad (14)$$

Об'ємна втрата на добу становить:

$$q_d = q \cdot 24 \cdot 3600 \quad (15)$$

Для уточнення коефіцієнтів гідравлічного опору проводимо наступні розрахунки. Визначаємо швидкості газу:

$$W = \frac{q}{S_{свг}} \quad (16)$$

Критерій Рейнольдса:

$$Re = \frac{W \cdot d \cdot \rho}{\eta} \quad (17)$$

де η – коефіцієнт динамічної в'язкості газу.

Коефіцієнт гідравлічного опору:

$$\lambda = 0,067 \left(\frac{158}{Re} + \frac{2 \cdot k}{d} \right)^{0,2} \quad (18)$$

де k – еквівалентна шорсткість.

Розрахунок уточнення проводиться за формулами 10, 14-18 до значення похибки гідравлічного опору < 5 %.

Для приладу розглянемо розрахунок об'ємних втрат газу через негерметичність різьбового з'єднання М20 з кроком 2,5 мм площею 1,0 мм². Результати розрахунку зведено в таблицю 1.

Отже, у результаті проведеного розрахунку встановлено, що через одне різьбове з'єднання за добу втрачається 0,422 кубічних метра газу, економічні втрати, по вартості газу для населення, становлять – 3,359 грн, на місяць – 100,774 грн і на рік – 1209,28 грн [3]. Якщо вважати, що на кожному ГРП є декілька місць різьбових з'єднань, то ця сума зростає в рази - залежно від їх кількості.

Вплив негерметичності трубопроводу на роботу приладів обліку газу

Прикладом впливу негерметичності різьбового з'єднання на роботу витратоміру, що фіксує витрати газу, можуть бути представлені у вигляді графіко-аналітичної залежності тиску від втрат газу. Для контролю кількості витрат газу ставлять витратоміри, за допомогою яких також можна виявити витік газу [8]. Розрахунок проводиться за наступною методикою [6].

З формули масової витрати газопроводу 10 визначається кінцевий тиск газу за:

$$P_k = \sqrt{P_n^2 - \frac{16 \cdot M^2 \cdot \lambda \cdot z \cdot R \cdot T_{cp} \cdot l}{\pi^2 \cdot d^5}} \quad (19)$$

Табл. 1. Результати розрахунку прикладу

Критерій	Значення
Початковий тиск у газопроводі, P_n , Па	753325
Кінцевий тиск у газопроводі, P_k , Па	101325
Температура газу, T_{cp} , К	273
Густина газу, ρ , кг/м ³	4,725
Масова витрата газу, M , кг/с	23,1•10 ⁻⁶
Об'ємна втрата, q , м ³ /с	4,884•10 ⁻⁶
Об'ємна втрата на добу, q_d , м ³ /добу	0,422

Об'ємна витрата дорівнює величині витоку газу за формулою 14, а швидкість газу, як:

$$W = \frac{4 \cdot q}{\pi \cdot d^2} \quad (20)$$

Критерій Рейнольдса та коефіцієнт гідравлічного опору розраховуються за формулами 17 і 18, відповідно.

Для конкретного прикладу (площа витоку 1,0 мм²) використовувались наступні значення: коефіцієнт стисливості $z=0,9893$; коефіцієнт газової сталої $R=512,68 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; середня температура газу $T_{cp}=273 \text{ К}$.

Для проведення розрахунків використовувалась програма Mathcad. Об'ємна величина витоку газу змінювалась від 0,2 г/с до 10 г/с. Було розраховано:

- зменшення тиску газу на вході у витратомір в залежності від величини витоку при тиску у газопроводі 0,5 МПа та 1,0 МПа;

- зменшення тиску газу на вході у витратомір при величині витоку до 2,5 м³/д. при тиску у газопроводі 1,0 МПа.

Результати розрахунків наведено на рисунках 4,5. По аналогії можуть бути проведені розрахунки на інші параметри тиску та площі витоку газу.

При збільшенні тиску у газопроводі, втрати тиску за однакової величини витоку збільшуються, рисунки 4 та 5. Якщо витратомір має похибку 0,1 % при максимальній

величині тиску 1,6 МПа, то випадкова абсолютна похибка становитиме 1600 Па. Тоді перевищення похибки вимірювань почнеться за витоку газу від 200 м³/доба при тиску у газопроводі 0,5 МПа або за витоку газу 150 м³/добу при тиску у газопроводі 1 МПа. Такі витоки будуть супроводжуватись акустичними ефектами і їх виявлення є досить легким.

Розглянемо витоки, які складають до 2 м³/добу, рисунок 6.

