

Математична модель електричного поля в зоні відшарування ізоляції від поверхні труби при катодній поляризації

© В. В. Лукович¹, В. В. Лукович², 2013

¹Інститут проблем матеріалознавства НАН України, Київ, Україна

²Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій і систем НАН України, Київ, Україна

Надійшла 27 грудня 2011 р.

Представлено членом редколегії В. М. Шуманом

Предложена математическая модель распределения потенциала и плотности тока в зоне отслоения изоляции от поверхности трубы. Представлены результаты расчетов.

Mathematical model of potential and current density distributions within delamination area of pipe insulation has been proposed. Results of calculations have been given.

У статті [Францевич и др., 1956] опубліковано результати досліджень впливу катодної поляризації на бітумну ізоляцію. Показано, що за різниці потенціалів F труба — земна поверхня, більшої (за абсолютною величиною) – 1,3 В, починається відшарування ізоляції від поверхні труби. Із збільшенням F швидкість відшарування зростає. Коли F дорівнює – 2 В, відшарування і руйнування ізоляції відбувається менш ніж через 20 діб, а в околі значних пошкоджень (з площею, яка перевищує 4 мм^2) — уже через одну добу [Францевич и др., 1956]. Це явище спостерігається також на плівковій ізоляції [Хижняков, 2009].

У публікації [Агинея, Александров, 2010] проведено дослідження критеріїв електрохімічного захисту у відшаруванні протикорозійного покриття газопроводу. На поверхні пошкодження поляризаційний потенціал найбільший і в середині зони відшарування різко зменшується до певного значення, яке надалі залишається майже сталим (рис. 1).

Аналогічне дослідження проведено в праці [Zhengfeng et al., 2002]. Однак ні в ній, ні в [Агинея, Александров, 2010] немає інформації про механізм відшарування. Не проведено вимірювання на межі відшарування. Саме там слід

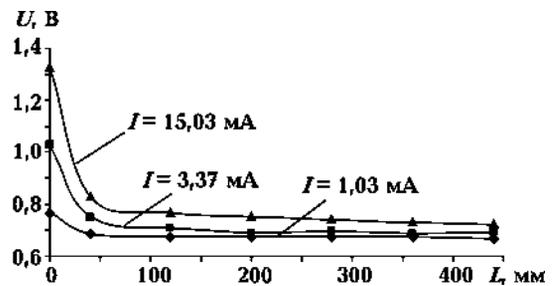


Рис. 1. Зміна поляризаційного потенціалу в зоні відшарування.

чекати різкої зміни значень потенціалу й густини струму.

В. В. Лукович [Лукович, 2011] показав, що густина струму J_p зосереджена по периметру площі пошкодження (рис. 2). Якщо ця площа велика, то всередині її величина J_p відносно мала і різко зростає за наближення до країв (рис. 2, б). Потенціал U_p на поверхні пошкодження по його периметру близький до нуля й збільшується (за абсолютною величиною) з наближенням до центру пошкодження. На малій площі пошкодження J_p змінюється порівняно гладко (рис. 2, а).

Нижче описано математичну модель розрахунку U_p і J_p за величиною U_T (потенціалом тру-

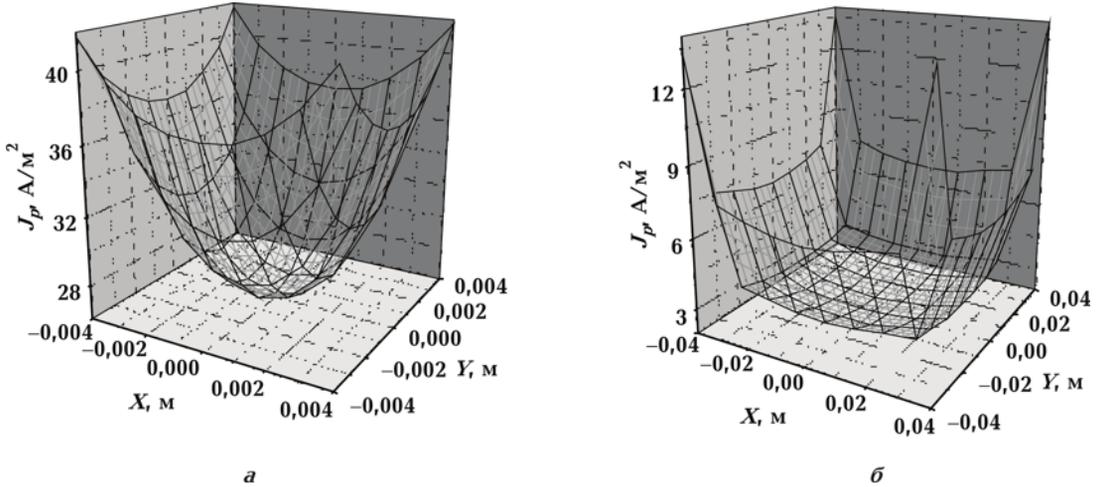


Рис. 2. Зміна густини струму на поверхні пошкодження площею: *a* — $9 \times 9 \text{ мм}^2$, $F = -2 \text{ В}$; *б* — $9 \times 9 \text{ см}^2$, $F = -3 \text{ В}$.

