

Розрахунок долі пошкоджень поверхні протикорозійного покриття магістральних трубопроводів

В. В. Лукович, В. В. Картузов

Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ, Україна

Побудовано математичну модель розрахунку долі пошкоджень поверхні протикорозійного покриття, густини струму в цих пошкодженнях, величин поляризаційного потенціалу та поляризаційного опору. Для знаходження даних величин у моделі використовуються результати електрометричних вимірювань на трасі магістрального трубопроводу та параметри поляризаційної кривої.

Ключові слова: трубопровід, поляризаційний потенціал, поляризаційний опір.

Одним з основних параметрів електрохімічного захисту магістральних трубопроводів є перехідний опір протикорозійного покриття. Віднесений до площі всієї зовнішньої поверхні трубопроводу цей параметр, скоріш усього, служить критерієм якості покриття, ніж мірою його опору. Питомий опір покриття в залежності від матеріалу, з якого воно виготовлене, за оцінками фахівців вимірюється від сотень кОм до десятків мОм на метр квадратний, в той час як величина перехідного опору в залежності від площі та кількості пошкоджень змінюється від десятків (навіть одиниць) Ом, якщо покриття дуже неякісне, до десятків кОм на метр квадратний, якщо воно хороше. Отже, в режимі діючої системи електрохімічного захисту струм натікає на трубу не через суцільне покриття, а через тріщини, дефекти та інші види пошкоджень. Та й старіння покриття відбувається в основному за рахунок утворення в ньому нових тріщин. Тому доцільніше проводити розрахунки з урахуванням параметрів, віднесених не до всієї площі поверхні труби, а лише до її частини, через яку відбувається обмін струмом між трубою та середовищем. Це також деяка середня величина, що виражена відношенням площі пошкоджень на даному відрізку труби до всієї площі поверхні цього відрізка. Для спрощення моделі, як і у випадку задачі розрахунку величини перехідного опору, розглянемо осесиметричну задачу.

Виберемо систему координат $Oxyz$ так, щоб площина xOy лежала на поверхні землі, яку вважатимемо плоскою. Площина xOz проходить через вісь труби, а yOz – через одне із заземлень, які приймемо за точкові джерела струму. Розмістимо катодні перетворювачі із заземленнями вздовж труби на відстані $2L$ один від одного. З урахуванням симетрії потенціал U у довільній точці шару ґрунту $[-L, L]$ на зовнішній поверхні труби задовольняє рівнянню [1]

$$U = \frac{\rho}{2\pi} I_a \sum_{n=-\infty}^{\infty} [(x - x_a + 2nL)^2 + (y - y_a)^2]^{-1/2} -$$

$$-\frac{\rho}{4\pi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_{-L}^L \varepsilon(\xi) J(\xi) \sum_{l=0}^1 [(x - \xi + 2nL)^2 + y^2 + (z - (-1)^l h)^2]^{-1/2} d\xi. \quad (1)$$

Обмежившись в (1) значеннями $n = -1, 0, 1$, із достатньою для практики точністю отримаємо:

$$U = \frac{\rho}{2\pi} I_a \sum_{n=-1}^1 (x - x_a + 2nL)^2 + (y - y_a)^2]^{-1/2} - \\ - \frac{\rho}{4\pi} \sum_{n=-1}^1 \int_{-L}^L \varepsilon(\xi) J(\xi) \sum_{l=0}^1 [(x - \xi + 2nL)^2 + y^2 + (z - (-1)^l h)^2]^{-1/2} d\xi, \quad (2)$$

де ρ – величина питомого опору ґрунту; I_a – величина струму заземлення, координати якого $x_a, y_f, z_a = 0$ (глибиною розміщення аноду нехтуємо); $J(x)$ – густина струму трубопроводу, координати осі якого $x = \xi, y = 0, z = h$. Зауважимо, що вирази (1) і (2) відрізняються від аналогічних їм в роботі [1] лише множником $\varepsilon(x)$, яким виділяється з інтеграла від $-L$ до L лише та доля поверхні труби, яка має безпосередній контакт із навколишнім середовищем.