При величині витоків до 2,0 м³/добу зміна тиску на вході витратоміра не перевищує 1 Па, що взагалі важко зафіксувати вимірювальними приладами, і становить 1/1600 точності витратоміра, рисунок 6. Отже, можна зробити висновок, що витоки на імпульсних лініях витратоміра, які не перевищують 2,0 м³/добу, не впливають на точність вимірювань.

Висновки

1. Технологічні втрати природного газу при його транспортуванні та розподілі становлять приблизно 0,9 млрд м³ газу на рік. Матеріальні втрати газу через нещільності з'єднань та порушення герметичності трубопроводів і газорозподільних пунктах потребують проведення розрахунків.

2. Сформульовано причини порушення герметичності та можливі місця витоку газу в процесі експлуатації газорозподільної мережі.

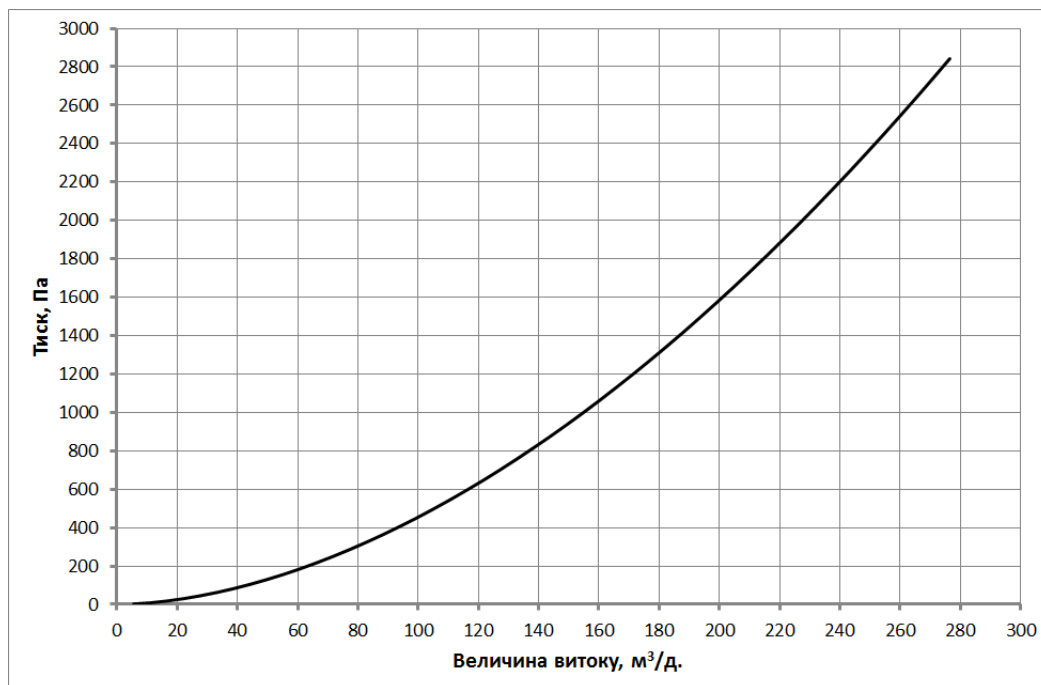


Рис. 4. Зменшення тиску газу на вході у витратомір в залежності від величини витоку при тиску у газопроводі 0,5 МПа

