

Розрахунок площі пошкоджень протикорозійного покриття відрізка трубопроводу за даними електрометричних вимірювань

© *В. В. Лукович¹, Ю. Г. Калькутін², 2012*

¹Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій і систем НАН України, Київ, Україна

²ЗАТ «Укрнафтогазгеофізика», Київ, Україна

Надійшла 29 березня 2011 р.

Представлено членом редколегії В. М. Шуманом

Построены математическая модель, алгоритм и программа расчета площади повреждения противокоррозионного покрытия магистрального трубопровода, поляризованного потенциала и плотности тока на поверхности повреждения по данным электрометрических измерений. По этим данным рассчитаны соответствующие параметры.

A mathematical model, an algorithm and a program are developed. They allow the computation of damage area of pipeline anti-corrosion coating, the polarization potential and the current density in a damage using electrometric measurement data. The computation of corresponding parameters from these data was carried out.

Під час проведення повних обстежень на трасі магістрального трубопроводу оператор отримує інформацію про різницю потенціалів між трубопроводом і землею поверхнею, опір ґрунту в околі споруди, її геометричні та електрофізичні характеристики. За різницею потенціалів фахівець оцінює якість протикорозійного покриття (наявність і величину пошкоджень його поверхні), приймає рішення, чи потрібно добиратись до пошкодження і проводити переізоляцію. Адже в результаті порушується структура ґрунту, яка може надалі шкідливо вплинути на захист певної ділянки траси [Фатрахманов, 2004]. Без розрахунків за даними вимірювань ці оцінки будуть досить наближеними. У публікаціях [Лукович, Лукович, 2010; Лукович, 2011] розглянуто математичні моделі електричного поля системи катодного захисту магістрального трубопроводу й подано розрахунки параметрів цього поля на відрізку, який охоплює одну чи декілька зон захисту [Лукович, Лукович, 2010] або в околі локального пошкодження [Лукович, 2011].

У статті розроблено методіку розрахунку площі пошкоджень, потенціалу й густини струму на їхній поверхні на відрізку трубопроводу між двома суміжними контрольно-вимірювальними пунктами за даними електрометричних вимірювань. Програмою, побудованою за цією методикою, можна користуватись навіть у польових умовах за наявності комп'ютера та можливості підготовки вхідних даних. За результатами розрахунків оператор зможе оперативно приймати відповідні рішення.

Перед побудовою математичної моделі поля відрізка труби, де є пошкодження, проведемо дослідження для спрощення задачі. Розглянемо поле нескінченного трубопроводу й одного точкового джерела струму. Потенціал U в довільній точці Землі задовольняє рівнянню [Остапенко и др., 1988]

$$U = \frac{\rho I}{2\pi} \left[(x-x_a)^2 + (y-y_a)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} - \frac{\rho a}{2} \int_{-\infty}^{\infty} J(\xi) \left\{ \left[(x-\xi)^2 + y^2 + (z-h)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} + \left[(x-\xi)^2 + y^2 + (z+h)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \right\} d\xi, \quad (1)$$

де ρ — питомий опір Землі; I — величина струму анодного заземлення; x, y, z — координати довільної точки Землі, задані в системі $Oxyz$ так, що площина xOy збігається із землею поверхнею, площина xOz проходить через вісь труби, яка розташована на глибині h ; $x_a, y_a, 0$ — координати анодного заземлення, яке вважаємо точковим. Густина струму $J(x)$ (розмірність А/м²) у рівнянні (1) віднесена до площі зовнішньої поверхні трубопроводу.

На поверхні ґрунту над трубопроводом потенціал U_s має вигляд

$$U_s = \frac{\rho I}{2\pi} \left[(x - x_a)^2 + y_a^2 \right]^{-\frac{1}{2}} - \rho a \int_{-\infty}^{\infty} J(\xi) \left[(x - \xi)^2 + h^2 \right]^{-\frac{1}{2}} d\xi. \quad (2)$$

Під час проведення повних обстежень на трасі оператор вимірює різницю потенціалів між точками на земній поверхні над віссю трубопроводу й на відстані 10 м від неї. В розрахункову модель включаємо й цю інформацію. На поверхні ґрунту за відстані 10 м від осі труби (з протилежного боку від точкового джерела) з рівняння (1) отримаємо

$$U_{sy} = \frac{\rho I}{2\pi} \left[(x - x_a)^2 + (10 + y_a)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} - \rho a \int_{-\infty}^{\infty} J(\xi) \left[(x - \xi)^2 + 100 + h^2 \right]^{-\frac{1}{2}} d\xi. \quad (3)$$

