

Потенціал в області мікронерівностей поверхні металу, який працює в режимі катодного захисту

В. В. Лукович, В. В. Картузов *

Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України
Україна, 03142, Київ, вул. Кржижановського, 3

*E-mail: yvk@ipms.kiev.ua

Побудовано математичну модель, алгоритм, комп'ютерну програму та проведено розрахунки потенціалу в області мікронерівностей відшарування. Модель розрахована на зміну потенціалу в цій області за неповного і повного захисту поверхні металу. Мається на увазі трубопровід, що довго працює в режимі катодного захисту, ізоляція якого повністю відшарувалась від поверхні металу, а порожнина, що утворилася, заповнена водою з домішками солей. Підтверджено результати практичних дослідів по зміні поляризаційного потенціалу за неповного і повного захисту.

Ключові слова: катодний захист, захисний потенціал, мікронерівності поверхні.

Вступ

Корозія підземних металічних споруд, особливо магістральних трубопроводів, завдає величезних збитків країні. Активний захист трубопроводів шляхом катодної поляризації ефективно вирішує означену проблему. Обчислювальний експеримент з оптимізації режимів катодного захисту магістральних трубопроводів достатньо регулярно виконується школою В. Н. Остапенко починаючи з 70 років минулого сторіччя, концентруючи увагу на нових виникаючих задачах. Наразі це захист трубопроводів, у яких в результаті дуже великого строку експлуатації має місце відшарування ізоляції від поверхні металу, особливо коли недотримуються рекомендованих розрахунками значень захисного потенціалу. Тому актуальною стає задача розрахунку захисного потенціалу в області мікронерівностей металу на межі метал—електроліт.

Обчислювальний експеримент

Проведено обчислювальний експеримент з розрахунків потенціалу в області мікронерівностей в режимі катодної поляризації поверхні металу за майже повного відшарування ізоляції від цієї поверхні. За такого режиму значення поляризаційного потенціалу практично співпадає із значенням захисного [1]. Для формування моделі виділимо один з металічних виступів мікронерівностей матеріалу і помістимо його в циліндр, діаметр якого співпадає з діаметром нижньої основи цього виступу, а верхня основа проходить через вершину виступу.

Вважаючи задачу осесиметричною, розглянемо область, обмежену основами, віссю і однією з твірних циліндра. Оскільки опір металу на декілька порядків менший від опору електроліту, величина потенціалу практично стала у всьому об'ємі виступу. Вилучимо частину області, яку займає виступ, і залишимо ту, яку займає електроліт. У схемі розрахункової області вибрано прямокутну сітку так, щоб точки межі області

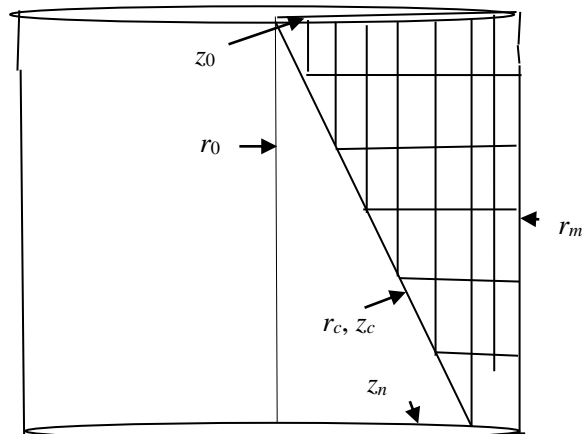


Рис. 1. Схема області розрахункової моделі:
 z_0, z_n — координати верхньої та нижньої основ
циліндра; r_0 — вісь циліндра; r_m — радіус
твірної циліндра; r_c, z_c — радіус на межі виступ—
електроліт та відповідна йому координата.

електроліту з металом співпали з поверхнею виступу (рис. 1). Металевий виступ має форму конуса, висота якого у чотири рази більша від радіуса основи.

