

УДК 622.691.4

DOI: 10.31471/2304-7399-2025-21(79)-439-446

ОЦІНКА ПАРАМЕТРІВ АРЕАЛУ ЗАГАЗОВАНOSTІ ҐРУНТУ ПРИ АВАРІЙНИХ ВИТОКАХ ГАЗУ З ГАЗОПРОВODІВ

Р. Б. Стасюк , О. І. Белей 

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;
тел. +38 (0342) 72-71-38; e-mail: roman.stasiuk@nuing.edu.ua

У статті розглянуто проблему аварійних витоків природного газу з трубопроводів, спричинених корозійним руйнуванням стінок, а також їхній вплив на довкілля. Показано, що під час утворення витоку газ надходить у ґрунтове середовище, формуючи зону загазованості, яка поступово поширюється до поверхні та призводить до забруднення атмосфери. Розміри та динаміка цієї зони залежать від інтенсивності витоку, глибини залягання трубопроводу та властивостей ґрунту, насамперед його проникності та опору руху газу в поровому просторі. Це створює складний взаємозв'язок між процесами витікання та закономірностями фільтрації.

Окрім втрат газу, що спричиняють економічні збитки, витoki погіршують екологічний стан ґрунтів і створюють вибухонебезпечні умови за підвищених концентрацій метану. Проаналізовано попередні дослідження, присвячені діагностиці витоків за температурними аномаліями, визначенню фільтраційних властивостей ґрунтів і моделюванню нестационарної фільтрації. Водночас наголошено, що комплексні роботи, які одночасно враховують процес виходу газу та розвиток зони забруднення, практично відсутні.

У статті виконано аналітичний опис витікання газу через корозійний дефект та змодельовано процес формування ареалу загазованості. Запропонована математична модель дає змогу визначити час проходження газу до поверхні, обсяг забрудненої зони та величину втрат. Окрема увага приділена двофазному характеру процесу – періоду прориву газу на поверхню та подальшому стаціонарному режиму фільтрації.

Отримані результати можуть бути використані для оцінювання технічного стану газопроводів, прогнозування наслідків аварій, удосконалення систем моніторингу витоків і підвищення екологічної безпеки газорозподільних мереж.

Ключові слова: газопровід, витік газу, корозія, фільтрація, ареал загазованості, математичне моделювання.

Вступ

Аварійні витoki газу з газопроводів газових мереж через корозійні пошкодження стінок труб попадають в навколишнє середовище,

яким найчастіше являється 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 витoku газу через корозійний отвір. Тому існує певний взаємозв'язок між величиною втрат газу, пов'язаних з корозійними витокami, та закономірностями його фільтрації в навколишньому ґрунті [1, 2].

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Проблематиці витікання газу з газопроводів присвячені праці М. І. Гончарук, М. Д. Середюк [1], у яких подано методики визначення обсягів втрат газу під час витікання, проведено їх оцінку при транспортуванні, а також запропоновано методи діагностування місць пошкоджень. Закономірності фільтрації газу в пористому середовищі докладно розглянуто в роботах J. R. Jayarathne, R. N. Kolodziej [5] та інших учених, де наведено залежності швидкості фільтрації від розподілу тисків і характеристик порового простору ґрунту та які одночасно описують процеси витікання газу з трубопроводу та формування ареалу забруднення ґрунту, на сьогодні в літературі практично відсутні.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Незважаючи на значну кількість досліджень, відсутні роботи присвячені діагностиці витоків газу на основі зниження температури ґрунту, визначенню його фільтраційних характеристик для різних типів порід, а також моделюванню нестационарних процесів фільтрації в умовах досягнення поверхні землі. Зазначається, що однією з головних труднощів під час таких досліджень є невизначеність площі перерізу корозійного пошкодження трубопроводу та її зміна з часом.

Мета та завдання досліджень

Метою роботи є аналітичне дослідження процесу витікання природного газу з газопроводу через корозійні пошкодження та моделювання формування ареалу загазованості ґрунту з урахуванням фільтраційних властивостей пористого середовища.