би) в зоні відшарування, яку поступово займає волога (для цієї зони й побудовано математичну модель).

Для спрощення розрахунків за зону відшарування взято коло, в центрі якого знаходиться пошкодження. Потенціал U_p в ній задовольняє рівнянню

$$\frac{\partial U_p}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dU_p}{dr} \right) + \rho J_p, \quad (1)$$

де ρ — питомий опір зволоженої ділянки відшарування (електроліту); J_p — густина струму, який стікає з ділянки відшарування на поверхню труби. По периметру зони відшарування U_p досягає критичного значення, за якого починається процес відшарування. За результатами досліджень, проведених І. М. Францевичем, для бітумної ізоляції $F_p = -1,3 \text{ В}$ (F_p — різниця потенціалів електроліт — поверхня труби: $F_p = U_T - U_p$). Для плівкової ізоляції він інший. В цій статті прийнято $F_p = -1,4 \text{ В}$; $U_p = U_T + 1,4 \text{ В}$. На межі між поверхнею пошкодження та зоною відшарування задамо потенціал U_{p0} . Зауважимо, що за площею пошкодження, потенціалом труби U_T , опором ґрунту та даними катодної поляризаційної кривої [Швець, 1993] величину U_{p0} за відсутності відшарування обчислюють однозначно за співвідношенням [Лукович, 2011]

$$U_{p0} = -\frac{\rho_1}{4\pi} \int_{-x_1}^{x_1} \int_{-\theta_1}^{\theta_1} J_{p0}(\xi, \theta) \left\{ [(x - \xi)^2 + \right.$$

$$\left. + 2a^2 (1 - \cos(\varphi - \theta)) \right\}^{-\frac{1}{2}} + \left[(x - \xi)^2 + a^2 (\sin \varphi - \sin \theta)^2 + (2h_a + a(\cos \theta - \cos \varphi))^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \Bigg\} d\xi a d\theta, \quad (2)$$

де $2x_1$ — сторона квадрата поверхні пошкодження; ρ_1 — питомий опір ґрунту в околі пошкодження (значення його може не збігатися із значенням ρ); a — радіус трубопроводу; h_a — відстань від земної поверхні до осі труби. Опустимо другий доданок у підінтегральному виразі (2) (за малої площі пошкодження він значно менший від першого); U_{p0} і J_{p0} у виразі (2) замінимо їх середніми значеннями, тому винесемо J_{p0} за знаки інтегрування. В результаті отримаємо

$$U_{p0} = -\frac{\rho_1 J_{p0}}{4\pi} \int_{-x_1}^{x_1} \int_{-\theta_1}^{\theta_1} \left[(x - \xi)^2 + 2a^2 (1 - \cos(-\theta)) \right]^{-\frac{1}{2}} d\xi a d\theta. \quad (3)$$

Координати x і φ виберемо в центрі квадрата. Врахувавши симетрію, замість (3) матимемо

$$U_{p0} = -\frac{\rho_1 J_{p0}}{\pi} \times$$

$$\times \int_0^{x_1} \int_0^{\theta_1} \left[\xi^2 + 2a^2 (1 - \cos \theta) \right]^{-\frac{1}{2}} d\xi a d\theta,$$

або

$$U_{p0} = -\frac{\rho_1 J_{p0}}{\pi} \times \int_0^{x_1} \int_0^{\theta_1} \left[\xi^2 + 4a^2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right]^{-\frac{1}{2}} d\xi a d\theta. \quad (4)$$

Проінтегруємо (4) по ξ :

$$U_{p0} = \frac{\rho_1 J_{p0}}{\pi} \times \int_0^{\theta_1} \ln \frac{x_1 + \sqrt{x_1^2 + 4a^2 \sin^2 \frac{\theta}{2}}}{2a \sin \frac{\theta}{2}} a d\theta. \quad (5)$$

