

## РОЗРАХУНОК ШВИДКОСТІ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОЇ КОРОЗІЇ ПІД ЧАС РОБОТИ ПОВЗДОВЖНІХ МАКРОГАЛЬВАНІЧНИХ ПАР НА ДІЛЯНЦІ НАФТОПРОВОДУ

Степова О.В.

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка  
пр. Першотравневий 24, 36011, м. Полтава  
[alenastepovaja@gmail.com](mailto:alenastepovaja@gmail.com)

Розглянуто фактори, що впливають на екологічну безпеку експлуатації нафтопроводів. Розв'язана задача розрахунку швидкості електрохімічної корозії трубопроводу під час роботи повздовжніх макрогальванічних пар на ділянці нафтопроводу. Перевагою даної моделі є можливість прогнозування розвитку корозії сталі за часом, що є важливим для визначення залишкового ресурсу трубопроводу. *Ключові слова:* сталевий нафтопровід, електрохімічна корозія, гальванічний елемент, модель корозії, швидкість корозії, екологічна безпека.

**Расчет скорости электрохимической коррозии при работе продольных макрогальванических пар на участке нефтепровода.** Степова Е.В. Рассмотрены факторы, влияющие на экологическую безопасность эксплуатации нефтепроводов. Решена задача расчета скорости электрохимической коррозии трубопровода при работе продольных макрогальванических пар на участке нефтепровода. Преимуществом данной модели является возможность прогнозирования развития коррозии стали по времени, что является важным при определении остаточного ресурса трубопровода. *Ключевые слова:* стальной нефтепровод, электрохимическая коррозия, гальванический элемент, модель коррозии, скорость коррозии, экологическая безопасность.

**Calculation of the rate of electrochemical corrosion during the operation of longitudinal macro galvanic pairs in the pipeline section.** Stepova O. The factors influencing ecological safety of exploitation of oil pipelines are considered. The problem of modeling the electrochemical corrosion of a pipeline with the work of longitudinal macrogalvanic pairs is solved. The advantage of this model is the ability to predict the development of steel corrosion over time, which is important in determining the residual life of the pipeline. *Key words:* steel oil pipeline, electrochemical corrosion, galvanic cell, corrosion model, corrosion rate, environmental safety.

**Постановка проблеми.** Серед основних екологічних проблем, пов'язаних із функціонуванням нафтогазової галузі, автори [1] виділяють транспортування нафти й газу та вирішення проблеми екологічної безпеки під час експлуатаційних робіт. Цей напрям ґрунтується на недопущенні екологічних аварій і катастроф, пов'язаних з експлуатацією трубопроводного транспорту. Аналіз причин ушкоджень нафтопроводів указує на те, що переважною причиною виходу їх з ладу є процес корозії сталеві труби внаслідок вільного доступу активуючих електродитів – технологічних розчинів солей, кислот, лугів та ін. Такі конструкції потребують особливої уваги та періодичного моніторингу корозійного стану їх зовнішньої поверхні. Окремі методи оцінки корозійного стану нафтопроводів побудовані на врахуванні процесів корозії сталі, які представлені емпіричними формулами, не пов'язуються з наявністю пошкоджень в ізоляційних покриттях, наявних електродитів тощо. Коректні ж оцінки корозійного стану нафтопроводів можливо отримати тільки на базі вивчення самого процесу корозії в даних умовах та його впливу на опір конструкції.

**Актуальність дослідження.** Перші збудовані нафтопроводи працюють більше 48 років [2; 3],

середній термін їх експлуатації становить понад 35 років. Термін експлуатації системи сталевих нафтопроводів України у багатьох випадках наближається до планового. Виявлені численні корозійні пошкодження зовнішніх і внутрішніх поверхонь труб загострюють проблему подальшої надійної та екологічно безпечної експлуатації. Зі збільшенням термінів їх експлуатації все актуальнішою стає проблема ефективної та безперервної роботи трубопроводного транспорту, яка забезпечується організацією періодичної технічної діагностики стану елементів трубопроводів та ремонту в місцях виявлених недопустимих дефектів.

