

УДК (504.05 +504.06) 622.692

DOI: 10.33868/0365-8392-2026-1-286-20-23

© В. І. Дмитренко, канд. техн. наук, доцент,
завідувачка кафедри,
ORCID: 0000-0002-1678-2575,
e-mail: nning.DmytrenkoVI@nupp.edu.ua;

© Є. Б. Степовий, аспірант,
ORCID: 0009-0001-4783-3929,
e-mail: alenastepovaja@gmail.com
(Національний університет «Полтавська полі-
техніка імені Юрія Кондратюка»)

© Viktoriia Dmytrenko, PhD,
Head of the Department,
ORCID: 0000-0002-1678-2575,
e-mail: nning.DmytrenkoVI@nupp.edu.ua;

© Yevhen Stepovyi, Postgraduate,
ORCID: 0009-0001-4783-3929,
e-mail: alenastepovaja@gmail.com
(National University «Yuri Kondratyuk Poltava
Polytechnic»)

МОДЕЛЮВАННЯ МАКРОГАЛЬВАНІЧНОЇ КОРОЗІЇ НАФТОПРОВОДІВ З УРАХУВАННЯМ ЗМІННИХ ФІЗИКО- ХІМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ҐРУНТУ

MODELING OF MACROGALVANIC CORROSION OF OIL PIPELINES TAKING INTO ACCOUNT VARIABLE PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF THE SOIL

Анотація. Розглянуто проблему забезпечення надійності магістральних нафтопроводів в умовах змінного ґрунтового середовища, зокрема впливу вологості та омичного опору ґрунту на макрогальванічні процеси. Метою дослідження є розробка чисельної моделі, яка дозволяє адекватно враховувати електрохімічні параметри корозійного середовища та поляризаційні властивості трубопроводного металу.

Методологія базується на розв'язанні системи нелінійних алгебраїчних рівнянь, що описують розподіл потенціалів і корозійних струмів уздовж трубопроводу, з урахуванням впливу навколишнього середовища. У роботі застосовано ітераційний чисельний метод для побудови потенціалів, аналітично описано вплив зміни вологості ґрунту на параметри макрогальванічної пари, а також реалізовано розрахунок питомої поляризованості металу для кожної ділянки трубопроводу.

Запропонована модель дозволяє оцінювати залишковий ресурс металу, виявляти аварійно небезпечні ділянки та підвищувати ефективність систем катодного захисту. Результати дослідження можуть бути використані для створення інженерного програмного забезпечення, а також лягти в основу сучасних нормативно-технічних документів щодо моніторингу підземних трубопроводів.

Ключові слова: сталевий нафтопровід, електрохімічна корозія, поздовжня гальванопара, модель корозії, швидкість корозії, екологічна безпека.

Abstract. The article comprehensively examines the problem of ensuring the reliability of main oil pipelines in conditions of a changing soil environment, which significantly affects the intensity of corrosion processes. Particular attention is paid to the influence of soil moisture and ohmic resistance, which determine the electrochemical conditions for the formation of macrogalvanic couples – a key factor accelerating localized corrosion of pipeline metal.

The aim of the study is to create a mathematical model capable of accurately describing the distribution of electrochemical potentials and corrosion currents along the pipeline system, taking into account both the properties of the metal and the variable parameters of the external environment.

The proposed numerical model is based on solving a system of nonlinear algebraic equations using iterative methods, which allows for detailed simulation of the effect of variable soil moisture on the electrochemical behavior of metal surfaces.

The article also provides an analytical description of changes in the parameters of a macrogalvanic couple depending on the level of moisture and electrical resistance of the soil, and proposes a method for calculating the specific polarizability of pipeline metal in different sections of the pipeline. The proposed model allows not only to accurately assess the remaining resource of pipeline systems, but also to identify accident-prone areas in a timely manner, thereby increasing the efficiency of cathodic protection systems.

The results obtained are of practical value for the creation of specialized engineering software and can be used in the development of the latest regulatory and technical documents in the field of monitoring and protection of underground pipeline systems.

Keywords: steel oil pipeline, electrochemical corrosion, longitudinal galvanocouple, corrosion model, corrosion rate, environmental safety.