Потенціал U_p на поверхні протикорозійного покриття задовольняє рівнянню

$$U_p = \frac{\rho I}{2\pi} \left[(x - x_a)^2 + (y - y_a)^2 + z^2 \right]^{-\frac{1}{2}} - \frac{\rho a}{2} \int_{-\infty}^{\infty} J(\xi) \left\{ \left[(x - \xi)^2 + a^2 \right]^{-\frac{1}{2}} + \left[(x - \xi)^2 + 4h^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \right\} d\xi. \quad (4)$$

Позначимо через F_s значення різниці потенціалів земна поверхня— трубопровід, отримане вимірюванням за методом виносного електрода, а через U_T — потенціал труби (відносно нескінченно віддаленої точки Землі). Тоді матимемо

$$F_s = U_s - U_T. \quad (5)$$

Величина F_{sy} є також результатом вимірювання. Запишемо її у вигляді формули (5):

$$F_{sy} = U_{sy} - U_T. \quad (6)$$

Аналогічно

$$F_p = U_p - U_T. \quad (7)$$

Віднімемо від рівняння (3) вираз (4). З урахуванням рівностей (6) і (7) у результаті отримаємо

$$F_{sy} - F_p = \frac{\rho I}{2\pi} \left\{ \left[(x - x_a)^2 + (10 + y_a)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} - \left[(x - x_a)^2 + y_a^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \right\} + \rho a \int_{-\infty}^{\infty} J(\xi) \left\{ \frac{1}{2} \left[(x - \xi)^2 + a^2 \right]^{-\frac{1}{2}} + \left[(x - \xi)^2 + 4h^2 \right]^{-\frac{1}{2}} - \left[(x - \xi)^2 + 100 + h^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \right\} d\xi. \quad (8)$$

Віднімемо від рівняння (2) вираз (4). З урахуванням (5) і (7) у результаті маємо

$$F_s - F_p = \rho a \int_{-\infty}^{\infty} J(\xi) \left\{ \frac{1}{2} \left[(x - \xi)^2 + a^2 \right]^{-\frac{1}{2}} + \left[(x - \xi)^2 + 4h^2 \right]^{-\frac{1}{2}} - \left[(x - \xi)^2 + h^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \right\} d\xi. \quad (9)$$

Запишемо вираз

$$\int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \left[(x - \xi)^2 + h^2 \right]^{-\frac{1}{2}} - \left[(x - \xi)^2 + 100 + h^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \right\} d\xi \quad (10)$$

у вигляді суми трьох доданків

$$\int_{-\infty}^{-x_1} \left\{ \left[(x-\xi)^2 + h^2 \right]^{\frac{1}{2}} - \left[(x-\xi)^2 + 100 + h^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} d\xi,$$

$$\int_{-x_1}^{x_1} \left\{ \left[(x-\xi)^2 + h^2 \right]^{\frac{1}{2}} - \left[(x-\xi)^2 + 100 + h^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} d\xi,$$

$$\int_{x_1}^{\infty} \left\{ \left[(x-\xi)^2 + h^2 \right]^{\frac{1}{2}} - \left[(x-\xi)^2 + 100 + h^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} d\xi,$$
(11)

так, щоб змінна x знаходилась всередині відрізка $[-x_1, x_1]$.

Розглянемо останній інтеграл, замінивши в ньому верхню межу інтегрування ∞ на x_2 . Проінтегрувавши його, отримаємо

$$\ln \frac{x_2 + \sqrt{x_2^2 + h^2}}{x_1 + \sqrt{x_1^2 + h^2}} \frac{x_1 + \sqrt{x_1^2 + h^2 + 100}}{x_2 + \sqrt{x_2^2 + h^2 + 100}}.$$

Перегрупуємо множники під логарифмом і запишемо логарифм добутку у вигляді суми логарифмів

$$\ln \frac{x_1 + \sqrt{x_1^2 + h^2 + 100}}{x_1 + \sqrt{x_1^2 + h^2}} + \ln \frac{x_2 + \sqrt{x_2^2 + h^2}}{x_2 + \sqrt{x_2^2 + h^2 + 100}}.$$

Винесемо за дужки змінну x_2 в чисельнику та знаменнику другого логарифму. Тоді

$$\ln \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{h^2}{x_2^2}}}{1 + \sqrt{1 + \frac{h^2 + 100}{x_2^2}}}.$$

Останній вираз дорівнює нулю, якщо $x_2 = \infty$.

