

## ОЦІНКА РОБОТИ МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВІДІВ У НЕШТАТНИХ УМОВАХ ВИТОКІВ ГАЗУ

**В. Т. Болонний**

*Державний вищий навчальний заклад «Дрогобицький коледж нафти і газу»; 82107, м. Дрогобич, вул. М. Грушевського, 57;  
тел. (03244) 3-89-69, e-mail: vtb281972@ukr.net*

*Подано характеристику газотранспортної системи України, встановлено ризики виникнення аварійних ситуацій вітчизняних газотранспортних трубопровідних систем. Проведено аналіз аварійності трубопровідного транспорту газу в Україні та Росії. Розроблено методiku визначення аварійного тиску в трубопроводі в залежності від кількості втраченого газу з трубопроводу в місці його витоків, яка дає можливість визначити обсяги втраченого з трубопроводу газу та оцінити екологічні ризики від аварійних ситуацій трубопровідного транспорту газу. Дана методика дає можливість розрахувати тиск в кожній точці трубопроводу в умовах нестационарного режиму, викликаного зміною тисків на початку і в кінці ділянки та появою зосередженого витоків газу.*

*За результатами проведених розрахунків побудовано графік коливання тиску в газопроводі, викликаного перепадом тисків на початку і в кінці ділянки та наявністю ймовірних витоків у визначеній точці траси.*

*Лінійна частина магістральних газопроводів є найбільш небезпечним об'єктом, оскільки всі аварійні ситуації пов'язані з витіканням газу в навколишнє середовище і можуть бути причиною відмови системи. Від величини витоків, його інтенсивності та глибини залягання газопроводу залежить процес та термін формування зони загазованості.*

*Фільтраційний опір ґрунту як пористого середовища, зокрема його проникність, мають суттєвий вплив на величину витоків газу через корозійний отвір. Авторами досліджено процес фільтрації газу в ґрунті при появі витоків із трубопроводів, отримано графічні залежності зміни тиску фільтраційного опору середовища і зміни витрати витоків в часі.*

**Ключові слова:** *магістральний газопровід, нестационарний потік, аварійна ситуація, аварійний витік газу.*

**Вступ.** Україна володіє потужною газотранспортною системою. Від її енергетичної та екологічної складової значною мірою залежить поставки газу до споживачів, транзит газу до східноєвропейських партнерів, подача газу до українських підземних сховищ та його відбір.

Газотранспортна система нашої держави включає 38,6 тис. км газопроводів, 72 компресорні станції, 1449 газорозподільних станцій, 12 підземних сховищ газу. Транспортування газу забезпечують 110 компресорних цехів з 702 газоперекачувальними агрегатами загальною потужністю 5,4 тис. МВт. На "вході" ГТС спроможна прийняти до 290 млрд. м<sup>3</sup>, а на "виході" передати 175 млрд. м<sup>3</sup> природного газу, в т.ч. 140 млрд. м<sup>3</sup> – до країн Західної та Центральної Європи. На сьогодні близько 29% газопроводів відпрацювали свій амортизаційний термін, майже 60% експлуатуються від 10 до 33 років.

Зважаючи на терміни експлуатації газопроводів та їх технічний стан, для підтримання надійного та ефективного функціонування до 2015 року було заплановано повністю завершити реконструкцію усіх компресорних станцій. До 2030 року буде завершено модернізацію та технічне переоснащення газотранспортної системи з використанням найбільш сучасних та ефективних технологій. На період до 2030 року в реконструкцію газотранспортної системи необхідно вкласти понад 92,4 млрд. грн. На об'єктах ГТС працює 4424 станції катодного захисту, 193 установки дренажного захисту і 6819 установок протекторного захисту.

