

нами коефіцієнта пористості. За даними ГДС спостерігається відносне збільшення пористості у зонах аномального пластового тиску.

Таким чином, запропонований метод забезпечує визначення не лише положення верхньої границі зони АВПТ, але і кількісну оцінку пористості і порового тиску, що забезпечує суттєве підвищення ефективності виявлення зон АВПТ за даними сейсмомістики та кількісну оцінку параметрів структури порового простору.

1. Bata D.R., Cheng C.H., Wilkens R.H. Sandstone Pore Aspect Ratio Spectra from Direct Observation and Velocity Inversion // J. Rock Mech. Sci. & Geotechn. Adv. Vol. 27, No. 4, 1990. 2. Прокопів Г.Т., Маслов Б.Л., Вижак С.А. Математичне моделювання впливу тиску і температури на швидкість протікання криві пористий порід // Геофиз. журн., 2000, №3. 3. Cheng C.H., Toksoz M.N. Inversion of seismic velocities for the Pore Aspect Ratio Spectrum of a Rock. 4. Александро Б.Л. Аномально-высокие пластовые давления в нефтяных бассейнах. - М.: Недра.

Надійшло до редакції 02.12.07.

УДК 620.197.5

В. Лукович, д-р техн. наук

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПОЛЯРИЗАЦІЇ ТРУБОПРОВОДУ

Побудована математична модель розрахунку параметрів системи катодного захисту магістрального трубопроводу в процесі поляризації. В моделі розраховано величини густини струму, поляризаційного потенціалу та поляризаційного опору в долі поверхні труби, яка має безпосередній контакт з електропровідним середовищем. Розрахунки проведено при умові, що величина цієї долі відома. Залежність між градієнтом потенціалу та струмом на межі метал-електроліт визначається за даними поляризаційної кривої.

A mathematical model of calculation of parameters of a cathode protection system of a main pipeline during polarization process is built. In the model, values of current density, polarization potential and polarization resistance in the part of a pipe surface which has direct contact with electroconductive medium, are calculated. The calculations are done under the condition that the value of this part is known. The dependence between the potential gradient and the current at the metal-electrolyte interface is determined using the data from the polarization curve.

Для розрахунку параметрів електрохімічного захисту магістральних трубопроводів використовують величину перехідного опору протикорозійного покриття. Цю величину оцінюють не стільки якості матеріалу, з якого виготовлене покриття, скільки величину долі пошкоджень його поверхні. Тому в запропонованій математичній моделі замість величини перехідного опору використано долю площі пошкодження цього покриття, обернена величина якої практично дорівнює величині перехідного опору. Це також деяка середня величина на заданому відрізку. Але з використанням її ми маємо можливість розрахунку густини струму, середня величина якої близька до величини струму в пошкодженні. При цьому виникає також можливість використати дані поляризаційної кривої для визначення величини поляризаційного потенціалу та поляризаційного опору.

При побудові математичної моделі поля системи катодного захисту знехтуємо величиною струму, який проходить з електропровідного середовища на трубу через пошкоджене покриття, тобто, враховуватимемо тільки струм, який проходить на трубу лише через пошкодження в ізоляції. Опір непошкодженого протикорозійного покриття настільки великий, що величина струму, який проходить крізь нього, буде на декілька порядків меншою від того, який проходить через пошкодження. Для спрощення моделі розглядатимемо осесиметричну задачу.

Вибіримо систему координат $Oxyz$ так, щоб площа xOy лежала на поверхні землі, яку вважатимемо плоскою. Площина xOz проходить через вісь труби, а площа yOz проходить через одне з заземлень, які позначимо точками. Вважатимемо ґрунт, протикорозійне покриття та трубу однорідними. Розмістимо катодні перетворювачі з заземленнями вздовж труби на відстані $2L$ один від одного. Допустимо, що доля пошкоджень – величина стала (позначимо її через ϵ_0). З врахуванням симетрії задачі потенціал U в довільній точці шару ґрунту $[-L, L]$ зовні труби задовільняє рівнянню [1]

$$U = \frac{\rho}{2\pi} I_a \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[(x-x_0+2nL)^2 + (y-y_0)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} - \frac{\rho}{4\pi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \epsilon_0 \int_{-L}^L J(\xi) \left[(x-\xi+2nL)^2 + y^2 + (z-(-1)^n h)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} d\xi, \quad (1)$$