На зовнішній поверхні труби (на межі між трубою та навколишнім середовищем) вираз (2) запишемо наступним чином:

$$U_a = \frac{\rho}{2\pi} I_a \sum_{n=-1}^1 [(x - x_a + 2nL)^2 + y_a^2]^{-1/2} - \\ - \frac{\rho}{4\pi} \sum_{n=-1}^1 \int_{-L}^L \varepsilon(\xi) J(\xi) \sum_{l=0}^1 [(x - \xi + 2nL)^2 + W_l^2]^{-1/2} d\xi, \quad (3)$$

на поверхні ґрунту над трубопроводом ($y = 0, z = 0$) –

$$U_n = \frac{\rho}{2\pi} I_a \sum_{n=-1}^1 [(x - x_a + 2nL)^2 + y_a^2]^{-1/2} - \\ - \frac{\rho}{2\pi} \sum_{n=-1}^1 \int_{-L}^L \varepsilon(\xi) J(\xi) [(x - \xi + 2nL)^2 + h^2]^{-1/2} d\xi, \quad (4)$$

де

$$W_l = \begin{cases} a, & l = 0, \\ 2h, & l = 1; \end{cases}$$

a – радіус труби.

На поверхні труби потенціал U_p визначається з рівняння [1]

$$U_p = U_{p0} + f(x, \xi), \tag{5}$$

де U_{p0} – потенціал труби в точці $x = 0$.

Функцію $f(x, \xi)$ знаходимо зі співвідношення

$$f(x, \xi) = \begin{cases} -\rho_p x \int_{-L}^x \varepsilon(\xi) J(\xi) d\xi - \rho_p \int_0^x \xi \varepsilon(\xi) J(\xi) d\xi, & x < 0; \\ \rho_p \int_0^x \xi \varepsilon(\xi) J(\xi) d\xi + \rho_p x \int_x^L \varepsilon(\xi) J(\xi) d\xi, & x \geq 0. \end{cases}$$

На межі між поверхнею труби та електропровідним середовищем [1] має місце співвідношення

$$U_a - U_p + \varphi_{st} = R_p J, \tag{6}$$

де φ_{st} – стаціонарний потенціал металу; R_p – опір на цій межі. Зауважимо, що з урахуванням долі пошкоджень протикорозійного покриття величина J в (6) чисельно дорівнює густині струму саме в цих пошкодженнях. Тому залежність між $U_p - U_a$ та J знаходимо за даними поляризаційної кривої (рис. 1) [2]. Видно, що з наближенням $-F_{pol}$ до 0,55 В величина J наближається до нуля, тобто $U_p - U_a$ наближається до φ_{st} . Позначимо $U_a - U_p$ через $-F_{pol}$, у результаті чого з виразу (6) отримаємо

$$R_p = \frac{-F_{pol} + \varphi_{st}}{J}. \tag{7}$$

Зведемо рівняння (3), (5), (6) до одного. Для цього від (3) віднімемо вираз (5) і замість різниці $U_a - U_p$ підставимо її значення з (6). У результаті отримаємо

$$\begin{aligned} R_p J + \frac{\rho}{4\pi} \sum_{n=-1}^1 \int_{-L}^L \varepsilon(\xi) J(\xi) \sum_{l=0}^1 [(x - \xi + 2nL)^2 + W_l^2]^{-1/2} d\xi + f(x, \xi) + U_{p0} = \\ = \frac{\rho}{2\pi} I_a \sum_{n=-1}^1 [(x - x_a + 2nL)^2 + y_a^2]^{-1/2} - \varphi_{st}. \end{aligned} \tag{8}$$

Величина $U_n - U_p$ є різницею потенціалів: поверхня ґрунту над трубопроводом – труба, яку отримують у результаті вимірювань на трасі (методом виносного електрода). Позначимо її через F :

$$F = U_n - U_p.$$

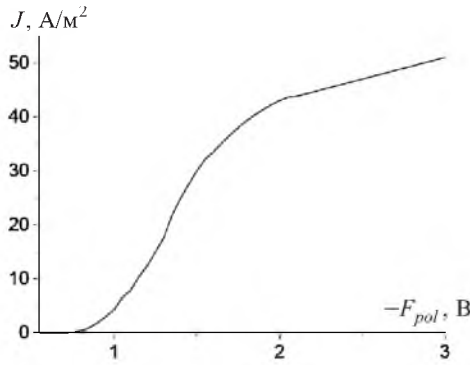


Рис. 1. Поляризаційна крива.