Отже, логарифм

$$\ln \frac{x_1 + \sqrt{x_1^2 + h^2 + 100}}{x_1 + \sqrt{x_1^2 + h^2}}$$

визначає похибку в результаті заміни (10) на середній інтеграл в (11). Аналогічну оцінку можна знайти для рівнянь (8) і (9). В результаті отримаємо рівняння замість (8) і (9) після заміни нескінченних верхньої і нижньої меж інтегрування на скінченні:

$$F_{sy} - F_p = \frac{\rho I}{2\pi} \left\{ \left[(x-x_a)^2 + (10+y_a)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - \left[(x-x_a)^2 + y_a^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} +$$

$$+ \rho a \int_{x-L}^{x+L} J(\xi) \left\{ \frac{1}{2} \left[(x-\xi)^2 + a^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{2} \left[(x-\xi)^2 + 4h^2 \right]^{\frac{1}{2}} - \left[(x-\xi)^2 + 100 + h^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} d\xi,$$
(12)

$$F_s - F_p = \rho a \int_{x-L_1}^{x+L_1} J(\xi) \left\{ \frac{1}{2} \left[(x-\xi)^2 + a^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{2} \left[(x-\xi)^2 + 4h^2 \right]^{\frac{1}{2}} - \right.$$

$$\left. - \left[(x-\xi)^2 + h^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} d\xi,$$
(13)

де L і L_1 — довжини відрізків, які забезпечують у рівняннях (12) і (13) потрібну точність інтегрування.

Перейдемо до основної задачі. На відрізку $[A, B]$ в точках x_{ci} ($i=1, 2, \dots, n$) задано значення F_{si} і F_{syi} , а також a, l, ρ_i, h_i . Потрібно в тих само точках знайти F_{pi} і J_i .

Замінімо рівняння (12), (13) їх дискретними аналогами. Поділимо відрізок $[A, B]$ на частини так, щоб точки x_{ci} (в яких задані F_{si} і F_{syi}) були середніми. Точки x_i ($i=2, 3, \dots, n$) побудуємо за формулою $x_i=(x_{c,i-1}+x_{ci})/2$, $x_1=2x_{c1}-x_2$, $x_{n+1}=2x_{cn}-x_n$. Оскільки межі інтегрування в (12) і (13) змінюються, виберемо кількість точок для відрізка $[x, x+L]$, яка дорівнює l , а для $[x, x+L_1]$ — l_1 . Замінімо в (12) інтеграл від $x-L$ до $x+L$ на суму інтегралів від x_i до x_{i+1} , а в кожному з них — $J(x)$ на J_i . Аналогічно в (13) інтеграл від $x-L_1$ до $x+L_1$ замінимо на суму інтегралів від x_i до x_{i+1} . В результаті маємо систему лінійних алгебричних рівнянь відносно невідомих J_i та F_{pi} :

$$\rho_i a \sum_{j=i-l}^{i+l} J_j W_{ij} + F_{pi} = F_{syi} - \frac{\rho_i l}{2\pi} \left\{ \left[(x_{ci} - x_a)^2 + (10 + y_a)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - \left[(x_{ci} - x_a)^2 + y_a^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (14)$$

$$\rho_i a \sum_{j=i-l_1}^{i+l_1} J_j W_{1ij} + F_{pi} = F_{si}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (15)$$

де

$$W_{ij} = \begin{cases} 2 \ln \frac{x_{ii} + \sqrt{x_{ii}^2 + a^2}}{a} \frac{x_{ii} + \sqrt{x_{ii}^2 + 4h_i^2}}{2h} \frac{s_i}{(x_{ii} + \sqrt{x_{ii}^2 + s_i})^2}, & i=j; \\ \ln \frac{x_{ij+1} + \sqrt{x_{ij+1}^2 + a^2}}{x_{ij} + \sqrt{x_{ij}^2 + a^2}} \frac{x_{ij+1} + \sqrt{x_{ij+1}^2 + 4h^2}}{x_{ij} + \sqrt{x_{ij}^2 + 4h^2}} - 2 \ln \frac{x_{ij+1} + \sqrt{x_{ij+1}^2 + s_i}}{x_{ij} + \sqrt{x_{ij}^2 + s_i}}, & i \neq j; \end{cases}$$

Аналогічний вираз характеризує величину W_{1ij} .