У роботі [2] проведено розрахунок потенціалу, коли висота конуса дорівнювала радіусу основи. За результатами цього розрахунку зроблено припущення, що за такого нахилу твірної конуса до основи (45°) корозія поверхні металу в області мікронерівностей відсутня. Вважаємо, що вибраного співвідношення між висотою і радіусом буде досить для корозії поверхні мікронерівностей.

Потенціал U в області електроліту задовольняє рівнянню

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

і крайовим умовам

$$U(r_c, z_c) = -f(J(r_c)), \quad (2)$$

$$U(r_c, z_c) = U_c, \quad (3)$$

$$\left. \frac{dU}{dr} \right|_{r=r_m} = 0, \quad (4)$$

$$U(r, z_0) = 0, \quad (5)$$

де r_c — радіус на межі виступ—електроліт; r_m — радіус твірної; z_0 — координата верхньої основи циліндра. У режимі катодної поляризації на межі метал—електроліт залежність між потенціалом і густиною струму задається даними поляризаційної кривої, отриманими в роботі [3]. Скористаємось цими даними, виразивши J через відношення різниці потенціалів виступу і електроліту до поляризаційного опору R :

$$J(r_c, z) = -\frac{U_c - U_p}{R}, \quad (6)$$

де U_c — потенціал трубопроводу (відносно нуля землі); U_p — потенціал електроліту на межі з виступом. Через F позначимо величину захисного потенціалу, який дорівнює $F = U_c - U_z$, де U_z — потенціал на поверхні землі в точці z , в котрій проведено вимірювання F (вздовж трубопроводу над його віссю переважно через 10 м). У роботі [2] за результатами розрахунків доведено, що на верхній основі області мікронерівностей $U_z = 0$. Тоді умова (2) з огляду на (5) набуде вигляду

$$\frac{F - U_p}{R} = \frac{1}{\rho} \frac{dU(r_c, z)}{dn}. \quad (7)$$

Перейдемо до дискретної реалізації задачі (1), (3)—(7) на сітці, побудованій на схемі рис. 1, з кроком дискретизації $h = z_i - z_{i-1} = r_j - r_{j-1}$. Зі збільшенням кількості точок поділу по висоті ($n = 16$) кількість точок по радіусу становить $m = 18$ (найбільше число точок поділу по горизонталі). Отримаємо систему рівнянь відносно невідомих U_{ij} в області електроліту і в точках на межі з виступом. Розв'язок задачі шукатимемо методом ітерацій. Якщо відомі значення U_p (потенціал електроліту на межі з виступом), то за даними поляризаційної кривої знаходимо J , а також R з рівняння (6), де $F - U_p = F_p$ (поляризаційний потенціал). Оскільки U_{0j} (на верхній основі області електроліту) дорівнює нулю, то значення R в верхній точці межі будуть близькі до отриманих за умови $F_p = -0,55$ В. Отже, в нульовому наближенні обираємо R з врахуванням цієї умови. У наступних ітераціях визначаємо R з рівняння (6) і розв'язку системи рівнянь в попередній ітерації. Процес ітерацій швидше збігається за невеликих значень захисного потенціалу.

У практиці катодного захисту отримано мінімальне значення захисного потенціалу ($-0,875$ В) [4]. Якщо значення нижче, потенціал знаходиться в режимі неповного захисту. Поляризаційна густина струму J у цьому випадку зростає досить повільно. І навпаки, за повного захисту з розширенням інтервалу його зміни J збільшується швидко. Тому доцільно дослідити зміну в обох випадках.

Розроблено алгоритм і програму розрахунку потенціалу в області електроліту. На рис. 2 зображено розподіл потенціалу $U_{i,j}$ в області електроліту: за умови, що потенціал металевого виступу $U_c = -0,56$ і $-1,2$ В. Всі лінії починаючи від точок електроліту на межі з металічним виступом до твірної циліндра до $nh = 10$ на рис. 2, *a* і $nh = 6$ на рис. 2, *б* горизонтальні і надалі поступово підвищуються, наближаючись до