Параметр θ_1 менший за 0,01. У цьому випадку замість $\sin \theta/2$ матимемо $\theta/2$. Позначимо $a\theta = s, a\theta_1 = x_1$. Замість (5) отримаємо

$$U_{p0} = \frac{\rho_1 J_{p0}}{\pi} \int_0^{x_1} \ln \frac{x_1 + \sqrt{x_1^2 + s^2}}{s} ds,$$

$$\int_0^{x_1} \ln s ds = x_1 \ln x_1 - x_1,$$

$$\int_0^{x_1} \ln \left(x_1 + \sqrt{x_1^2 + s^2} \right) ds =$$

$$= \int_0^{x_1} \left(\ln x_1 + \ln \left(1 + \sqrt{1 + \frac{s^2}{x_1^2}} \right) \right) ds =$$

$$= x_1 \ln x_1 + x_1 \int_0^1 \ln \left(1 + \sqrt{1 + y^2} \right) dy.$$

Останній інтеграл знаходимо за допомогою чисельних методів. Він дорівнює 0,76275. В результаті маємо

$$U_{p0} = \frac{\rho_1 J_{p0}}{\pi} (x_1 + 0,76275x_1). \quad (6)$$

Поляризаційна різниця потенціалів $F_{p0} = U_T - U_{p0}$. Залежність між нею і величиною J_{p0} визначимо за допомогою поляризаційної кривої. Рівняння (6) виражає залежність між потенціалом на поверхні пошкодження і густиною струму, який натікає на неї з навколишнього середовища. За відсутності відшарування густина струму збігається з J_{p0} . В іншому разі вона буде більшою за J_{p0} . Додамо до неї густину струму J_1 , який проходить на поверхню електроліту в зоні відшарування. Значення J_1 знайдемо з рівняння

$$J_1 = \frac{1}{\rho} \frac{dU_p}{dr}. \quad (7)$$

Далі замість формули (6) отримаємо

$$U_{p0} = \frac{\rho_1 (J_{p0} + J_1)}{\pi} (x_1 + 0,76275x_1). \quad (8)$$

Перейдемо до дискретного аналогу рівняння (1). Поділимо відрізок $[0, r_n]$ (r_n — кінцева точка відшарування) на n частин точками $0, r_1, \dots, r_n$ так, щоб $r_i - r_{i-1} = h$, і замінимо похідні їх різницевиими формулами. В результаті отримаємо систему рівнянь

$$U_{p1}^i \left(1 + \frac{2\tau}{h^2} \right) - \frac{\tau}{h^2} \frac{r_1 + \frac{h}{2}}{r_1} U_{p2}^i =$$

$$= U_{p1}^{i-1} + \frac{\tau}{h^2} \frac{r_1 - \frac{h}{2}}{r_1} U_{p0}^i - \tau \rho J_{p1},$$

$$- \frac{\tau}{h^2} \frac{r_j - \frac{h}{2}}{r_j} U_{pj-1}^i + \left(1 + \frac{2\tau}{h^2} \right) U_{pj}^i -$$

$$- \frac{\tau}{h^2} \frac{r_j + \frac{h}{2}}{r_j} U_{pj+1}^i = U_{pj}^{i-1} - \tau \rho J_{pi},$$

$$i = \overline{2, n-1},$$

$$- \frac{\tau}{h^2} \frac{r_n - \frac{h}{2}}{r_n} U_{pn-1}^i + \left(1 + \frac{2\tau}{h^2} \right) U_{pn}^i =$$