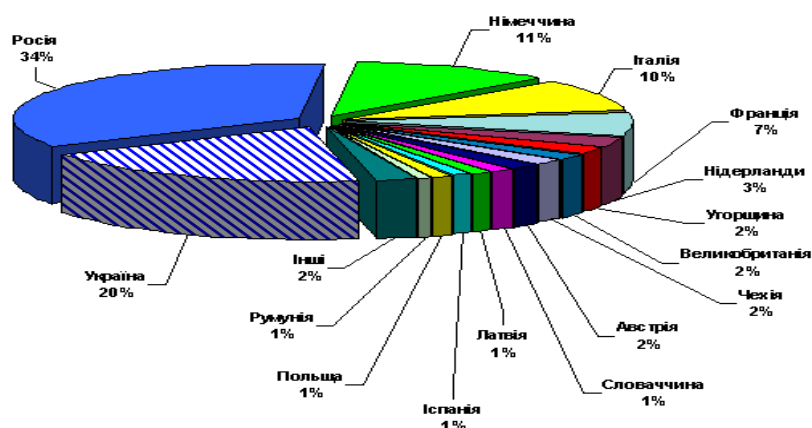


Рис. 1. Діаграма активної місткості підземних сховищ газу країн Європи

Аналіз аварійності на магістральних газопроводах України та Росії свідчить про те, що кількість великих аварій на 1 тисячу кілометрів магістралей на території Російської Федерації у 7,77 разів більша, ніж в Україні. Таким чином, українська ГТС є набагато надійнішою за російську. Це твердження отримане в результаті досліджень, проведених експертами ПАТ "Укртрансгаз" та ВАТ "Газпром". В розрахунок брали лише аварії, які призвели до розгерметизації і припинення транспортування. Підраховувалась кількість позаштатних ситуацій в обох країнах на тисячу кілометрів магістралей протягом 1996-2014 років.

Так, за останні 10 років на українських магістральних газопроводах сталося 5 аварій порівняно з близько 200 аваріями на магістральних газопроводах ВАТ "Газпром".

**Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій.** Розгерметизація магістральних газопроводів є наслідком появи і розвитку різного роду дефектів, спричинених впливом різних чинників (у тому числі і геодинамічного). Це призводить до виникнення аварійних ситуацій з витоками природного газу (рис. 2), згубні наслідки, яких вимагають прогнозування і попередження розгерметизації.



Рис. 2. Наслідки аварії на газопроводі, спричинені витоками газу

Найбільш інтенсивного руйнування зазнає об'єкт в місцях перетину геодинамічної зони та у випадку розміщення в межах самої геодинамічної зони, що є особливо актуальним для інженерних споруд великої протяжності (трубопроводи, тунелі, авто- і залізничні магістралі, канали, ЛЕП, шахтні виробки тощо). Наша держава знаходиться в п'ятірці лідерів за викидами метану в нафтогазовій промисловості.



Рис. 3. Вибух магістрального газопроводу «Уренгой – Помари – Ужгород»

14 лютого 2007р. між містом Хуст та селом Іза Хустського району через корозію металу внаслідок довготривалої експлуатації стався витік газу з газопроводу високого тиску діаметром 324 мм, який належить місцевій філії ВАТ «Закарпатгаз» і введений в експлуатацію 1978 року. Аварія призвела до припинення газопостачання райцентру та 15 сіл району [1].

21 вересня, 2013р. поблизу села Гомільське Криворізького району Дніпропетровської області стався розрив магістрального газогону "Кременчук – Кривий Ріг". Унаслідок аварії утворилася яма розмірами 7х10х2,5м з наступним викидом ділянки труби довжиною близько 16 м. Дана ділянка газогону перебувала під робочим тиском 40 атм., але подача газу здійснювалась паралельною мережею [2]. За даними Державної служби з надзвичайних ситуацій [3] 17 червня 2014 року в Полтавській області, на території Лохвицького району, у полі між селами Ісківці та Красне, внаслідок вибуху з наступним горінням на середній нитці магістрального газопроводу «Уренгой – Помари – Ужгород» пошкоджено 20 метрів однієї з трьох ліній газопроводу високого тиску діаметром 1400 мм, прокладених на глибині 2 метри, які обслуговуються Лубенським лінійним виробничим управлінням магістральних газопроводів «Київтрансгаз».



Рис. 4. Порушення герметичності магістрального газопроводу «Уренгой – Помари – Ужгород» внаслідок вибуху

**Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Дослідженню технічного рівня газопроводів присвячена значна кількість наукових праць. Проблема аварійних витоків газу з трубопроводів є надзвичайно актуальною. Це пов'язано зі старінням матеріалу газопроводу, високою ймовірністю корозійних процесів, значними труднощами проведення ремонтних робіт.