Вступ

На думку авторів [1], серед ключових екологічних викликів, що супроводжують діяльність нафтогазового сектору, особливо актуальними є питання транспортування вуглеводнів і забезпечення екологічної безпеки під час експлуатаційних процесів. Головна увага приділяється попередженню аварійних ситуацій і техногенних катастроф, пов'язаних із використанням трубопровідного транспорту. Дослідження причин пошкодження нафтопроводів свідчить, що основною з них є корозійні процеси, які виникають у сталевих трубах за умови вільного доступу агресивних середовищ, таких як соляні, кислотні чи лужні технологічні розчини. Подібні інженерні системи потребують ретельного нагляду та регулярного контролю зовнішнього стану щодо корозії. Сучасні методики оцінки корозійного зносу часто ґрунтуються на емпіричних підходах, які не враховують впливу пошкоджень ізоляційного шару або наявності електролітів. Точніші результати можна отримати лише шляхом аналізу корозійного процесу в конкретних умовах експлуатації та його впливу на міцність конструкцій.

Забезпечення надійності та довговічності магістральних нафтопроводів є критично важливим завданням для енергетичної безпеки країни. Одним із найнебезпечніших чинників деградації трубопровідних систем є корозія, яка виникає через електрохімічну взаємодію між віддаленими анодними та катодними ділянками трубопроводу.

Динамічні зміни омичного опору ґрунту, зумовлені зволоженням або підсиханням, значно ускладнюють прогнозування швидкості корозійного зношення. У таких умовах традиційні методи розрахунку часто виявляються недостатніми, що вимагає застосування чисельного моделювання для точної оцінки розподілу струмів і потенціалів уздовж трубопроводу.

Актуальність роботи зумовлена потребою в надійному інструменті для прогнозування корозійної активності, який дозволить оцінити залишковий ресурс металу, своєчасно виявити аварійно небезпечні ділянки та розробити ефективні

заходи захисту. Запропонований підхід до моделювання макрогальванічних процесів є важливим кроком до впровадження сучасних систем моніторингу технічного стану нафтотранспортної інфраструктури.

Проблематика безпечної експлуатації нафтопроводів та їхній екологічний вплив є предметом активного дослідження вітчизняних і зарубіжних учених. Зокрема, автори [1] досліджували механізми електрохімічної та ґрунтової корозії, а також специфіку корозійних процесів у різних регіонах України. Питання моделювання взаємозв'язку між корозійним зношенням металу та чинниками навколишнього середовища, а також прогнозування довговічності трубопроводів в умовах агресивного середовища розглянуто у працях [2–5]. Авторами [6–9] розглянуто вплив макрогальванічних елементів, які утворюються між віддаленими на значну відстань анодами та катодами на швидкість корозії трубопроводу. Встановлено, що збільшення відстані між катодом та анодом інтенсифікує корозійний елемент за рахунок збільшення катодної площі на один анод.

Протяжність макрогальванічних пар на трубопровідних елементах може бути різною. Вона залежить від навколишніх умов, омичного опору ґрунту та інших факторів. В процесі зволоження ґрунту значно полегшується анодний процес і зменшується омичний опір системи. Підсихання ґрунту впливає на омичний опір ґрунту та анодну поляризованість сталі. Тому в процесі зволоження та підсихання струм макрогальванопари змінюється.

Внаслідок різноманітних умов, в яких експлуатуються нафтопроводи, виникають труднощі врахування врівноважувачих струмів при роботі макрогальванічних пар при корозійних процесах на трубопроводах. Тому для розрахунку доцільно приймати тільки чисельні наближені методи, наприклад, викладені у [10] при розрахунку макрогальванічних елементів на підземних трубопроводах.

Попри наявність значної кількості досліджень у сфері корозійного зношення трубопроводів, питання впливу макрога-

льванічних елементів за умов змінного стану ґрунту (зволоження, підсихання) залишалося недостатньо вивченим. Зокрема, не було запропоновано ефективних чисельних моделей, здатних адекватно враховувати динаміку омичного опору та анодної поляризованості сталі в реальних умовах експлуатації.