**Зв'язок авторського доробку з важливими науковими та практичними завданнями.** Тема відповідає актуальним напрямкам науково-технічної політики України в галузі дослідження технічного стану будівель і споруд, що експлуатуються, які висвітлені в Постанові Кабінету Міністрів України № 409 від 5 травня 1997 р. «Про забезпечення надійності і безпечної експлуатації будівель, споруд та інженерних мереж» та в Рішенні Міжвідомчої комісії з питань науково-технологічної безпеки при Раді національної безпеки та оборони України від 14 лютого 2002 р. «Про технічний стан і залишковий ресурс

конструкцій та споруд основних галузей господарства України». Дослідження виконані в межах держбюджетної науково-дослідної роботи Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка: «Ефективні конструктивно-технологічні рішення об'єктів транспортування та зберігання нафти і нафтопродуктів у складних інженерно-геологічних умовах».

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Питанням безпечної експлуатації нафтопроводів та їх екологічної безпеки присвячено праці багатьох учених. Аспекти електрохімічної корозії та особливості ґрунтової корозії, корозійні умови в різних регіонах України досліджено такими вченими, як В.В. Рогозник, Ю.П. Гужов, Ю.О. Кузьменко [4]. Моделюванню залежностей корозії металу від факторів навколишнього середовища та прогнозуванню довговічності трубопроводів в умовах корозійних впливів велику увагу приділено в наших роботах [5–8]. Однією з перших моделей, які описують руйнування металу під впливом навколишнього агресивного середовища, є закони Фарадея. Існують й інші математичні моделі руйнування металу трубопроводів під дією оточуючого середовища інших авторів і вчених, але всі вони є в чомусь подібними і схожими. Це виявляється в тому, що в залежності моделей входять багато різних поправкових коефіцієнтів, які є справедливими лише для трубопроводів, котрі не зазнають локального агресивного впливу. Тож, наведені моделі не дають змогу з достатньою точністю описати процеси електрохімічної корозії нафтопроводів.

Чисельні дослідження щодо поведінки сталі за електрохімічної корозії були проведені закордонними вченими [9; 10], але під час досліджень не враховано вплив локальних корозійних пошкоджень та умов експлуатації конструкцій.

Незважаючи на те, що цій проблемі присвячені численні дослідження вітчизняних і закордонних авторів, у цей час вона ще повністю не вирішена, й багато питань залишаються відкритими. Часті розриви трубопроводів вимагають пошуку нових технічних рішень, спрямованих на забезпечення їхньої безпечної експлуатації, підвищення довговічності й стабільності функціонування. Тому проблема оцінки корозійного зносу труби, забезпечення безпечної експлуатації й підвищення довговічності трубопроводів, безсумнівно, залишається актуальною й своєчасною.

**Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.** У процесі проектування та експлуатації нафтопроводів недостатньо враховується їхній вплив на довкілля й оцінюється екологічна безпека експлуатації нафтопроводів. Аналіз причин відмов трубопроводів показує, що більше 60% усіх відмов відбулися з причин корозії металу труб.

**Метою роботи** є розроблення залежностей для розрахунку універсальної характеристики електрохі-

мічної корозії (електрохімічного струму) підземного сталевих нафтопроводу під час роботи повздовжніх макрогальванічних пар.

**Методологічне або загальнонаукове значення.** Результати даної наукової роботи в комплексі з іншими дослідженнями дадуть змогу визначити потенційні корозійно-небезпечні ділянки місцевості для підземних сталевих трубопроводів, дозволять попередити виникнення аварійних ситуацій та негативних впливів на довкілля шляхом вчасного вжиття необхідних заходів.

**Виклад основного матеріалу.** Л.Я. Цикерманом [11] 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 трубовідних елементах може бути різною. Вона залежить від навколишніх умов, омичного опору ґрунту та ін. У 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.

Усереднене значення матеріальних втрат на аноді може бути розраховано за відомою залежністю:

$$M = \frac{1}{F} \cdot \frac{A}{n} \cdot I \cdot t, \quad (1)$$

де  $M$  – маса металу, що виділилася;  $A$  – атомна вага металу;  $n$  – валентність металу;  $I$  – сила струму;  $t$  – час протікання струму.

Доведено, що середньодобова сила струму збільшується з ростом частоти зволоження і практично співпадає з глибиною ураження трубопроводу.