Авторами [4] розроблено аналітичні методи оцінки витоків продукту з лінійної частини газопроводів на основі дослідження діагностичних процесів внутрішньої порожнини трубопроводних систем. Наукові дослідження описують гідравлічну ефективність газотранспортних систем з урахуванням нестационарності потоку та ускладнені їх усередненими параметрами, що понижує точність обчислень. В наукових працях [5] розроблена ймовірнісна оцінка цілісності трубопроводу на основі дефектності ділянок магістрального газопроводу. Питанням формування полів фільтрації забруднень в пористому середовищі як функції просторових координат і часу присвячені наукові методології [6].

**Формулювання цілей статті.** Лінійна частина магістральних газопроводів є відповідальною інженерною спорудою і, не дивлячись на значні вимоги до спорудження газопроводів, підвищення якості системи контролю та системи захисту від корозії та з урахуванням різких змін режимів роботи, недовантаження обсягів транспортування та інших об'єктивних факторів, безаварійна робота лінійної частини магістральних газопроводів є практично неможливою. Аварійність газопроводу визначається низкою параметрів гідродинамічного характеру, що впливають із стаціонарних і нестационарних умов. Нестационарні умови в газопроводах проходять надзвичайно швидко і через певний час встановлюється стаціонарний режим роботи газопроводу.

У даній статті автором розроблено методику оцінки аварійних втрат газу в магістральних газопроводах, що дасть змогу визначити обсяги витоків газу і встановити екологічні збитки від виникнення подібних аварійних ситуацій.

**Висвітлення основного матеріалу дослідження.** Розглянемо довільну ділянку магістрального газопроводу довжини  $L$  з внутрішнім діаметром  $d$ , яка містить підводний перехід. Тиск на початку і в кінці газопроводу становить відповідно  $P_n$  і  $P_k$ . За виробничими даними на магістральному газопроводі виникла аварійна ситуація на відстані  $l_a$  від початку розрахункової ділянки. Основне рівняння, що описує режим руху газу при стаціонарному режимі, має такий вигляд:

$$P_n^2 - P_k^2 = \frac{\lambda M_o^2 z R T l_a}{F^2 d}, \quad (1)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт гідравлічного опору газопроводу;  $z$  – коефіцієнт стиснення газу;  $R$  – газова стала;  $T$  – абсолютна температура газу;  $F$  – площа поперечного перерізу газопроводу;  $M$  – масова витрата газу до появи витоків.

При виникненні аварійної ситуації рівняння (1) набуває вигляду:

$$2P_a^2 - P_{ka}^2 - P_{na}^2 = \frac{\lambda(M_o - m)^2 z R T (L - l_a) - \lambda M_o^2 z R T l_a}{F^2 d}. \quad (2)$$

В результаті математичних перетворень рівняння (2) отримаємо вирази (3) – (5):

$$2P_a^2 - P_{ka}^2 - P_{na}^2 + \frac{\lambda(M_o - m)^2 z R T (L - l_a) - \lambda M_o^2 z R T l_a}{F^2 d}, \quad (3)$$

$$P_a^2 = \frac{1}{2}P_{ka}^2 + \frac{1}{2}P_{na}^2 + \frac{\lambda(M_o-m)^2 zRT(L-l_a) - \lambda M_o^2 zRT l_a}{2F^2 d}, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} P_a &= \sqrt{\frac{1}{2}P_{ka}^2 + \frac{1}{2}P_{na}^2 + \frac{\lambda zRT((M_o-m)^2(L-l_a) - M_o^2 l_a)}{2F^2 d}} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{2}P_{ka}^2 + \frac{1}{2}P_{na}^2 + \frac{\lambda zRT}{2F^2 d}((L-l_a)(M_o-m)^2 - l_a M_o^2)} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{2}P_{ka}^2 + \frac{1}{2}P_{na}^2 - \frac{\lambda zRT l_a M_o^2}{2F^2 d} + \frac{\lambda zRT(L-l_a)}{2F^2 d}(M_o-m)^2} = \\ &= \sqrt{b^2 + c^2(M_o-m)^2}, \end{aligned} \quad (5)$$