Система рівнянь (14), (15) відносно невідомих J_i та F_{pi} є повною, і за точних вхідних даних можна було б отримати розв'язок. За наближених вхідних даних розв'язок може відхилитися від точного. Тому використаємо його як перше наближення. Для уточнення розв'язку скористаємося залежністю між F_{pi} і J_{pi} за поляризаційною кривою, рівністю $J_i = \delta_i J_{pi}$, де δ_i — частка пошкоджень на відрізку $[x_i, x_{i+1}]$. Введемо $R_i = 1/\delta_i$. Тоді $J_{pi} = R_i J_i$. Поляризаційний потенціал F_{pi} , поляризаційна густина струму J_{pi} і поляризаційний опір R_{pi} задовольняють рівнянню

$$F_{pi} + j_{ст} = R_{pi} J_{pi}, \quad (16)$$

де $\phi_{ст}$ — стаціонарний потенціал металу. Виразивши у формулі (16) J_{pi} через $R_i J_i$ і підставивши в (14) і (15) замість F_{pi} його значення з (16), отримуємо нову систему відносно невідомих J_i .

Розв'язку побудованої у такий спосіб системи достатньо для визначення частки (а отже, й площі) пошкоджень. Частка пошкоджень за різних режимів роботи системи катодного захисту залишається незмінною. Величини F_{pi} і J_{pi} можуть змінюватись. Для їх знаходження доповнимо систему (14), (15) рівнянням (7), замінивши в ньому змінну U_p на її значення з виразу (4). Замінивши нескінченні межі інтегрування кінцями відрізка $[A, B]$, у результаті отримаємо

$$\begin{aligned} \frac{\rho a}{2} \int_A^B J(\xi) \left\{ \left[(x-\xi)^2 + a^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \left[(x-\xi)^2 + 4h^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} d\xi + F_p + U_T = \\ = \frac{\rho l}{2\pi} \left[(x-x_a)^2 + (y-y_a)^2 + z^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \end{aligned}$$

Замінивши F_p його значенням з рівності (16), а J_p на RJ , остаточно маємо

$$RR_p J + \frac{\rho a}{2} \int_A^B J(\xi) \left\{ \left[(x-\xi)^2 + a^2 \right]^{-\frac{1}{2}} + \left[(x-\xi)^2 + 4h^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \right\} d\xi + U_T =$$

$$= \frac{\rho I}{2\pi} \left[(x-x_a)^2 + (y-y_a)^2 + z^2 \right]^{-\frac{1}{2}} + \varphi_{ст}. \quad (17)$$

Зауважимо, що заміна меж інтегрування призводить до відхилення від точного розв'язку на кінцях відрізка. Однак воно буде відносно великим для J лише у двох-трьох кінцевих точках відрізка $[A, B]$ після переходу неперервного рівняння (17) до його дискретного аналогу. В результаті отримаємо систему $3n$ рівнянь з $n+1$ невідомим J_i і U_T .

Змінні F_{pi} , R_{pi} і J_{pi} уточнюємо за даними поляризаційної кривої, за формулою (16):

$$J_{pi} = R_i J_i.$$

Розроблено алгоритм і програму розрахунку площі пошкоджень, потенціалу й густини струму на поверхні пошкоджень. На рис. 1 зображені графіки різниці потенціалів труба — земна поверхня F_s (дані отримані вимірюванням на трасі методом виносного електрода) і різниці потенціалів труба — поверхня пошкодження F_p (поляризаційний потенціал — результат розрахунку) на різних відрізках трубопроводу з різними режимами роботи системи катодного захисту.

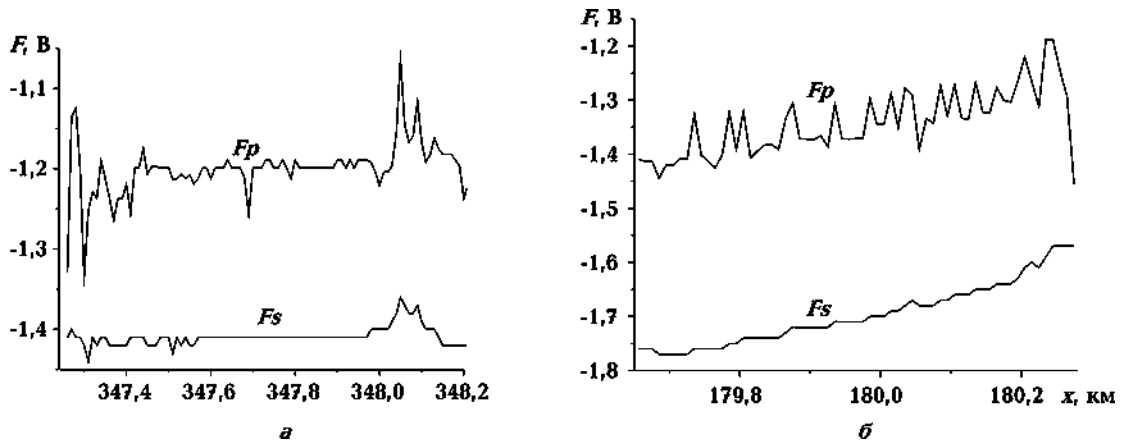


Рис. 1. Графіки зміни різниць потенціалів F_s (а) і F_p (б).