Будемо вважати, що на значній віддалі від джерела в ґрунті швидкості руху середовища відсутні.

Припустимо, що до початку дії джерела ($t = 0$) система знаходиться в спокої і тиск повітря у всіх точках площини внаслідок незначної глибини залягання був атмосферним

Математична модель реалізується методом інтегральних перетворень.

Для розв'язку задачі використовуємо синус-перетворення Фур'є по змінній y і перетворення Лапласа по часу t

$$W = \int_0^{\infty} W(x, y, t) \sin \lambda y dy. \quad (1)$$

$$\overline{W} = \int_0^{\infty} W(x, \lambda, t) e^{-St} dt. \quad (2)$$

Застосовуємо перетворення (1) до задачі (2), і отримуємо (3)

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \mathfrak{a} \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} - \lambda^2 W \right) - \mathfrak{a} q \sin \lambda y_0 \delta(x - x_0), \quad (3)$$

$$W(x, \lambda, 0) = 0.$$

До задачі (2), (3) застосовуємо перетворення Лапласа

$$S \overline{W} = \mathfrak{a} \left(\frac{d^2 \overline{W}}{dx^2} - \lambda^2 \overline{W} \right) - \mathfrak{a} \frac{g}{S} \sin \lambda y_0 \delta(x - x_0). \quad (4)$$

$$\frac{d^2 \overline{W}}{dx^2} - \left(\frac{S + \mathfrak{a} \lambda^2}{\mathfrak{a}} \right) \overline{W} = \frac{g}{S} \sin \lambda y_0 \delta(x - x_0). \quad (5)$$

Неоднорідне рівняння (5) розв'язуємо методом варіації довільних змінних. Розв'язок однорідного рівняння, що відповідає рівнянню (6), має вигляд

$$\overline{W} = C_1 e^{\sqrt{\frac{S + \mathfrak{a} \lambda^2}{\mathfrak{a}}} x} + C_2 e^{-\sqrt{\frac{S + \mathfrak{a} \lambda^2}{\mathfrak{a}}} x}. \quad (6)$$

Позначимо $\alpha = \sqrt{\frac{S + \mathfrak{a} \lambda^2}{\mathfrak{a}}}$.

Величини C_1 і C_2 , що відповідають розв'язку неоднорідного рівняння (7), знаходимо із такої системи рівнянь

$$C_1' e^{\alpha x} + C_2' e^{-\alpha x} = 0, \quad (7)$$

$$C_1' e^{\alpha x} - C_2' e^{-\alpha x} = \frac{q}{S} \sin \lambda y_0 \delta(x - x_0).$$

Із рівнянь (7) отримуємо

$$C_1' = \frac{q e^{-\alpha x}}{2S\alpha} \sin \lambda y_0 \delta(x - x_0), \quad (8)$$

$$C_1' = \frac{g}{2FS\alpha} \sin \lambda y_0 \int_0^x e^{-\alpha x} \delta(x - x_0) + B_1.$$

З останнього рівняння маємо

$$C_1 = \frac{q \sin \lambda y_0}{2S\alpha} e^{-\alpha x_0} \delta(x - x_0) + B_1. \quad (9)$$

В (9) $\delta(x - x_0)$ є функцією Хевісайда.

Якщо верхнє рівняння (8) помножити на α і від першого рівняння відняти друге, то одержимо

$$C_2' = -\frac{q \sin \lambda y_0}{2S\alpha} e^{\alpha x} \delta(x - x_0).$$

Тому

$$C_2 = -\frac{q \sin \lambda y_0}{2S\alpha} \int_0^x e^{\alpha x} \delta(x - x_0) + B_2,$$

або

$$C_2 = -\frac{q \sin \lambda y_0}{2S\alpha} e^{\alpha x_0} \delta(x - x_0) e^{\alpha x} + B_2. \quad (10)$$