Ця стаття присвячена саме вдосконаленню підходів до моделювання корозійних процесів з урахуванням змінних фізико-хімічних характеристик ґрунтового середовища, що дозволяє точніше визначати швидкість зношення та прогнозувати залишковий ресурс трубопроводу.

Основна частина

У роботі умовно розділено нафтопровід по довжині на m ділянок, у межах яких прийнято постійні параметри, що визначають кінетику корозійних процесів. Кожному відрізку нафтопроводу відповідає власна швидкість та потенціал корозії та власна поляризаційна діаграма. Між цими ділянками виникають врівноважувальні струми, які замикаються по ґрунту, що оточує нафтопровід. Струм I_i , який припадає на відрізок трубопроводу з i -м номером, можна розглядати як зовнішній поляризуючий струм, який змінює швидкість корозії нафтопроводу.

Потенціал U_i відрізка з номером i визначається як різниця електричного потенціалу між металом трубопроводу та нескінченно віддаленою точкою

$$U_i = \phi_{ci} + \Delta\phi_i + I(R_{pi} + \tau_{ii}) + \sum_{k=1}^{i-1} (\tau_{ki} + \eta_{ki}) I_k + \sum_{k=i+1}^m (\tau_{ki} + \eta_{ki}) \cdot I \quad (1)$$

де m – число ділянок;

I_i, I_k – струми, що припадають на i -у та k -у ділянку;

ϕ_{ci} – потенціал корозії відрізка з номером i ;

$\Delta\phi_i = \frac{I_i R_{ni}}{S}$ – зміна потенціалу корозії

під дією поляризуючого струму;

R_{ni} – питома поляризованість металу, яка залежить від поляризуючого струму j ;

R_{pi} – опір розтіканню струму;

η_{ki}, τ_{ki} – функції впливу, чисельно рівні потенціалу, який виникає на відрізка з

номером i під дією одиничного струму, і відповідно стікаючого з відрізка k та його дзеркального відображення відносно поперхні трубопроводу.

Оскільки струм I_i гальванічного походження, то можна записати ще одне рівняння:

$$\sum_{i=1}^m I_i = 0 \quad (2)$$

Враховуючи, що питомий електричний опір трубопроводу значно менший за навколишній ґрунт, можна також записати, що

$$U_i = U = const. \quad (3)$$

Рівняння (1) та (2) утворюють систему з $2m$ нелінійних алгебраїчних рівнянь відносно невідомих U_i та I_i . Вона може бути зведена до системи з $(m+1)$ -го рівняння відносно U та I :

$$U = \phi_{ci} + I_i \left(R_{pi} + \tau_{ii} + \frac{R_{ni}}{S_i} \right) + \sum_{k=1}^{i-1} (\tau_{ki} + \eta_{ki}) I_k + \sum_{k=i+1}^m (\tau_{ki} + \eta_{ki}) I_k$$

$$\sum_{i=1}^m I_i = 0 \quad (i = 1, 2, 3, \dots, m). \quad (4)$$

Нелінійність системи обумовлена нелінійністю залежності питомої поляризованості R_{ni} від щільності поляризуючого струму j . Однак для кожного i -го відрізка R_{ni} можуть бути розраховані й табульовані.

Рішення системи (4) може бути виконане звичайним чисельним методом. Вже із задовільною точністю результати можуть бути отримані завдяки застосуванню простого ітераційного методу.

З фізичного змісту задачі виходить, що завжди

$$I_i \left(R_{pi} + \tau_{ii} + \frac{R_{ni}}{S_i} \right) > \sum_{k=1}^{i-1} (\tau_{ki} + \eta_{ki}) I_k + \sum_{k=i+1}^m (\tau_{ki} + \eta_{ki}) I_k \quad (5)$$

Тому перше наближення шуканих значень струмів I_i знаходимо рішенням системи

$$\begin{cases} U = \phi_{ci} + I_i \left(R_{pi} + \tau_{ii} + \frac{R_{ni}^0}{S} \right); \\ \sum_{i=1}^m I_i = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Тоді

$$I_i = \frac{S_i}{S_i(R_{pi} + \tau_{ii}) + R_{ni}^0} \cdot \frac{\sum_{i=1}^m \frac{\varphi_{ci} \cdot S_i}{S_i(R_{pi} + \tau_{ii}) + R_{ni}^0}}{\sum_{i=1}^m \frac{S_i}{S_i(R_{pi} + \tau_{ii}) + R_{ni}^0}}, \quad (7)$$

де R_{ni}^0 – значення питомих поляризованих за відсутності струму.