Якщо середню глибину ураження на трубопроводі позначити через  $\delta$ , а довжину ураженої ділянки через  $l$ , то кількість розчиненого металу можна визначити за формулою:  $M = \pi d \delta \cdot l \rho$

або

$$\frac{1}{F} \cdot \frac{A}{n} \cdot I \cdot t = \pi d \delta \cdot l \rho, \quad (2)$$

де  $d$  – діаметр трубопроводу;  $\rho$  – щільність металу.

Звідси

$$\delta = \frac{A \cdot I t}{F n \cdot \pi d \cdot l \rho}, \quad (3)$$

Внаслідок різноманітних умов, у яких експлуатуються трубопроводи, виникають труднощі врахування врівноважувачих струмів під час роботи макрогальванічних пар у разі корозійних процесів на трубопроводах. Тому для розрахунку можна приймати тільки чисельні наближені методи, наприклад, викладені у [Metcalf G. I. – Journal of the Institute of Metals, 1953, v. 81. pt. 6, p. 269–278], під час розрахунку макрогальванічних елементів на підземних трубопроводах.

Розіб'ємо умовно нафтопровід по довжині на  $m$  ділянок, у межах яких прийемо постійні параметри, що визначають кінетику корозійних процесів. Кожному відрізку нафтопроводу відповідає своя швидкість корозії та потенціал корозії, своя поляризаційна діаграма. Між цими ділянками виникають урівноважуючі струми, які замикаються по оточуючому нафтопроводу ґрунту. Струм  $I_i$ , який припадає на відрізок трубопроводу з  $i$ -м номером, можна розглядати як зовнішній поляризуючий струм, що змінює швидкість корозії трубопроводу.

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

$$U_i = \varphi_{ci} + \Delta\varphi_i + I(R_{pi} + \tau_{ii}) + \sum_{k=1}^{i-1} (\tau_{ki} + \eta_{ki}) \cdot I_k + \sum_{k=i+1}^m (\tau_{ki} + \eta_{ki}) \cdot I, \quad (4)$$

де  $m$  – число ділянок;  $I_i, I_k$  – струми, припадаючі на  $i$ -у та  $k$ -у ділянку;  $\varphi_{ci}$  – потенціал корозії відрізка з номером  $i$ ;  $\Delta\varphi_i = \frac{I_i R_{ni}}{S}$  – зміна потенціалу корозії

під дією поляризуючого струму;  $R_{ni}$  – питома поляризуємість металу, яка залежить від поляризуючого струму  $j_i$ ;  $R_{pi}$  – опір розтіканню струму;  $\eta_{ki}, \tau_{ki}$  – функції впливу, чисельно рівні потенціалу, який виникає на відрізку з номером  $i$  під дією одиничного струму, відповідно стікаючого з відрізка  $k$  та його дзеркального відображення відносно поверхні трубопроводу.

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

$$\sum_{i=1}^m I_i = 0, \quad (5)$$

Враховуючи, що питомий електричний опір трубопроводу значно менший від оточуючого ґрунту, можна також записати, що

$$U_i = U = const. \quad (6)$$

Рівняння (4) та (5) 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  $I$ :

$$U = \varphi_{ci} + I_i \left( R_{pi} + \tau_{ii} + \frac{R_{ni}}{S_i} \right) + \sum_{k=1}^{i-1} (\tau_{ki} + \eta_{ki}) I_k + \sum_{k=i+1}^m (\tau_{ki} + \eta_{ki}) I, \quad (7)$$

Нелінійність системи зумовлена нелінійністю залежності питомої поляризуємість  $R_{ni}$  від щільності поляризуючого струму  $j_i$ . Однак для кожного  $i$ -го відрізка  $R_{ni}$  можуть бути обраховані й табульовані.

Рішення системи (7) може бути здійснене звичайним чисельним методом. Уже із задовільною точністю результати можуть бути отримані в разі застосування наступного простого ітераційного методу.