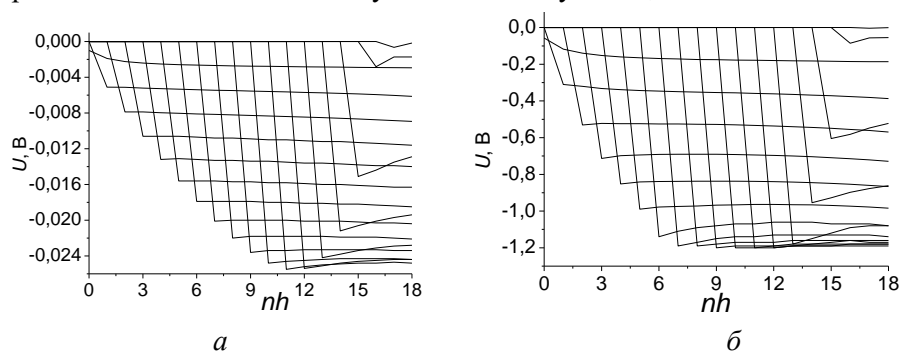


Рис. 2. Розподіл потенціалу в області електроліту за умови $F = -0,56$ (а) і $-1,2$ В (б).

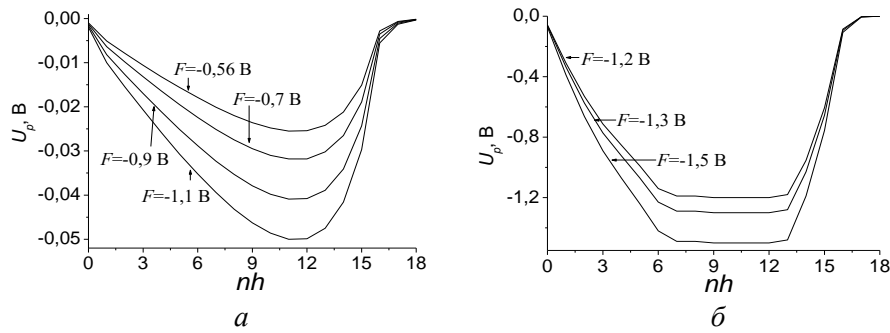


Рис. 3. Зміна потенціалу електроліту U_p вздовж межі з виступом за різних значень F .

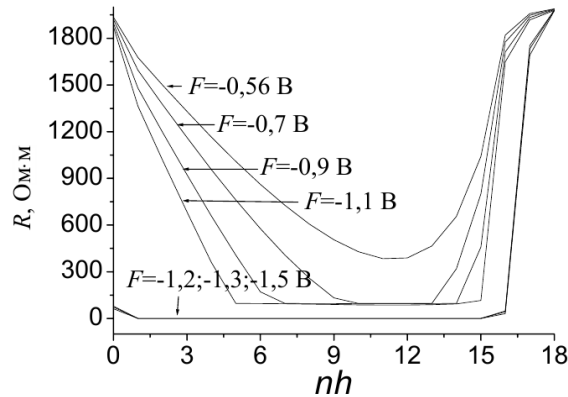


Рис. 4. Зміна поляризаційного опору R .

величини поляризаційного потенціалу $F_p = F - U_p$ на межі області. Поляризаційний потенціал U_p значно менший F_p на рис. 2, а і практично співпадає з ним на рис. 2, б. На рис. 3 показано цю відмінність зміни U_p для різних значень захисного потенціалу F . На рис. 3, а U_p змінюється в інтервалі $0 \dots -0,055$ В зі зміною F від $-0,56$ до $-1,1$ В, на рис. 3, б — відповідно в інтервалі $0 \dots -1,5$ В зі зміною F від $-1,2$ до $-1,5$ В.

Зміна U в області електроліту співпадає із зміною координати z , а також опору R (рис. 4). За умови $F = -0,56$ В $R > 380$ Ом·м, якщо $F = -0,7$ В — $R > 96$ Ом·м, а за умови $F = -0,9; -1,1$ В $R > 94$ Ом·м. Якщо $F = -1,2; -1,3; -1,5$ В, R уже в першій точці межі зверху менший 10 Ом·м, а починаючи з 3-ї точки менший $0,04$ Ом·м. В околі твірної циліндра ($nh = 12-18$) значення R відносно швидко зростає. За такого низького опору потенціал U в області електроліту знижується практично до рівня з F_p (рис. 2, б). На рис. 2, а U знижується до рівня з U_p (згідно з умовою нестійкої рівноваги), але найбільша частина струму стікає з області електроліту на металічний виступ на тій частині поверхні межі, на якій опір найменший, у цьому випадку $F_p = F - U_p$.