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

$$U = \frac{\rho}{2\pi} I_a \sum_{n=-1}^1 \left[(x-x_0+2nL)^2 + (y-y_0)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} - \frac{\rho}{4\pi} \sum_{n=-1}^1 \epsilon_0 \int_{-L}^L J(\xi) \left[(x-\xi+2nL)^2 + y^2 + (z-(-1)^n h)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} d\xi, \quad (2)$$

де ρ – величина питомого опору ґрунту, I_a – величина струму заземлення, координати якого $x_0, y_0, z_0=0$ (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 ім в роботі [1] лише множником ϵ_0 , яким виділяється з інтеграла від $-L$ до L лише та доля поверхні труби, яка має безпосередній контакт з навколишнім середовищем. Оскільки більшість пошкоджень мають дуже малі розміри й розміщені по всій поверхні труби, то розрахунки, проведені за допомогою виразів (1) і (2), мало відрізняються від аналогічних ім, але отримані з виразів, які описують реальну картину поля.

На зовнішній поверхні труби (на межі між трубою та навколишнім середовищем) вираз (2) матиме вигляд

$$U_a = \frac{\rho}{2\pi} I_a \sum_{n=-1}^1 \left[(x-x_0+2nL)^2 + y_0^2 \right]^{-\frac{1}{2}} - \frac{\rho}{4\pi} \sum_{n=-1}^1 \epsilon_0 \int_{-L}^L J(\eta) \left[(x-\eta+2nL)^2 + 4h^2 \right]^{-\frac{1}{2}} d\eta, \quad (3)$$

де

$$W_1 = \begin{cases} a, & l=0; \\ 2h, & l=1, \end{cases}$$

a – радіус труби.

На поверхні труби потенціал U_T визначається з рівняння [1]

© В. Лукович, 2008

$$U_T = U_{T0} + \begin{cases} -\rho_T \varepsilon_0 x \int_{-L}^x J(\xi) d\xi - \rho_T \varepsilon_0 \int_0^x J(\xi) d\xi, & x < 0; \\ \rho_T \varepsilon_0 \int_0^x J(\xi) d\xi + \rho_T \varepsilon_0 x \int_x^L J(\xi) d\xi, & x \geq 0, \end{cases} \quad (4)$$

де U_{T0} - потенціал труби в точці $x=0$.

Доповнимо систему рівнянь (3), (4) співвідношенням, яке зв'язує величини U_a , U_T та J на межі між поверхнею труби та електропровідним середовищем [1]

$$U_a - U_T + \Pi_{cm} = R_p J, \quad (5)$$

де Π_{cm} - стаціонарний потенціал металу, R_p - опір на цій межі. Зауважимо, що з врахуванням ділі пошкоджень протикорозійного покриття величина J в (5) чисельно дорівнює густині струму саме в цих пошкодженнях. Те саме стосується лівої частини рівняння (5). Тому залежність між компонентами його знаходимо з даних поляризаційної кривої. На рис. 1 зображена поляризаційна крива, побудована за даними вимірювань, опублікованих в [2]. З рис. 1 видно, що з наближенням величини F_{pot} до 0,55 В величина J прямує до нуля, тобто $U_T - U_a$ наближається до Π_{cm} . Позначивши $U_a - U_T$ через $-F_{pot}$, з виразу (5) отримуємо

$$R_p = \frac{-F_{pot} + \Pi_{cm}}{J}. \quad (6)$$



Рис. 1. Поляризаційна крива

Зведемо рівняння (3) – (5) до одного. Для цього віднімемо від (3) вираз (4) і замість різниці підставимо її значення з (5). В результаті отримаємо

$$R_p J + \frac{c}{4\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon_0 \int_{-L}^L J(o) \left[\sum_{k=0}^{\infty} \left[(x-o+2nL)^2 + H^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \right] do + f(x,o) + U_{T0} = \frac{c}{2\pi} I_a \sum_{n=1}^{\infty} \left[(x-x_a+2nL)^2 + y_a^2 \right]^{-\frac{1}{2}} - \Pi_{cm}. \quad (7)$$

