

УДК 620.191.38  
PACS number(s): 81.65.Kn

## ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ ВОЛОГОГО ҐРУНТУ

**М. Єлізаров**

*Кременчуцький державний політехнічний університет  
кафедра фізики  
вул. Першотравнева, 20, 39600 Кременчук, Україна  
e-mail: yel@bigmir.net*

У статті на прикладі модельного ґрунту досліджено його провідність залежності від об'ємної частки електроліту. Встановлено найімовірніші механізми провідності та деякі її особливості, зокрема те, що провідність тонких шарів ґрунту значно відрізняється від провідності суцільного його об'єму, що створює специфічні умови катодного захисту металу в ґрунті у випадку щілинної корозії, щілинних пошкоджень ізоляції тощо.

*Ключові слова:* ґрунт, корозія, провідність.

Для захисту металевих конструкцій і споруд від хімічної, електрохімічної, біологічної корозії, корозії від блукаючих струмів та контактної корозії широко застосовують катодний захист – електрохімічний захист металу, здійснюваний поляризацією від зовнішнього джерела струму або шляхом з'єднання з металом (протектором), потенціал якого негативніший за потенціал металу, який захищають [2, 3]. Катодний захист можливий лише якщо конструкція й анодне заземлення перебувають електронно і електролітично взаємодіють: перше досягається за допомогою металевих провідників, а друге – завдяки наявності електролітичного провідного середовища. У разі катодного захисту підземних металевих конструкцій (трубопроводів та ін.) саме ґрунт, в якому є конструкція, слугує тим електролітичним провідним середовищем, яке забезпечує електричний контакт конструкції й анодного заземлення. Тому дослідження електричних властивостей ґрунту, його провідності залежно від складу ґрунту, складу та кількості електроліту (вологи), яким він просякнутий, необхідні для правильного розуміння процесів, що там відбуваються. Це дасть змогу проектувати ефективніші системи катодного захисту, точніше прогнозувати корозійну поведінку вже наявних систем тощо. На прикладі модельного ґрунту ми спробували дослідити його провідність залежно від об'ємної частки електроліту та встановити імовірні механізми провідності.

Як модельний ґрунт для дослідів взяли річковий пісок, попередньо спеціально оброблений. Спочатку пісок просіювали кількаразово через сита з отворами різного діаметру для виділення фракції з майже однаковим діаметром піщинок, який сягав близько 0,2 мм. Згодом кілька разів промивали звичайною

водопровідною водою, а останні рази – дистильованою. Після цього пісок прожарювали з метою усунення органіки і знищення мікрофлори.

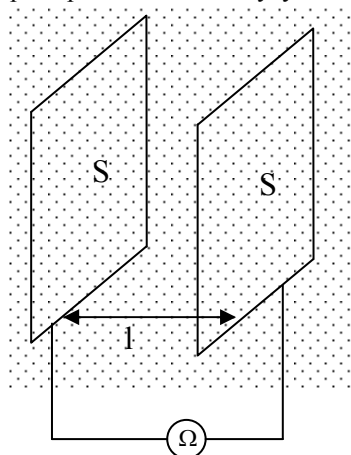


Рис. 1. Схема визначення питомої провідності в об'ємі піску

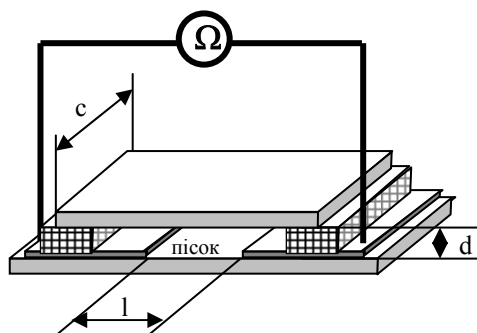


Рис. 2. Схема визначення питомої провідності тонкого шару піску

Вихололий до кімнатної температури після прожарювання пісок використовували для приготування модельного вологого піску. У порцію піску додавали порцію дистильованої води, що становила певну частку від об'єму порції піску; далі суміш механічно перемішували до цілковитої однорідності.

Незмочуваний водою пісок одержували додаванням у нього під час прожарювання шматочка воску. Внаслідок перемішування поверхня кожної з піщинок вкривалася тоненькою плівочкою воску, що сприяло незмочуваності піщинок. Зволоження такого піску відбувалося так само, як описано вище.