Проведено також розрахунок зміни U в іншій області електроліту (рис. 5). Дискретну реалізацію математичної моделі (1), (3)—(6) побудовано на квадратній сітці. Кількість точок по висоті $n = 64$, $m = 18$ — найбільше число точок поділу по горизонталі. Висота металевого виступу в чотири рази більша радіуса його основи. Схему області побудовано так, щоб точки на її межі були одночасно точками поверхні металічного виступу.

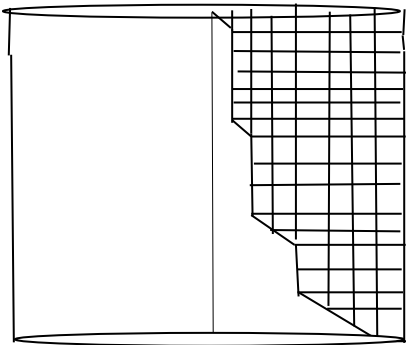


Рис. 5. Схема області розрахункової моделі (другий варіант).

На рис. 6 зображено зміну U_{ij} в області електроліту. Оскільки кількість горизонтальних ліній на рисунках повинна бути 64, виведено лише частину їх: кожна п'ята на рис. 2, б і кілька ліній вертикальної межі по обидві сторони від похилої (рис. 5). На останньому похилому відрізку межі три лінії співпали, а останні поступово зростають (рис. 6, а). Всі горизонтальні лінії потенціалу U на рис. 6 змінюються аналогічно зміні U на рис. 2 (знижується згідно з умовою

нестійкої рівноваги) і до останнього похилого відрізка (межі) майже відтворюють лінію межі електроліту.

Спостерігається аналогія зміни U_p для різних значень захисного потенціалу F на рис. 3 і 7, а також для R на рис. 4 і 8. Різницю в зміні U_p на рис. 3 та 7 і R на рис. 4 і 8 в околі твірної циліндра (області електроліту) можна пояснити відмінністю моделей металічного виступу на рис. 1 і 5. Очевидно, різні кути нахилу поверхні межі впливають на цю відмінність.

На рис. 2 і 6 видно, що потенціал U_{ij} вздовж радіуса r від межі між металічним виступом і електролітом r_c до твірної циліндра r_m є сталою

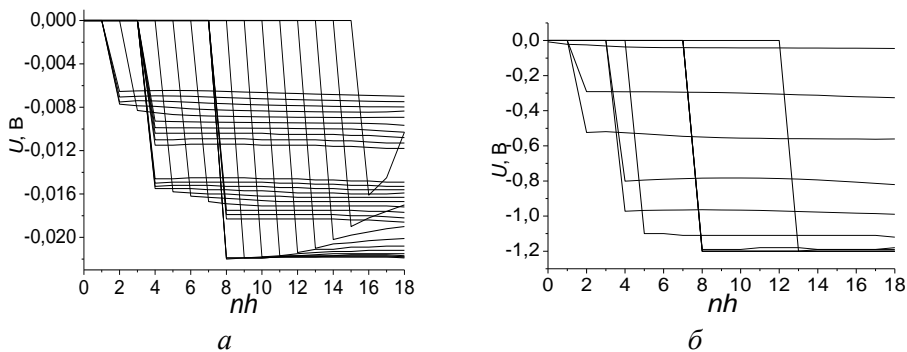


Рис. 6. Розподіл потенціалу в області електроліту з потенціалом металевого виступу $F = -0,56$ (а) і $-1,2 \text{ В}$ (б).