де

$$f(x,o) = \begin{cases} -c_T \varepsilon_0 x \int_{-L}^x J(o) do - c_T \varepsilon_0 \int_0^x J(o) do, & x < 0; \\ c_T \varepsilon_0 \int_0^x J(o) do + c_T \varepsilon_0 x \int_x^L J(o) do, & x \geq 0. \end{cases}$$

Рівняння (7) містить невідомі J , R_p та U_{T0} . Величину J знайдемо з співвідношення (7). Величину R_p отримаємо з виразу (6), в якому залежність між F_{pot} та J визначимо за допомогою поляризаційної кривої (див. рис. 1). Для знаходження U_{T0} побудуємо рівняння

$$\int_{-L}^L \varepsilon_0 J(o) do = I_a. \quad (8)$$

фізичний зміст якого такий: величина струму катодного перетворювача дорівнює сумарній величині струму, який натікає на трубу на ділянці $[-L, L]$. В результаті отримаємо систему (7), (8) для знаходження невідомих J , R_p та U_{T0} . Шукатимемо їх за допомогою ітерацій. На першій ітерації приймемо $R_p = 0$, що відповідає початку поляризації (труба ще не встигла заполяризуватись). З системи (7), (8) знаходимо J та U_{T0} . За величиною J з виразу (6) та поляризаційної кривої (рис. 1) знаходимо R_p і підставляємо в (7). Повторюємо ітерації до тих пір, поки попереднє значення R_p практично не співпадає з наступним. Результати проміжних ітерацій при цьому ілюструють процес поляризації.

За дискретним аналогом моделі (7), (8) розроблені алгоритм і програма й проведені розрахунки поляризації відрізка трубопроводу довжиною 9 км з такими геометричними та фізичними параметрами труби й 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 зображені графіки зміни густини струму в процесі поляризації. На початку поляризації вона досить велика в околі точки дренажу й досить мала на кінцях зони захисту. В процесі виходу на стаціонарний режим вона поступово зменшується в околі точки дренажу й збільшується на кінцях зони захисту.

Аналогічно змінюється поляризаційний потенціал, графіки якого зображені на рис. 3.

Поляризаційний опір, навпаки, найменший в околі точки дренажу й найбільший на кінцях зони захисту на початку поляризації (див. рис. 4).



Рис. 2. Графіки зміни густини струму в процесі поляризації

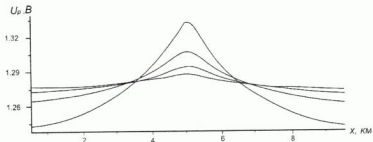


Рис. 3. Графіки зміни поляризаційного потенціалу в процесі поляризації

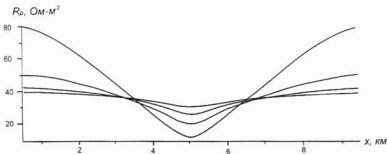


Рис. 4. Графіки зміни поляризаційного опору в процесі поляризації

В процесі виходу на стаціонарний режим графік його поступово вирівнюється.

Отже, замінивши в розрахунках параметрів катодного захисту величину перехідного опору протикорозійного покриття величиною долі пошкодження цього покриття, ми маємо можливість використати в розрахунках залежність між градієнтом потенціалу 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 самого процесу поляризації необхідно провести дослідження залежності величини R_p від часу поляризації.

Зауважимо також, що в запропонованій математичній моделі небайдуже, яку поляризаційну криву використати в розрахунках. Характеристики сталі й електроліту, за якими вона побудована, повинні бути близькими до тих, в яких знаходиться дана ділянка траси магістрального трубопроводу.

1. Электрохимическая защита трубопроводов от коррозии / Остапенко В. Н., Ягупольская Л. Н., Луковин В. В. и др. – К.: Наукова думка, 1988. 2. Шевченко В. А. Фізико-хімічні властивості протекторного сплаву АЦМ та конструкційних сталей X70, S-3. / Дисертація канд. хім. наук. ЛПМ АН України. – К. – 1993.