Підставляємо (10) і (9) в (7) отримуємо розв'язок диференціального рівняння (7)

$$\begin{aligned} \overline{W} = & \frac{q \sin \lambda y_0}{2S\alpha} e^{\alpha(x-x_0)} \sigma(x - x_0) + B_1 e^{\alpha x} - \\ & - \frac{q \sin \lambda y_0}{2S\alpha} e^{-\alpha(x-x_0)} \sigma(x - x_0) + B_2 e^{-\alpha x}. \end{aligned} \quad (11)$$

Оскільки з фізичної суті задачі $\lim_{x \rightarrow \infty} w = 0$ і $\lim_{x \rightarrow -\infty} w = 0$, то й справджується рівності $\lim_{x \rightarrow \infty} \overline{W} = 0$, $\lim_{x \rightarrow -\infty} \overline{W} = 0$.

Враховуючи це отримаємо

$$\begin{aligned} B_1 = & -\frac{q \sin \lambda y_0}{2S\alpha} e^{-\alpha x_0}, \\ B_2 = & 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Підставляємо (12) в (11)

$$\overline{W} = \frac{q \sin \lambda y_0}{2S\alpha} [\sigma(x - x_0) - 1] e^{\alpha(x-x_0)} - \frac{q \sin \lambda y_0}{2FS\alpha} [\sigma(x - x_0)] e^{-\alpha(x-x_0)}.$$

Підставимо (12) в диференціальне (11) і переконаємося, що (12) задовольняє цьому рівнянню.

Знаходимо перетворення Лапласа від (12). Перепишемо (13) у вигляді

$$\begin{aligned} \overline{W} = & \frac{q \sin \lambda y_0}{2} [\sigma(x - x_0) - 1] \frac{e^{\frac{\sqrt{S+\alpha\lambda^2}(x-x_0)}{\sqrt{\alpha}} \cdot \sqrt{\alpha}}}{S \sqrt{S+\alpha\lambda^2}} - \\ & - \frac{q \sin \lambda y_0}{2} [\sigma(x - x_0)] \frac{e^{\frac{-\sqrt{S+\alpha\lambda^2}(x-x_0)}{\sqrt{\alpha}} \cdot \sqrt{\alpha}}}{S \sqrt{S+\alpha\lambda^2}}. \end{aligned} \quad (13)$$

Користуючись таблицями перетворень Лапласа, маємо

$$\frac{e^{\frac{(x_0-x)\sqrt{S+\alpha\lambda^2}}{\sqrt{\alpha}}}}{S \sqrt{S+\alpha\lambda^2}} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{1}{2\sqrt{\alpha}\lambda^2} \left[e^{-\lambda(x_0-x)} \operatorname{erfc}\left(\frac{x_0-x}{2\sqrt{\alpha t}} - \lambda\sqrt{\alpha t}\right) - e^{\lambda(x_0-x)} \operatorname{erfc}\left(\frac{x_0-x}{2\sqrt{\alpha t}} + \lambda\sqrt{\alpha t}\right) \right]$$

Таким чином, перетворення Лапласа функції (14) буде

$$\begin{aligned} W = & \frac{q\sqrt{\alpha} \cdot \sin \lambda y_0}{2} [\sigma(x-x_0)-1] \cdot \frac{1}{2\lambda\sqrt{\alpha}} \times \\ & \times \left[e^{-\lambda(x_0-x)} \operatorname{erfc}\left(\frac{x_0-x}{2\sqrt{\alpha t}} - \lambda\sqrt{\alpha t}\right) - e^{\lambda(x_0-x)} \operatorname{erfc}\left(\frac{x_0-x}{2\sqrt{\alpha t}} + \lambda\sqrt{\alpha t}\right) \right] - \\ & - \frac{q\sqrt{\alpha} \cdot \sin \lambda y_0}{2} \sigma(x-x_0) \cdot \frac{1}{2\lambda\sqrt{\alpha}} \times \\ & \times \left[e^{-\lambda(x-x_0)} \operatorname{erfc}\left(\frac{x-x_0}{2\sqrt{\alpha t}} - \lambda\sqrt{\alpha t}\right) - e^{\lambda(x-x_0)} \operatorname{erfc}\left(\frac{x-x_0}{2\sqrt{\alpha t}} + \lambda\sqrt{\alpha t}\right) \right], \end{aligned} \quad (14)$$