де  $b, c$  – розрахункові комплекси, що обчислюються за формулами:

$$b^2 = \frac{1}{2}P_{ka}^2 + \frac{1}{2}P_{na}^2 - \frac{\lambda zRT l_a M_o^2}{2F^2 d}; \quad b = \sqrt{\frac{1}{2}(P_{ka}^2 + P_{na}^2 - \frac{\lambda zRT l_a M_o^2}{2F^2 d})}, \quad (6)$$

$$c^2 = \frac{\lambda zRT(L-l_a)}{2F^2 d}; \quad c = \frac{1}{F} \sqrt{\frac{\lambda zRT(L-l_a)}{2d}}. \quad (7)$$

Рівняння зміни тиску в точці утворення дефекту  $P_a$  від масової витрати  $m$  можна подати у вигляді:

$$\frac{dP_a}{dm} = \sqrt{b^2 + c^2(M_o-m)^2}. \quad (8)$$

В результаті розв'язування рівняння (8), отримаємо наступний вираз:

$$\begin{aligned} P_a &= \int_0^{m_n} \sqrt{b^2 + c^2(M_o-m)^2} dm = \\ &= - \int_0^{m_n} \sqrt{b^2 + c^2(M_o-m)^2} d(M_o-m) = \\ &= -\frac{1}{2}((M_o-m)\sqrt{b^2 + c^2(M_o-m)^2} + \\ &+ \frac{b^2}{c} l_n |c(M_o-m) + \sqrt{b^2 + c^2(M_o-m)^2}|) \int_0^{m_n} = \\ &= -\frac{1}{2}((M_o-m_n)\sqrt{b^2 + c^2(M_o-m_n)^2} + \\ &+ \frac{b^2}{c} l_n |c(M_o-m_n) + \sqrt{b^2 + c^2(M_o-m_n)^2}|) + \\ &+ \frac{1}{2}(M_o\sqrt{b^2 + c^2 M_o^2} + \frac{b^2}{c} l_n |cM_o + \sqrt{b^2 + c^2 M_o^2}|) = \\ &= \frac{1}{2}(M_o\sqrt{b^2 + c^2 M_o^2} - (M_o-m_n)\sqrt{b^2 + c^2(M_o-m_n)^2} + \\ &+ \frac{b^2}{c} l_n \frac{cM_o + \sqrt{b^2 + c^2 M_o^2}}{c(M_o-m_n) + \sqrt{b^2 + c^2(M_o-m_n)^2}}). \end{aligned}$$

За одержаним розв'язком можна визначити тиск в кожній точці трубопроводу в умовах нестационарного режиму, викликаного зміною тисків на початку і в кінці ділянки та появою зосередженого витoku газу.

Основні розв'язки рівняння (8) з урахуванням різних умов роботи газопроводу дозволили побудувати графіки коливного процесу в газопроводі, викликаного стрибком тисків на початку і в кінці ділянки та наявністю ймовірних витоків у визначеній точці траси. Графіки показано на рис. 5.