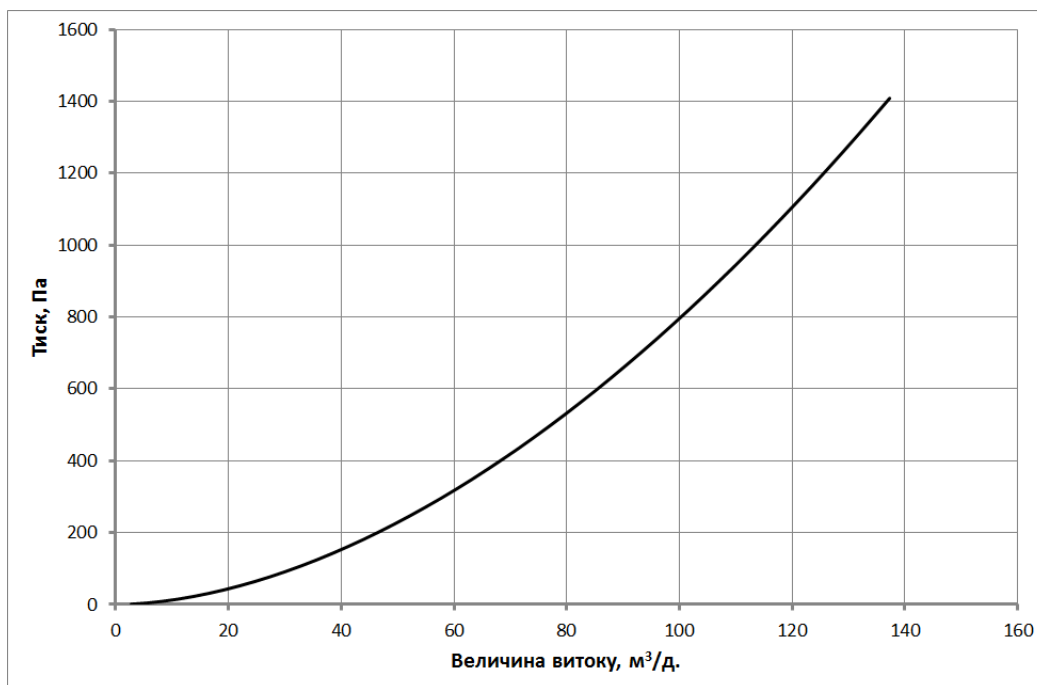


Рис. 5. Зменшення тиску газу на вході у витратомір в залежності від величини витоку при тиску у газопроводі 1,0 МПа

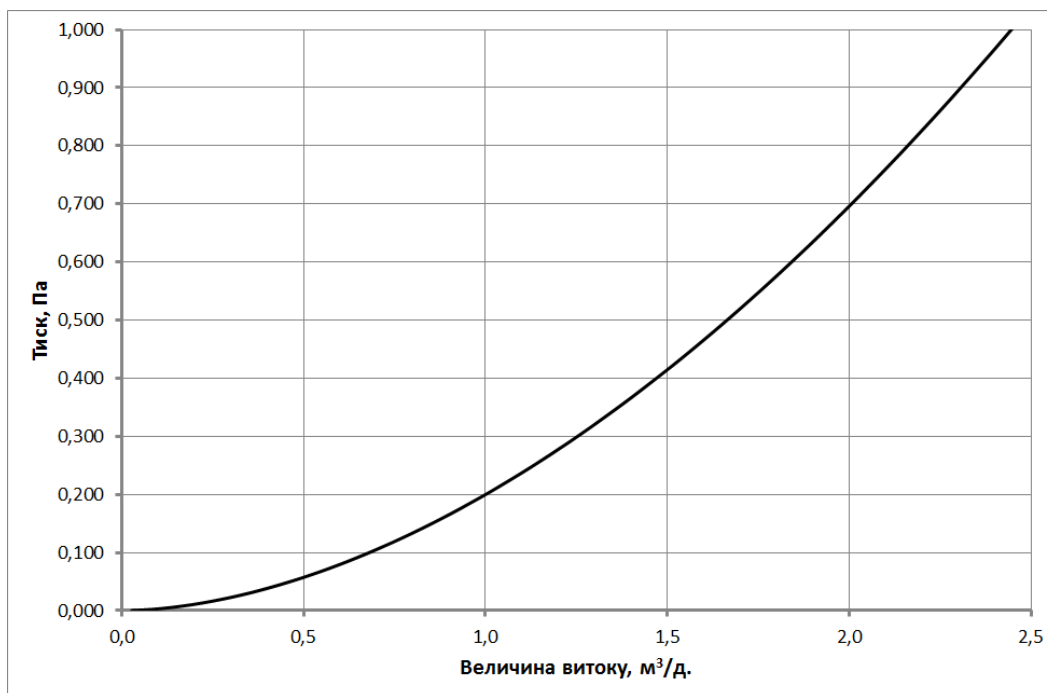


Рис. 6. Зменшення тиску газу на вході у витратомір при величині витоку до 2,5 м³/д. при тиску у газопроводі 1,0 МПа

3. Зазначено, що витік газу має шкідливий вплив на оточуюче середовище та високу вибухопожежонебезпеку.

4. Наведено алгоритм розрахунку об'ємних втрат газу через негерметичність різьбового з'єднання. В

результаті проведеного аналізу розглянуто вплив втрат газу на економічну складову, встановлено, що через одне різьбове з'єднання за добу втрачається 0,422 м³ газу.