Виконуємо обернене синус-перетворення Фур'є

$$W = \frac{\pi}{2} \int_0^\infty \bar{W} \sin \lambda y dy \text{ і отримуємо}$$

$$\begin{aligned} W = & \frac{q}{2\pi} \int_0^\infty \frac{\sin \lambda y_0 \sin \lambda y}{\lambda} \left\{ [\sigma(x-x_0)-1] \left[e^{-\lambda(x_0-x)} \operatorname{erfc}\left(\frac{x_0-x}{2\sqrt{\alpha t}} - \lambda\sqrt{\alpha t}\right) - \right. \right. \\ & - e^{\lambda(x_0-x)} \operatorname{erfc}\left(\frac{x_0-x}{2\sqrt{\alpha t}} + \lambda\sqrt{\alpha t}\right) \left. \right] - \sigma(x-x_0) \left[e^{-\lambda(x-x_0)} \operatorname{erfc}\left(\frac{x-x_0}{2\sqrt{\alpha t}} - \lambda\sqrt{\alpha t}\right) - \right. \\ & \left. \left. - e^{\lambda(x-x_0)} \operatorname{erfc}\left(\frac{x-x_0}{2\sqrt{\alpha t}} + \lambda\sqrt{\alpha t}\right) \right] \right\} d\lambda. \end{aligned} \quad (15)$$

Розв'язок поставленої задачі розподілу тиску в поровому середовищі має вигляд

$$\begin{aligned} P(x, y, t) = & P_a + \frac{q}{2\pi} \int_0^\infty \frac{\sin \lambda y_0 \sin \lambda y}{\lambda} \times \\ & \times \left\{ [\sigma(x-x_0)-1] \left[e^{-\lambda(x_0-x)} \operatorname{erfc}\left(\frac{x_0-x}{2\sqrt{\alpha t}} - \lambda\sqrt{\alpha t}\right) - \right. \right. \\ & - e^{\lambda(x_0-x)} \operatorname{erfc}\left(\frac{x_0-x}{2\sqrt{\alpha t}} + \lambda\sqrt{\alpha t}\right) \left. \right] - \sigma(x-x_0) \times \\ & \times \left[e^{-\lambda(x-x_0)} \operatorname{erfc}\left(\frac{x-x_0}{2\sqrt{\alpha t}} - \lambda\sqrt{\alpha t}\right) - e^{\lambda(x-x_0)} \operatorname{erfc}\left(\frac{x-x_0}{2\sqrt{\alpha t}} + \lambda\sqrt{\alpha t}\right) \right] \right\} d\lambda. \end{aligned} \quad (16)$$

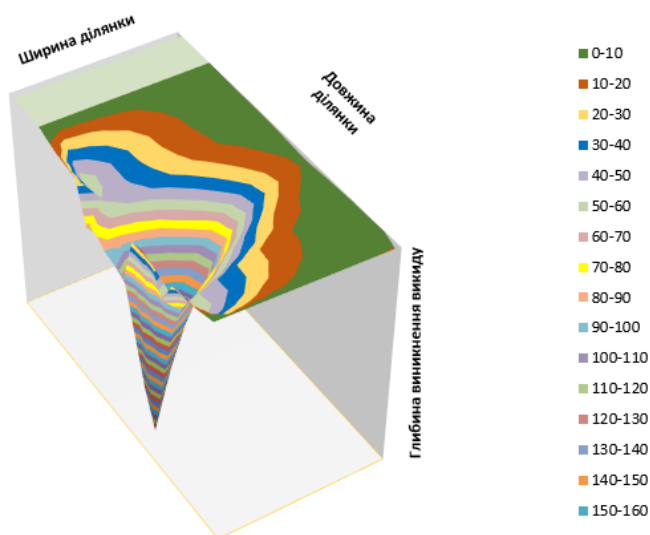


Рис. 1. Результати математичного моделювання поля швидкостей фільтрації при появі витoku з газопроводу