Віднімемо вираз (5) від (4) та замість $U_n - U_p$ підставимо F , в результаті чого отримаємо

$$\begin{aligned} \frac{\rho}{2\pi} \sum_{n=-1}^1 \int_{-L}^L \varepsilon(\xi) J(\xi) [(x - \xi + 2nL)^2 + h^2]^{-1/2} d\xi + f(x, \xi) + U_{p0} = \\ = \frac{\rho}{2\pi} I_a \sum_{n=-1}^1 [(x - x_a + 2nL)^2 + y_a^2]^{-1/2} - F. \end{aligned} \quad (9)$$

Рівнянь (7), (8) і (9) не досить для знаходження невідомих ε , J , R_p та U_{p0} . Доповнимо їх співвідношенням

$$\int_{-L}^L \varepsilon(\xi) J(\xi) d\xi = I_a, \quad (10)$$

фізична суть якого така: величина струму катодного перетворювача дорівнює сумарній величині струму, який натікає на трубу через пошкодження на ділянці $[-L, L]$.

Знайдемо спочатку розв'язок системи рівнянь (7), (8), (10) за умови, що величина ε відома. Для цього перейдемо до дискретного аналога системи. Прийнемо в дискретному аналізі рівняння (8) $R_p = 0$ (труба незаполяризована), тоді з дискретного аналога системи рівнянь (8), (10) знаходимо перше наближення величин J та U_{p0} . За допомогою величини J та даних поляризаційної кривої знаходимо $-F_{pol}$, з виразу (7) $-R_p$. Підставимо R_p в дискретний аналіз рівняння (8), в результаті чого з дискретного аналога системи рівнянь (8), (10) отримаємо наступне наближення величин J та U_{p0} . За допомогою величини J та даних поляризаційної кривої знаходимо наступне значення $-F_{pol}$, з виразу (7) $-R_p$ і т.д. Процес закінчується, якщо попереднє від наступного наближення величин J , R_p та U_{p0} відрізняється не більше ніж на δ , де δ – величина наближення, що задається. Результати проміжних ітерацій при цьому ілюструють процес поляризації.

За дискретним аналогом моделі (7), (8), (10) розроблено алгоритм і програму та проведено розрахунки поляризації відрізка трубопроводу довжиною 9 км із такими геометричними та фізичними параметрами труби і середовища, в якому вона знаходиться: діаметр труби 1020 мм; товщина стінки труби 10 мм; глибина залягання (відстань від осі труби до поверхні землі) 2 м; доля пошкоджень поверхні протикорозійного покриття 0,001; величина струму катодного перетворювача 0,2 А; відстань до анодного заземлення 300 м; величина питомого опору ґрунту 20 Ом · м. На рис. 2 показано графіки зміни густини струму в процесі поляризації. На початку поляризації вона досить велика в околі точки дренажу і досить мала на межі зони захисту. У процесі виходу на стаціонарний режим густина струму поступово зменшується в околі точки дренажу та збільшується на межі зони захисту. Поляризаційний опір, навпаки, найменший в околі точки дренажу і найбільший на межі зони захисту на початку поляризації (рис. 3). При виході на стаціонарний режим графік його поступово вирівнюється.

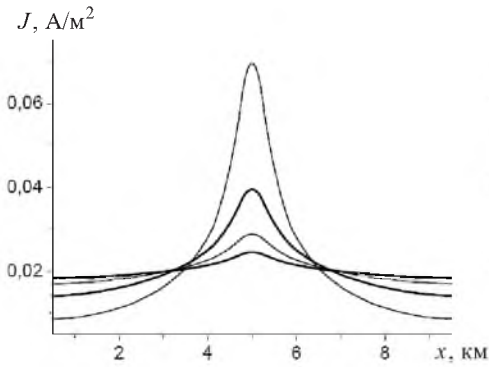


Рис. 2. Зміна густини струму в процесі поляризації.