З фізичного змісту задачі виходить, що завжди

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

Тому перше наближення значень струмів  $I_i$  знаходимо рішенням системи

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

Тоді

$$I_i = \frac{S_i}{S_i (R_{pi} + \tau_{ii}) + R_{ni}^0} \cdot \frac{\varphi_{ci} \cdot S_i}{\sum_{i=1}^m S_i (R_{pi} + \tau_{ii}) + R_{ni}^0} \cdot \frac{S_i}{\sum_{i=1}^m S_i (R_{pi} + \tau_{ii}) + R_{ni}^0}, \quad (8)$$

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

Тоді швидкість електрохімічної корозії різних ділянок трубопроводу можна записати формулою:

$$i_{kop} = \frac{1,91 \cdot 10^{-4} \cdot C_n D (a^2 - 1)}{R(1 - a^2 - 2a \cdot \cos \Theta) \cdot \ln a} + \frac{I_i}{S_i}. \quad (9)$$

**Перспективи використання результатів дослідження.** Перевагою отриманої залежності є можливість оцінки корозійного стану ділянки нафтопроводу під час роботи повздовжніх макрогальванічних пар, передбачення та прогнозування розвитку корозійних процесів на поверхні металу нафтопроводу.

Досліджуючи динаміку втрати товщини стінки трубопроводу, на ділянці планується розробити методіку оцінки залишкового ресурсу ділянок трубопроводу за несучою здатністю та придатністю до подальшої експлуатації. Оцінка втрат товщини стінок трубопроводу дає можливість раціонально спланувати ремонтні роботи, прогнозувати реальні строки роботи конструкції, переглянути режим експлуатації.

### Література

1. Побережний Л.Я. та ін. Підвищення рівня екологічної безпеки трубопровідних мереж нафтогазового комплексу України. *Науково-технічний журнал «Техногенно-екологічна безпека»*. 2017. № 1. С. 24–31.
2. Поляков С. та ін. Електрохімічний моніторинг магістральних трубопроводів на корозійно-небезпечних ділянках. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2008. Спец. вип. № 7. Т. 2. С. 761–766.
3. Ждек А.Я., Грудз В.Я. Визначення залишкового ресурсу тривало експлуатованих нафтопроводів із врахуванням наявних корозійних дефектів та умов експлуатації. *Науковий вісник: ІФНТУНГ*. 2012. № 2 (32) С. 58–66. URL: <http://nv.nung.edu.ua/sites/nv.nung.edu.ua/files/journals/032/12zaydue.pdf>.

4. Рогознюк В.В. та ін. Технічна експлуатація систем захисту від підземної корозії магістральних нафтопроводів. Київ : Техдіагаз, 2000. С. 3–5.
5. Степова О.В. Врахування корозійних процесів сталевих нафтопроводів з метою підвищення екологічної безпеки. *Екологічні науки: науково-практичний журнал* ; головний редактор О.І. Бондар. Київ : ДЕА, 2018. № 1 (20). Т. 2. С. 15–21.
6. Stepova O., Parashchiienko I., Lartseva I. Calculation of steel pipeline corrosion depth at the work of galvanic corrosion element operating. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol. 7. № 3.2. P. 431–435. Міжнародна наукометрична база Scopus. DOI: 10.14419 / ijet.v7i3.2.14566. URL: <http://www.sciencepubco.com/index.php/ijet/article/view/14566/5916>.
7. Stepova O., Parashchiienko I. 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*. 2017. Vol 2. № 1 (86). P. 15–20. URL: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/96425>.
8. Побережний Л.Я. Закономірності корозійно-механічної деградації трубопроводів у складних умовах експлуатації : автореф. дис. ... докт. техн. наук. Івано-Франківськ : Івано-Франківський націон. техн. ун-т нафти і газу. 2008. 34 с.
9. Xue H.B., Cheng Y.F. Electrochemical corrosion behavior of X80 pipeline steel in a near-neutral pH solution. *Materials and corrosion*. 2010. Vol. 61. Issue 9. P. 756–761.
10. Yang Yan, Wang Shuli, Chuang Wen. Experimental Study on Alternating Current Corrosion of Pipeline Steel in Alkaline Environment. *International Journal of Electrochemical science: Int. J. Electrochem. Sci.* 2016. Vol 11. P. 7150–7162.
11. Цикерман Л.Я. Диагностика коррозии трубопроводов с применением ЭВМ. Москва, Недра. 1977. 103 с.