На основі результатів досліджень з урахуванням реалізації запропонованої математичної моделі побудовано графіки, які обмежують границі ареалу загазованості для першої і другої фаз процесу нестационарної фільтрації газу. Вказані графіки для напрямку вздовж і поперек трубопроводу приведені на рис. 2.

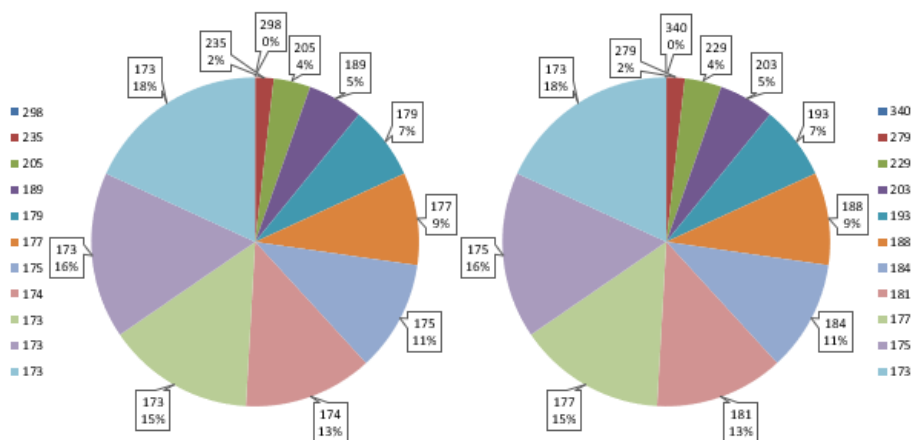


Рис. 2. Значення які обмежують границі ареалу загазованості для першої і другої фаз процесу нестационарної фільтрації газу

Аналіз результатів показує, що найбільший об'єм ареалу загазованості ґрунту займає на кінець першої фази нестационарної фільтрації газу в ґрунті. Це пояснюється наявністю певного фільтраційного опору ґрунту в період досягнення газом поверхні ґрунту. З наближенням до

поверхні величина фільтраційного опору зменшується, що призводить до зростання поверхні ареалу загазованості.

Висновки

1. Ареал загазованості ґрунту витокami газу з газопроводу на глибинах, близьких до трубопроводу, займає поверхню, співрозмірну з розмірами траншеї. З наближенням до поверхні трубопроводу форма ареалу загазованості наближається до еліпса, велика вісь якого спрямована вздовж осі трубопроводу, а площа складає близько. Після досягнення газом поверхні ґрунту фільтраційний опір різко зменшується, що призводить до зростання швидкості переходу газу з ґрунту в атмосферу, внаслідок чого площа поверхні загазованості повинна зменшитися, а відповідно до принципу нерозривності, швидкість виходу газу в атмосферу – зростає.