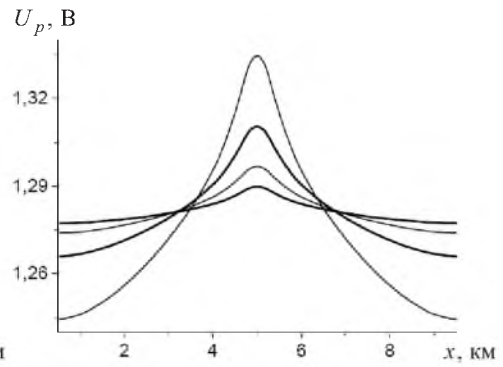


Рис. 3. Зміна поляризаційного потенціалу.

Аналогічно змінюється поляризаційний потенціал. Отже, якщо в розрахунках параметрів катодного захисту величину перехідного опору протикорозійного покриття замінити величиною долі пошкоджень цього покриття, є можливість використати в розрахунках залежність між різницею потенціалів та струмом на межі метал–електроліт за поляризаційною кривою. Завдяки такій заміні в даній роботі промодельовано процес поляризації відрізка $[-L, L]$ магістрального трубопроводу. Зауважимо, що зображені на рис. 2–4 графіки лише ілюструють характер зміни густини струму, поляризаційного потенціалу та поляризаційного опору в процесі поляризації. Для відображення процесу поляризації необхідно провести дослідження залежності величини R_p від часу поляризації.

Окрім того, відмітимо, що в запропонованій математичній моделі має значення, яку поляризаційну криву використати в розрахунках. Характеристики сталі й електроліта, за якими вона побудована, повинні бути близькими до тих, в яких знаходиться дана ділянка траси магістрального трубопроводу.

Перейдемо до розв'язку системи (7)–(10) за умови, що величина ϵ невідома. Знайдемо її також шляхом ітерацій. На першій ітерації з дискрет-

ного аналога рівнянь (9) та (10) знаходимо добуток εJ , який поділимо на F і отримаємо перше наближення ε . Якщо поділимо εJ на ε , знайдемо J , а за поляризаційною кривою: $-F_{pol}$. За допомогою цих величин із виразу (7) знайдемо перше наближення R_p . У результаті отримаємо дискретний аналог системи (8), (10) для знаходження невідомих J та U_{p0} , за якими з дискретного аналога рівняння (9) будемо мати наступне наближення величини ε . Підставимо його в дискретний аналог системи (8), (10) і отримаємо наступне наближення невідомих J та U_{p0} . За допомогою величини J з поляризаційної кривої (рис. 1) та виразу (7) знаходимо R_p і т.д. Повторюємо ітерації доти, доки попереднє значення R_p від наступного буде відрізнятися не більше ніж на δ , де δ – величина наближення, що задається.

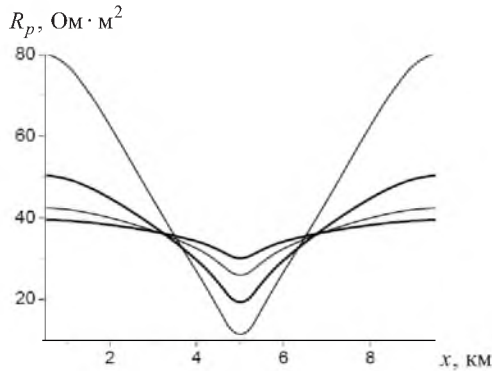


Рис. 4. Зміна поляризаційного опору в процесі поляризації.