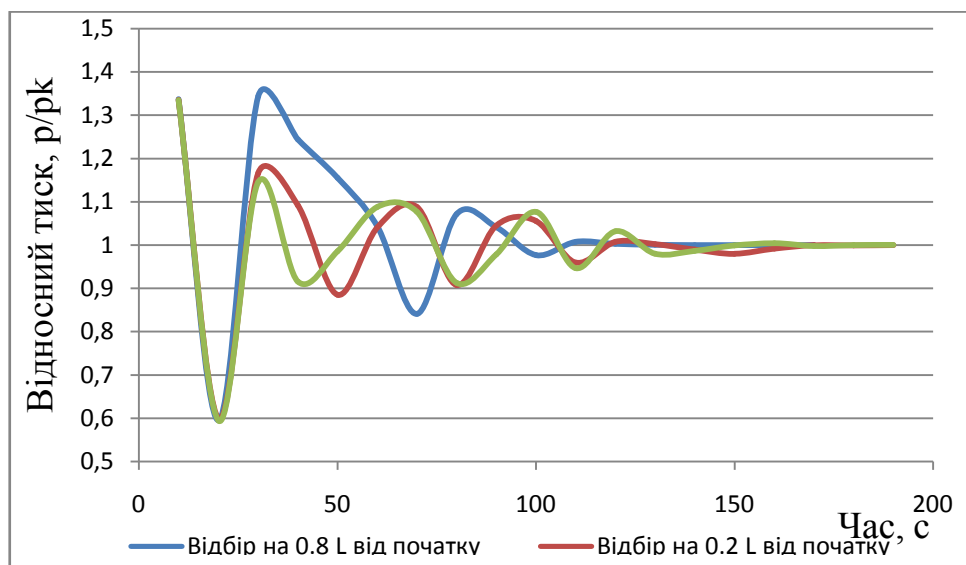


Рис. 5. Характер коливання тиску в газопроводі

У процесі проведених досліджень розглядалась можливість імітації розміщення витoku на різних відстанях від початку і кінця ділянки.

З одержаного розв'язку видно, що за наявності аварійного витoku з трубопроводу повинен змінитися тиск у кожній точці. Проте, якщо витік достатньо малий, то він впливає на тиск незначно, що не дозволило зафіксувати зміни досліджуваних параметрів. Тому важливо встановити, починаючи з якої величини витрати газу, поява витoku внесе корективи чи збурення в нестационарний процес, викликаний стрибкоподібною зміною витрати внаслідок відключення чи підключення буферного споживача.

Аварійні витoki газу з газопроводів потрапляють у навколишнє середовище, найчастіше ґрунт, утворюючи ареал загазованості, і в подальшому досягають поверхні, забруднюючи атмосферу.

Очевидно, що в залежності від величини витoku, його інтенсивності та глибини залягання газопроводу залежить процес та термін формування зони загазованості. З іншого боку, фільтраційний опір ґрунту як пористого середовища, зокрема його проникність, мають суттєвий

вплив на величину витоку газу через корозійний отвір. Тому існує певний взаємозв'язок між величиною втрат газу, пов'язаних з корозійними витоками, та закономірностями його фільтрації в навколишньому ґрунті.

На рис. 6 подано залежності зміни тиску фільтраційного опору середовища (тиску протидії витіканню) і зміни витрати витоку в часі, що побудовані для різних ґрунтів.

Аналіз отриманих графічних залежностей показує, що зростання тиску протидії витіканню за рахунок фільтраційного опору ґрунту визначається проникністю пористого середовища і фізичними властивостями газу. За сталого тиску в трубопроводі та незмінної площі перетину витікання зростання тиску фільтраційного опору призводить до зменшення витрати витоку газу. Тривалість процесу нестационарної фільтрації газу в ґрунті залежить від проникності пористого середовища і може коливатися в значному часовому діапазоні.