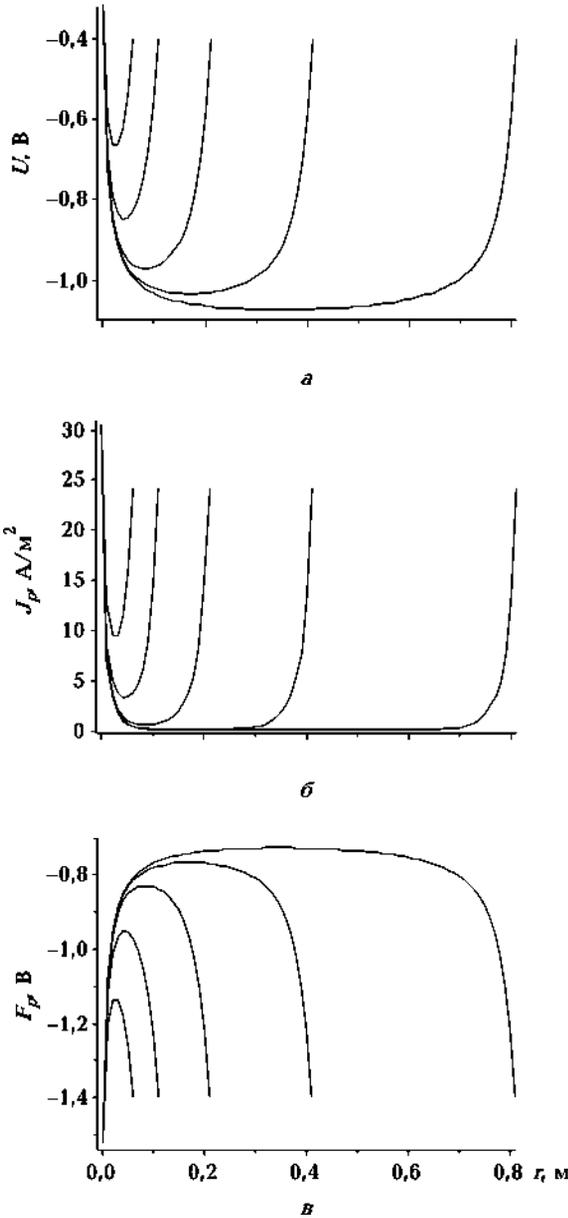


Рис. 3. Зміна величин U_p (а), J_p (б), F_p (в) у зонах відшарування радіусом 5, 10, 20, 40, 80 см, $\rho = 50 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$, $U_T = -1,5 \text{ В}$.

$$= U_{pn}^{i-1} + \frac{\tau}{h^2} \frac{r_n + \frac{h}{2}}{r_n} U_{pn+1} - \tau \rho J_{pn}, \quad (9)$$

де τ — крок за часом.

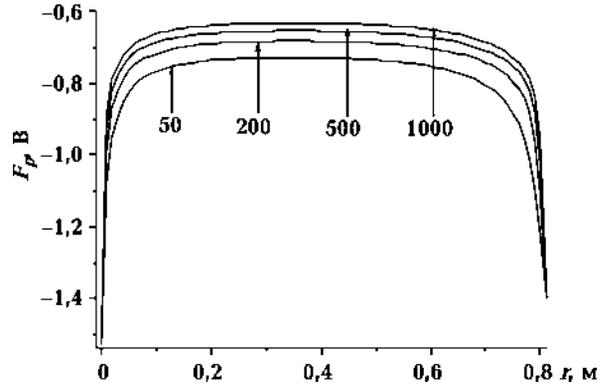


Рис. 4. Зміна F_p у зоні відшарування радіусом 0,8 м, $\rho = 50, 200, 500, 1000 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$.

Дискретний аналог рівняння (7) має вигляд

$$J_1 = \frac{1}{\rho} \frac{3U_{p0} - 4U_{p1} + U_{p2}}{2h}. \quad (10)$$

Розв'язок системи рівнянь (8)—(10) стосовно невідомих U_{pj}^i , J_{pj} і J_1 шукатимемо методом ітерацій. За даним алгоритмом побудовано програму і виконано розрахунки (рис. 3).

Із збільшенням величини ρ F_p наближається до стаціонарного потенціалу металу (рис. 4), зберігаючи той самий характер зміни вздовж r , що й на рис. 3.

Отже, як на поверхні пошкодження (див. рис. 2, б), так і в зоні відшарування (див. рис. 3, 4) параметри U_p , J_p , F_p різко змінюються з наближенням до межі відшарування як в околі поверхні пошкодження, так і на межі відшарування. На самій межі J_p і F_p залишаються досить великими в процесі розширення зони відшарування (створюються сприятливі умови для збільшення її площі). Зі зростанням питомого опору зволоженої поверхні відшарування зменшується F_p (рис. 4), яка в більшій частині зони менша за мінімальний захисний потенціал. Характер зміни F_p від поверхні пошкодження до середини зони відшарування на рис. 3, в і 4 такий самий, як на рис. 1.

Список літератури

- Агиней Р. В., Александров Ю. В. Исследование критериев ЭХЗ в отслаивании изоляционного покрытия газопровода // Территория Нефтегаз. — 2010. — № 2. — С. 34—36.
- Лукович В. В. Електричне поле в околі пошкодження протикорозійного покриття трубопроводу // Геофиз. журн. — 2011. — 33, № 5. — С. 128—133.
- Францевич И.Н., Пилипенко Н.А., Ляшенко М.Е. О влиянии катодной поляризации стальных газопроводов в условиях электрозащиты на состояние изоляционного битумного покрытия // Вопр. порошок. металлургии и прочности материалов. — 1956. — Вып. 3. — С. 3—13.
- Хижняков В.И. Предупреждение выделения водорода при выборе потенциалов катодной защиты подземных стальных трубопроводов // Коррозия: материалы, защита. — 2009. — № 9. — С. 7—10.
- Швец В.А. Фізико-хімічні властивості протекторного сплаву АЦКМ та конструкційних сталей Х70, С_T3: Автореф. дис. ... канд. хім. наук. — Київ, 1993. — 21 с.
- Zhengfeng L., Fuxing G., Xuhui M. A study on cathodic protection against crevice corrosion in dilute NaCl solution // Corrosion Sci. — 2002. — 44. — P. 689—701.