Якщо різниця потенціалів F_s змінюється вздовж відрізка труби відносно гладко, то величина F_p відхиляється в різні боки досить різко. Такі різкі відхилення пов'язані з різкою зміною площі пошкоджень (рис. 2).

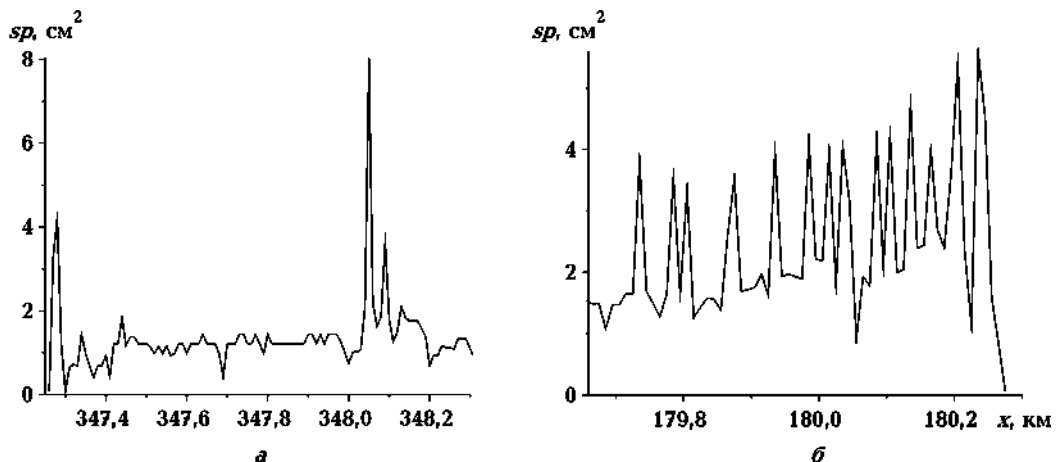


Рис. 2. Графіки зміни сумарної площі пошкоджень на відрізках труби, середина яких збігається з координатою вимірювання F_s .

Порівнявши графіки F_p і sp , неважко простежити аналогію їх зміни вздовж відрізка труби.

Сумарна площа пошкоджень протикорозійного покриття може складатися з суми менших площ пошкоджень, розміщених на певному відрізку, а може бути локальною й збігатися з координатою вимірювання величини F_s . Розроблено алгоритм і програму виділення площ пошкоджень, які перевищують певну величину, і розраховано параметри захисту за умови, що ці пошкодження локальні (див. таблицю).

Площа пошкоджень і різниця потенціалів на поверхні пошкоджень

x , км	sp , см ²	F_p , В
180,135	4,74	-1,09
180,205	5,41	-1,05
180,235	5,56	-1,02
347,280	4,21	-0,988
348,050	8,03	-0,938

За даними таблиці, два останні значення F_p близькі до мінімального захисного потенціалу. Якщо значення менші за мінімальний захисний потенціал, оператор проводить додаткові вимірювання, щоб виявити — пошкодження є локальним чи складається з кількох, розміщених на досліджуваному відрізку труби. Додаткові вимірювання допоможуть оператору прийняти рішення щодо потреби усунення пошкодження переізоляцією.

Отже, розроблені математична модель, алгоритм і програма дають можливість фахівцям, які обстежують магістральні трубопроводи, отримати додаткову інформацію про протикорозійний стан споруди.

Список літератури

Фатрахманов Ф. К., Долгунов М. Л. Пути повышения эффективности обследований магистральных газопроводов // Коррозия: материалы, защита. – 2004. — № 7. — С. 26—29.

Лукович В. В., Лукович В. В. Математична модель електричного поля системи катодного захисту магістрального трубопроводу // Геофиз. журн. — 2010. — 32, № 1. — С. 169—173.

Лукович В. В. Електричне поле в околі пошкодження протикорозійного покриття трубопроводу // Геофиз. журн. — 2011. — 33, № 5. — С. 128—133.

Остапенко В. Н., Ягупольская Л. Н., Лукович В. В., Кохановский И. Н., Егоров Е. В., Кузьменко Ю. А., Калькутин Ю. Г. Электрохимическая защита трубопроводов от коррозии. — Киев: Наук. думка, 1988. — 192 с.