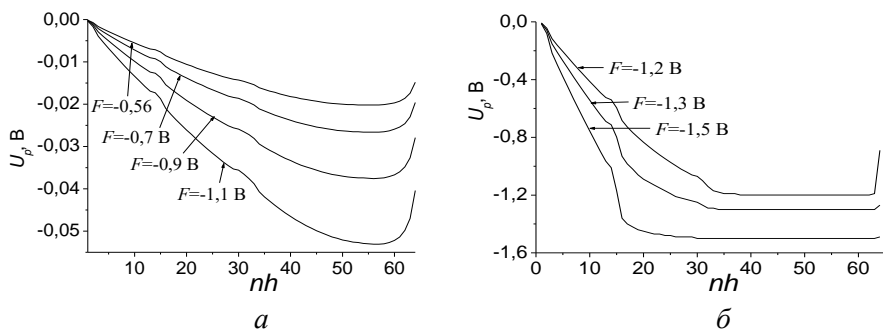


Рис. 7. Зміна потенціалу електроліту U_p вздовж межі з виступом за різних значень F .

величиною, тобто похідна від U_{ij} по r на цьому відрізку дорівнює нулю. Тому цілком оправдана й така крайова умова

$$\left. \frac{dU}{dr} \right|_{r=r_c} = 0.$$

А оскільки поляризаційний потенціал U_{ij} сталий на всьому відрізку $[r_0, r_m]$, то має місце рівність

$$\left. \frac{dU(z, r)}{dr} \right|_{r=r_j} = 0, \quad r_0 \leq r_j \leq r_m.$$

Поляризаційний потенціал U_p на кожному кроці починаючи від вершини виступу змінюється на величину $U_{pi} - U_{pi-1}$. В інтервалі $F = -0,56 \dots -1,1$ В значення потенціалу U_p змінюється до сотих долей вольт, а в інтервалі F від $-1,2$ В і нижче — $U_p = F$ (рис. 3, 7), причому навіть від $F = -0,56$ В поляризаційний потенціал U_p досягає половини величини $U_c = -0,55$ В і зростає до $F = -1,1$ В (рис. 3, а). На рис. 3, б $U_p = F$ (U_p зростає разом з F).

Поляризаційний опір R , який вже за умови $F = -0,56$ В до середини відрізка nh (рис. 4) досягає свого мінімуму, для F , нижчих $-0,9$ В, він близький до нуля вздовж всієї межі (рис. 4 та 8). Графіки на рис. 6—8 майже аналогічні відповідним їм на рис. 2—4. За даними рис. 2 і 6 горизонтальні лінії зміни U починаються уже з r_c (координати r на межі електроліту з металічним виступом). На твірній циліндра (див. рис. 1 і 5) виконується крайова умова (4) для всіх z на відрізку $[z_0, z_n]$.

Висновки

Потенціал U_{ij} електроліту — стала величина по горизонталі, а також стала по вертикалі (по координаті r_j). Згідно з умовою задачі, U_{ij} залежить від z_i . За умови $z_i = 0$ $U_{ij} = 0$, якщо $z_i = nh$, $U_{ij} = 1$ ($h = 1/n$).

Поляризаційний потенціал U_p змінюється зі зміною межі між металічним виступом та електролітом від верхньої межі області до її основи, найшвидше знижується приблизно до середини відрізка $[r_c, r_m]$, надалі дещо зростає. $U_p = F$ (U_p зростає разом з F) за повного захисту.

Поляризаційний опір R змінюється від 2000 до 0 Ом·м залежно від зміни F ($R = F/I$). Він максимальний за умови $F = 0$ і дорівнює 0, якщо $F = 1$. За умови $F = 0$ катодний захист відсутній, а якщо $F = 0,9$ В, R забезпечує повний захист поверхні металу від корозії (за умови $F = 0,9$ $R = 0$).

Означені результати обчислювального експерименту підтверджують практичні результати досвіду захисту газопроводу Дашава—Київ, одержані співробітниками ІІМ під керівництвом І. М. Францевича і є рекомендацією інженерам не відхилятися від означених умов захисту.