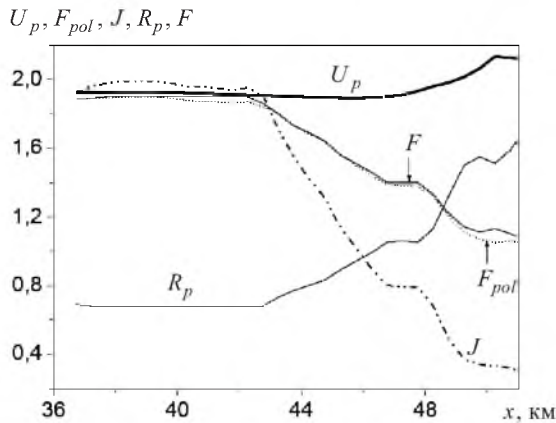


Рис. 5. Зміна величин потенціалу труби U_p , поляризаційного потенціалу F_{pol} , поляризаційного опору R_p , густини струму в місцях пошкодження протикорозійного покриття J та різниці потенціалів F труба – поверхня ґрунту на ділянці траси 36–51 км трубопроводу.

За даною методикою побудовано алгоритм та програму розрахунку величин J , U_{p0} , F_{pol} , R_p , ε . На рис. 5 показано графіки зміни величин потенціалу труби U_p , поляризаційного потенціалу F_{pol} , поляризаційного опору R_p , густини струму в місцях пошкодження протикорозійного покриття J та різниці потенціалів F труба – поверхня ґрунту на ділянці траси 36–51 км трубопроводу, який знаходиться в Середній Азії. На ділянці 36–42,5 км

величина F майже стала і складає близько 2 В. Це свідчить про те, що протикорозійне покриття на цій ділянці якісне. Значення параметрів F_{pol} та J також великі, а R_p відносно мале, потенціал U_p – практично стала величина. На ділянці 42,5–51 км величина F поступово зменшується до 1 В. Відповідно зменшуються F_{pol} та J , а R_p збільшується. Зростає за абсолютною величиною й U_p .

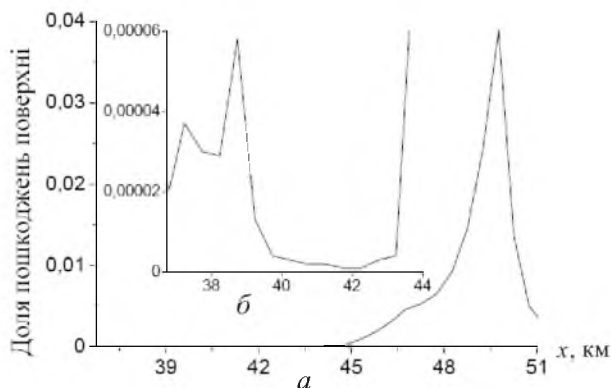


Рис. 6. Доля пошкоджень поверхні протикорозійного покриття.

На рис. 6,а показано графік зміни величини долі пошкоджень поверхні протикорозійного покриття вздовж траси, на рис. 6,б – зміна цієї величини у збільшеному масштабі. Наведені дані підтверджують висновки щодо зміни якості покриття по всій ділянці траси.

Отже, результатом розрахунку за запропонованою математичною моделлю є визначення величини долі пошкоджень протикорозійного покриття, густини струму в цих пошкодженнях, величини поляризаційного потенціалу та поляризаційного опору. Заміна в математичній моделі параметра перехідний опір протикорозійного покриття долею його (покриття) пошкоджень дозволила залучити до розрахунків реальну поляризаційну криву.

Резюме

Построена математическая модель расчета части поврежденной поверхности противокоррозионного покрытия, плотности тока в этих повреждениях, величин поляризационного потенциала и поляризационного сопротивления. Для определения данных величин в модели используются результаты электрометрических измерений на трассе магистрального трубопровода и параметры поляризационной кривой.

1. Остапенко В. Н., Ягупольская Л. Н., Лукович В. В. и др. Электрохимическая защита трубопроводов от коррозии. – Киев: Наук. думка, 1988. – 192 с.
2. Швець В. А. Фізико-хімічні властивості протекторного сплаву АЦКМ та конструкційних сталей Х70, Ст. 3: Автореф. дис. ... канд. хім. наук. – Київ, 1993. – 21 с.

Поступила 05. 01. 2009