5. Показано, як за допомогою приладу обліку газу можна виявити витік газу. Приведено графіко-аналітичні залежності тиску від втрат газу, з яких випливає, що витратомір не фіксує втрати витоку газу менше 2,0 м³/добу.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Інтернет ресурс*: <https://expro.com.ua/novini/ukrana-v-2022r-skorotila-vidobutok-gazu-na-6-do-185-mlrd-kub-m>
2. *Інтернет ресурс*: <http://iplex.com.ua/doc.php?regnum=101608533&red=100003508c7a123ca9016deb786e33667fbc53&d=5>
3. ДСТУ ISO 68-1:2005 (ISO 68-1:1998, IDT) Національний стандарт України. Нарізі ISO загального призначення. Основний профіль Частина 1. Нарізі метричні.
4. *Інтернет ресурс*: <https://index.minfin.com.ua/tariff/gas/>
5. *Інтернет ресурс*: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0318-98#Text>
6. Борисенко О.А. Аналітична геометрія: Навчальний посібник / О.А. Борисенко, Л.М. Ушакова. – Х. : Основа, 1993. – 192 с. – 46-50
7. Трубопровідний транспорт газу / М.П. Ковалко, В.Я. Грудз, В.Б. Михалків та ін. – Київ:-АренаЕКО, - 2002. – 600 с.
8. Сусліков Л.М., Студеняк І.П. Метрологія та вимірювання: Навчальний посібник. – Ужгород: Видавництво УжНУ, 2014. - 292 с.
9. *Інтернет ресурс*: <https://www.ua-systems.com.ua/vitratomir-lichilnik-gazu-rg-ont>

CALCULATION OF VOLUME LOSS OF NATURAL GAS DUE TO LEAKNESS OF CONNECTIONS IN THE PIPELINE

Demchenko V.G.¹, Konyk A.V.², Pogorelova N.D.³, Khomenko M.V.⁴

¹PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, str. Maria Kapnist, 2a, Kyiv, 03057, Ukraine. dr-demch@meta.ua

²PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, str. Maria Kapnist, 2a, Kyiv, 03057, Ukraine. alina_tds@ukr.net

³Chief Designer (Engin.) of the laboratory, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, str. Maria Kapnist, 2a, Kyiv, 03057, Ukraine, n_pogorelova@i.ua

⁴Leading Engineer, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, str. Maria Kapnist, 2a, Kyiv, 03057, Ukraine, kh_maryna@ukr.net

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2024.8>

This work considers the important problem of material losses of natural gas during its transportation and distribution. It is shown that only normative losses of gas during its transportation in Ukraine amount to about 0.9 billion cubic meters per year. Possible places of depressurization of the pipeline during gas transportation and at the gas distribution point have been determined. The results of the numerical analysis of gas volume loss due to the leakiness of the threaded connection are given on a specific example. The graphical and analytical dependence of the error of a typical flow meter on the change in gas pressure was established, and the economic component of volumetric losses due to leaky connections through which gas leakage occurs was evaluated.

Conclusions

1. Technological losses of natural gas during its transportation and distribution amount to approximately 0.9 billion m³ of gas per year. Material losses of gas due to leaky connections and violations of the tightness of pipelines and gas distribution points require calculations.

2. Formulated causes of leak tightness and possible places of gas leakage during operation of the gas distribution network.

3. It is noted that the gas leak has a harmful effect on the environment and a high explosion and fire hazard.

4. The algorithm for calculating volumetric gas losses due to the leakiness of the threaded connection is given. As a result of the analysis, the impact of gas losses on the economic component was considered, it was established that 0.422 cubic meters of gas is lost per day through one threaded connection.

5. It is shown how a gas leak can be detected using a gas meter. Graphical analytical dependences of pressure on gas losses are presented, from which it follows that the flow meter does not record gas leakage losses of less than 2.0 m³/day.

References 9, fig. 6, table. 1.

Keywords: gas leak, volume loss calculation, threaded connection.

1. Internet resource: <https://expro.com.ua/novini/ukrana-v-2022r-skorotila-vidobutok-gazu-na-6-do-185-mlrd-kub-m>

2. Internet resource: <http://iplex.com.ua/doc.php?regnum=101608533&red=100003508c7a123ca9016deb786e33667fbc53&d=5>

3. DSTU ISO 68-1:2005 (ISO 68-1:1998, IDT) National Standard of Ukraine. General purpose ISO threads. Main profile Part 1. Metric threads.

4. Internet resource: <https://index.minfin.com.ua/tariff/gas/>

5. Internet resource: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0318-98#Text>

6. Borysenko O.A. Analytical geometry: Study guide / O.A. Borysenko, L. M. Ushakova. - Kh.: Osnova, 1993. - 192 p. - 46-50

7. Pipeline gas transport / M.P. Kovalko, V.Ya. Grudz, V.B. Mikhalkiv and others. - Kyiv: -Arena EKO, - 2002. - 600 p.

8. Suslikov L.M., Studenyak I.P. Metrology and measurement: Study guide. - Uzhhorod: UzhNU Publishing House, 2014. - 292 p.

9. Internet resource: <https://www.ua-systems.com.ua/vitratomir-lichilnik-gazu-rg-ont>

Отримано 15.08.2023

Received 15.08.2023

Прийнято до друку 15.02.2024
Accepted for publication 15.02.2024