Цитована література

1. Лукович В.В. Про поляризацію трубопроводу у випадку відшарування ізоляції від його поверхні. *Успіхи матеріалознавства*. 2020. Вип. 1. С. 40—45.
2. Лукович В.В., Картузов В.В. Потенціал в області мікронерівностей поверхні металу. *Математические модели и вычислительный эксперимент в*

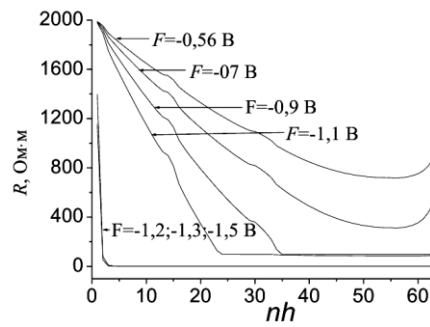


Рис. 8. Зміна поляризаційного опору R .

материаловедении. К.: Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины. 2019. Вып. 21. С. 36—41.

3. Швець В.А. Фізико-хімічні властивості протекторного сплаву АЦКМ та конструкційних сталей X70, СТ3: автореф. дис. ... канд. хім. наук. Київ, 1993. 21 с.
4. Францевич И.Н., Ляшенко М.Е., Гримайловский В.А. Опыт защиты газопровода Дашава—Київ от почвенной коррозии и блуждающих токов. *Защита металлов*. 1968. № 5. С. 597—603.

References

1. Lukovych, V. V. (2020). On the pipeline polarization in the case of insulation delamination from its surface. *Uspikhy materialoznavstva*, Iss, 1, pp. 40—45 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/materials2020.01.040>
2. Lukovich, V., Kartuzov, V. (2019). Potential in the area of metal surface microroughness. *Matematicheskie modeli i vychislitel'nyj jeksperiment v materialovedenii*. Kyiv: In-t probl. materialovedenija NAN Ukrainy, Iss. 21, pp. 36—41.
3. Shvets, V. A. Physico-chemical properties of ACCM tread alloy and structural steels X70, ST3: Avtoref. dys. ... kand. khim. nauk. Kyiv, 1993. 21 p.
4. Frantsevich, I. N., Lyashenko, M. E., Grimaylovskiy, V. A. (1968). Experience in protecting the Dashava—Kiev gas pipeline against soil corrosion and stray currents. *Zaschita metallov*, № 5, pp. 597—603.

Potential in microroughness domain of metal surface employed in cathodic protection mode

V. Lukovich, V. Kartuzov*

Frantzevich Institute for Problems of Materials Science NAS Ukraine

*E-mail: yvk@ipms.kiev.ua

This effort presents the results of investigation of cathodic protection process of a section of the main pipeline, which has been operating in cathodic protection mode for a long time and which insulation has completely exfoliated from metal surface, and a cavity between is filled with water and salt impurities. In this case, a decisive factor is a fact that a metal surface is covered with microroughnesses in the form of protrusions with almost conical shape. The surface is immersed in electrolyte. At the electrolyte-metal interface, a potential difference is formed — a corrosion potential, which creates an unstable equilibrium among the potentials of metal and electrolyte. A mathematical model is designed and implemented into a numerical algorithm and computer program. A computational experiment has been carried out to calculate the potential around microroughness. The model describes a change in potential in this area at incomplete and complete cathodic protection of metal surface. The basis of computational model is a selection of one of metal protrusions of material microheterogeneity and placing it in a cylinder, which diameter coincides with that one of the lower base of this protrusion, and its upper part passes through the apex of the protrusion. Mathematical model equations with corresponding boundary conditions and their discrete implementation are presented. The solution of problems is obtained by iterative procedures based on reference values of protective potential taken from practice. The results of computational experiment are presented in the form of graphs: 1) potential distribution in the field of electrolytes; 2) changes in electrolyte potential at the border with protrusion at different values of polarization potential; 3) changes in polarization resistance in the area (calculated). The geometry of computational domain was also varied, and the values of protective potential were determined to ensure the absence of corrosion.

Keywords: corrosion, microroughness, protective potential, plastic current density, electrolyte.