Література

1. Гончарук М.І. Довідник з газопостачання населених пунктів України / М. І. Гончарук, М. Д. Середюк, В. І. Шелуденко. – Івано-Франківськ: «Сімик», 2006. – 1313с.
2. ДБН В.2.5-20:2018. Газопостачання. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2018. – 115 с.
3. Постанова Кабінету Міністрів України №1325 від 15.12.2021 р. «Про затвердження нормативів гранично допустимих концентрацій речовин у ґрунтах». – Київ, 2021.
4. Jayarathne, J. R. R. N., Kolodziej, R. S. IV, Riddick, S. N., Zimmerle, D. J., Smits, K. M. Flow and transport of methane from leaking underground pipelines: effects of soil surface conditions and implications for natural gas leak classification // *Environ. Sci. Technol. Lett.* – 2024. – Vol. 11, № 6. – Article 539. – DOI: 10.1021/acs.estlett.4c00039.
5. Jayarathne, J. R. R. N., Kolodziej, R. S., Riddick, S. N., Zimmerle, D. J., Smits, K. M. Influence of soil-gas diffusivity on expansion of leaked underground natural-gas plumes and application on simulation efforts // *J. Hydrol.* – 2023. – Article ID / Vol.: 625 (Part B) / art. 130049. – DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.130049.
6. Cho, Y., Smits, K. M., Steadman, N. L., Ulrich, B. A., Bell, C. S., Zimmerle, D. J. A closer look at underground natural gas pipeline leaks across the United States // *Elementa*. – 2022. – Vol. 10, № 1, Art. 00095. – DOI: 10.1525/elementa.2021.00095.
7. Wu, L., Qiao, L., Fan, J., Wen, J., Zhang, Y., Jar, B. Investigation on natural gas leakage and diffusion characteristics based on CFD // *Gas Sci. Eng.* – 2024. – Vol. 123, Art. 205238. – DOI: 10.1016/j.jgsce.2024.205238.
8. Zandi, E., Alemrajabi, A. A., Emami, M. D., Hassanpour, M. Numerical study of gas leakage from a pipeline and its concentration evaluation based on modern and practical leak-detection methods // *J. Loss Prev. Process Ind.* – 2022. – Vol. 80, Art. 104890. – DOI: 10.1016/j.jlp.2022.104890.

9. Jiang, H., Xie, Z., Li, Y., Chi, M. Leakage and diffusion of high-pressure gas pipeline in soil and atmosphere: experimental and numerical study // *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. – 2023. – Published online 30 Aug 2023. – DOI: 10.1080/15567036.2023.2251429.

Стаття надійшла до редакційної колегії 30.10.2025 р.

Прийнято до друку 04.12.2025 р.

ASSESSMENT OF PARAMETERS OF THE AREA OF GAS CONTAMINATION OF THE SOIL DURING EMERGENCY GAS LEAKS FROM GAS PIPELINES

R. B. Stasyuk , **O. I. Beley** 

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas;
76019, Ivano-Frankivsk, 15 Karpatska Street;
tel. +38 (0342) 72-71-38; e-mail: roman.stasiuk@nung.edu.ua*

The article examines the issue of emergency natural gas leaks from pipelines caused by corrosion-induced damage to pipe walls, as well as their impact on the environment. It is shown that when a leak occurs, gas penetrates the soil, forming a gas-saturated zone that gradually spreads toward the surface and contaminates the atmosphere. The size and dynamics of this zone depend on the leak intensity, the depth of the pipeline, and the soil's filtration properties – particularly its permeability and resistance to gas migration in pore spaces. This creates a complex relationship between leakage processes and gas filtration patterns.

In addition to gas losses that result in economic damage, leaks degrade soil quality and create explosive hazards once methane concentrations reach critical levels. The article reviews existing studies on leak detection using soil temperature anomalies, determination of soil filtration characteristics, and modeling of unsteady gas filtration. At the same time, it is noted that there is a lack of comprehensive research combining the analysis of gas outflow from a pipeline with the formation of a contamination zone.

Analytical investigations of gas escape through a corrosion defect were carried out, and the formation of a gas-saturated soil area was modeled. A mathematical model is proposed that makes it possible to determine the time required for gas to reach the surface, the volume of the contaminated zone, and the magnitude of gas losses. Particular attention is given to the two-phase nature of the process – the initial breakthrough of gas to the surface and the subsequent steady-state filtration stage.

The findings can be applied to assessing pipeline integrity, predicting consequences of emergency situations, developing leak monitoring systems, and improving environmental safety measures in gas distribution networks.

Keywords: *gas pipeline, gas leakage, corrosion, filtration, area of gasification, mathematical modeling.*