Отже, адекватне чисельне моделювання макрогальванічних процесів забезпечує можливість оцінки розподілу корозійних струмів уздовж трубопроводу, що критично важливо для прогнозування зношення та оптимізації захисних заходів. Запропонована модель дає змогу прогнозувати швидкість корозії на окремих ділянках трубопроводу, що дозволяє оцінити залишковий ресурс металу та планувати своєчасне обслуговування або заміну аварійно небезпечних відрізків.

Висновки

Результати дослідження мають практичне значення для вдосконалення систем катодного захисту трубопроводів, оскільки дозволяють точніше оцінювати розподіл корозійних струмів уздовж їхньої довжини з урахуванням змін навколишніх умов, зокрема вологості ґрунту та його омичного опору. Це дозволяє прогнозувати швидкість корозії на окремих ділянках, планувати технічне обслуговування і ремонт, а також оптимізувати розміщення захисного обладнання. Крім того, математична модель і чисельні методи, що застосовуються у дослідженні, можуть бути основою для створення інженерного програмного забезпечення або використані як аналітична база для розробки сучасних нормативних документів з оцінки технічного стану підземних трубопроводів.

References

1. Rohozniuk, V.V., Huzhov, Yu. P. & Kuzmenko, Yu. O. (2000). Technical operation of underground corrosion protection systems for main oil pipelines. *Techdiagaz*, 3–5.

2. Stepova, O. V. (2018). Taking into account corrosion processes of steel oil pipelines in order to improve environmental safety. *Environmental Sciences: Scientific and Practical Journal*, Т. 2, 15–21.

3. Stepova, O., Parashchiienko, I. & Lartseva, I. (2018). Calculation of steel pipeline corrosion depth at the work of galvanic corrosion element operating. *International Journal of Engineering & Technology*, 7, 3.2, 431–435

4. Stepova, O. & Parashchiienko, I. (2017). Modeling of the corrosion process in steel oil pipelines in order to improve environmental safety. *Eastern-european journal of enterprise technologies, industrial and technology systems*, 2, 15–20.

5. Poberezhnyi, L. Ya. (2008). Patterns of corrosion-mechanical degradation of pipelines in difficult operating conditions: *Abstract for the degree of Doctor of Technical Sciences*, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 34.

6. He, L., Wang, Y., Zhang, Q., Li, X., Xu, Y., & Huang, Y. (2023). *Electrochemical study on the macro-cell corrosion of pipeline steel partially covered by different kinds of mineral deposits*.

<https://doi.org/10.1021/acsomega.3c06189>

7. Lyu, F., Zhou, X., Ding, Z., Zhang, S., Zou, G., Wang, G., Wang, X., Qiao, X., Xu, J., & Song, D. (2024). *Research on the macro-cell corrosion behavior of alloyed corrosion-resistant steel for a transmission line steel structure under a chloride corrosion environment*. *Metals*. 14(8), 879.

<https://doi.org/10.3390/met14080879>

8. Lliso-Ferrando, J. R., Climent, A., Laurens, S., & Castel, A. (2010). *Influence of steel-concrete interface condition on galvanic corrosion currents in carbonated concrete*.

Corrosion Science, 2010, 52(9), 2878–2890.

<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.04.039>

9. Elsener, B., Jaggi, S., & Bohni, H. (2001). *Macrocell corrosion of steel in concrete: Experiments and numerical modelling*, Associazione Italiana Metallurgia, EUROCORR.

10. Metcalfe, G. I. (1953). *Journal of the Institute of Metals*, 81 (pt. 6), 269–278.

ISSN 0365-8392

DOI: 10.33868/0365-8392-2026-1-286-20-23

Дата першого надходження статті: 14.01.2026

Дата прийняття до друку: 15.03.2026

Дата публікації: 31.03.2026