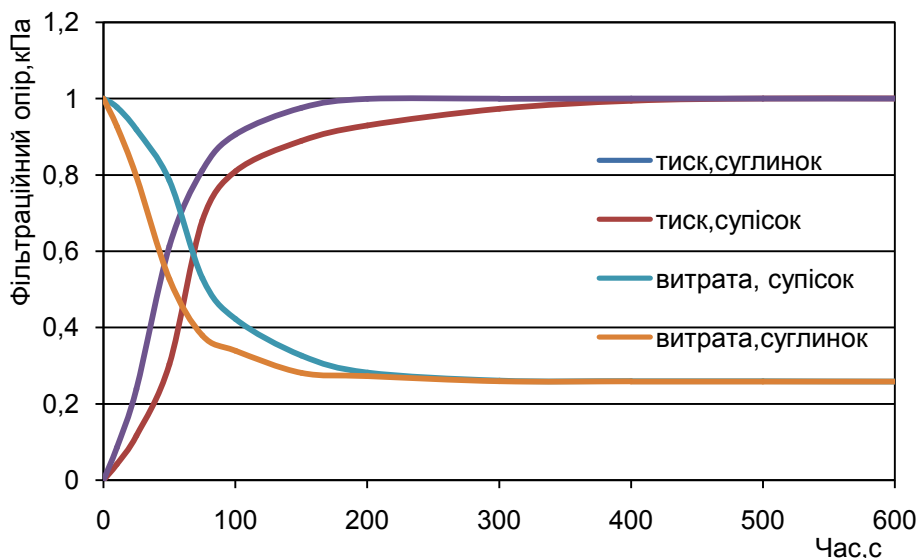


Рис. 6. Залежність тиску і витрати витоку від часу для різних ґрунтів

**Висновки.** Таким чином, отримані результати досліджень показують, що аварійні витоки газу носять нестационарний характер і основним впливовим моментом екологічної безпеки при цьому є фільтраційні властивості ґрунтів. Зростання тиску протидії витіканню за рахунок фільтраційного опору ґрунту визначається проникністю пористого середовища і фізичними властивостями газу. За сталого тиску в трубопроводі та незмінної площі перетину витікання зростання тиску фільтраційного опору призводить до зменшення витрати витоку газу. Тривалість процесу нестационарної фільтрації газу в ґрунті залежить від проникності пористого середовища і може коливатися в значному часовому діапазоні.



**Література**

1. На Закарпатті ліквідований витік газу із газопроводу високого тиску: <https://zakarpattyua.net.ua>
2. Стався розрив магістрального газопроводу «Кременчук-Кривий Ріг»: <https://www.ukrinform.ua>
3. Ділянка газопроводу Уренгой – Помари – Ужгород, що вибухнула: <https://https://dt.ua/.../dilyanka-gazoprovodu-urengoy-pomari-uzhg>
4. Грудз В.Я. Технічна діагностика трубопровідних систем / В.Я. Грудз, Я.В. Грудз, В.В. Костів та ін. – Івано-Франківськ: Лілея-НВ, 2012. – 512 с.
5. Мандрик О.М. Екологічна безпека транспортування природного газу: монографія / за ред. д.т.н., проф., член-кор. НАН України Є.І. Крижанівського. – Івано-Франківськ, 2014. – 256 с.
6. Грудз Я.В. Енергоефективність газотранспортних систем / Я.В. Грудз. – Івано-Франківськ: Лілея-НВ, 2012. – 208 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії 13.09.2019 р.  
Рекомендовано до друку д.т.н., професором **Тимківим Д.Ф.**  
д.т.н., професором **Говдяком Р.М.** (м. Київ)*

**ESTIMATION OF THE MAIN GAS PIPELINE OPERATION  
UNDER EMERGENCY CONDITIONS OF GAS LEAKAGE****V. T. Bolonny**

*State Higer Educational Institution “Drohobych oil and gas college”;  
82100, Ukraine, Lviv region, Drohobych, 57 Hrushewskoho str.;  
ph. (03244) 3-89-69; e-mail: vtb281972@ukr.net*

*The characteristics of the gas transportation system of Ukraine are presented, the emergency risks of domestic gas transportation pipeline systems are established. The analysis of the accident rate of gas pipeline transport in Ukraine and Russia was carried out. Presented technique of determining the emergency pressure in the pipeline, depending on the amount of gas losses from pipeline at the point of its leakage provides an opportunity to determine the volume of gas losses from the pipeline and to evaluate the environmental risks due to emergency situations of gas pipeline transport. This technique makes it possible to calculate the pressure at each point of pipeline under nonstationary conditions caused by changes in pressure at the beginning and at the end of the sector and the emergence of concentrated gas leakage.*

*Based on the results of calculations, a graph of pressure change of the oscillatory process in the gas pipeline caused by jump of pressures at the beginning and at the end of the sector, and the presence of probable leakages at the determined point of the trace was constructed. The linear part*

*of the main gas pipelines is the most dangerous object, as all emergency situations are associated with emergency processes of different intensity in the form of gas leakage into the environment and in fact are dangerous when system failures appear. The process and the time period for the formation of the gas pollution zone depend on the amount of gas leakage, its intensity and depth of the gas pipeline.*

*The filtration resistance of the soil as a porous medium, in particular its permeability, have a significant effect on the amount of gas leakage through corrosive orifice. As a result, there is a correlation between the amount of gas losses associated with the leakage, and the laws of its filtration in the surrounding soil.*

*As a result, the effect of gas filtration process in the soil in the event of leakage from pipelines has been investigated. The graphic dependence of change in pressure of the filtration resistance of the medium and the time-changing leakage which are designed for different soil characteristics is obtained.*

**Key words:** *main gas pipeline, nonstationary flow, emergency situation, emergency gas leakage.*