Питому провідність модельного зволоженого піску вимірювалась так. В об'єм піску занурювались дві однакові металеві пластини площею  $S$ , зафіксовані діелектричними деталями паралельно одна до одної на відстані  $l$  (рис. 1). Зовнішні поверхні пластин були заізольовані. Далі вся система – пісок із пластинами в ньому – утрамбовувалась, допоки пісок переставав осідати. Відтак опір піску вимірювали омметром, і питому провідність обчислювали за формулою

$$\rho = \frac{l}{RS}.$$

Аналогічно визначали питому провідність тонкого шару піску. Між двома незмочуваними (навощеними) діелектричними пластинами, віддаленими одна від одної за допомогою діелектричних прокладок на невелику відстань  $d$ , містився тонкий шар ущільненого піску. На одній з пластин були прямокутні металеві плівки-електроди, відстань між якими  $l$ . Електроди було замкнуто на омметр (рис. 2). Питому провідність піску визначали як

$$\rho = \frac{l}{Rcd}.$$

Результати вимірювань представлено на рис. 3 і 5.

Вигляд залежностей провідності ґрунту від об'ємної частки електроліту в ньому (рис. 3) свідчить про наявність двох механізмів провідності, які можна більш-менш задовільно пояснити за допомогою теорії протікання [1]. У теорії описано широке коло явищ, і чи не найрозробленішою на сьогодні галуззю її застосувань є електричні властивості неупорядкованих систем, зокрема матеріалів, що є сумішшю двох різних речовин – діелектрика і металу. У нашому випадку систему – зволожений пісок – можна розглядати як суміш сухих (непровідних) і зволжених (провідних) піщинок. При додаванні вологи у ґрунт частина піщинок унаслідок змочування стає вологою. Дотикаючись одна до одної, вологі піщинки утворюють собою кластери провідності – фрактальні об'ємно-лінійні структури. Зі збільшенням кількості вологи ці кластери ростуть і, сполучаючись, утворюють провідний кластер (рис. 6), по якому носії струму переносять заряд з електрода на електрод. У разі малої кількості доданої вологи у цьому провідному кластері існують лише поодинокі доріжки, канали провідності. Унаслідок давання вологи збільшується кількість мокрих піщинок, провідний кластер росте, кількість каналів провідності також збільшується, що збільшує провідність системи.

Теорія протікання розглядає подібні системи в задачі твердих сфер. У цій задачі розглянемо систему, яка складається з добре перемішаних провідних і

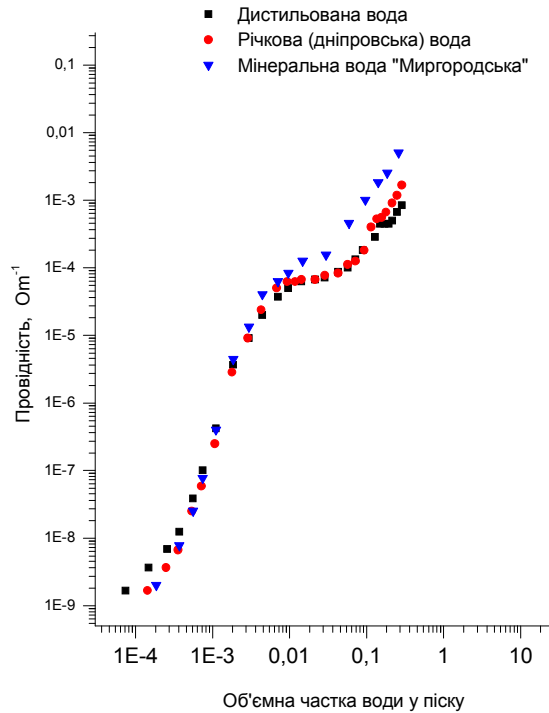


Рис. 3. Залежність провідності піску від об'ємної частки вологи (дистильована вода, річкова вода, мінеральна) у ньому

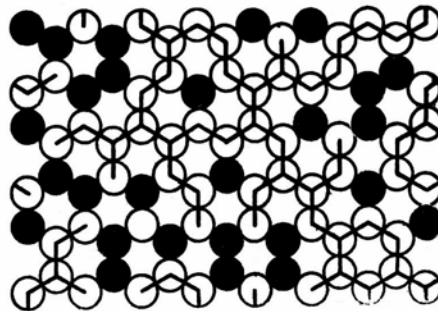


Рис. 4. У теорії протікання розглянемо систему з добре перемішаних провідних (білі) і непровідних (чорні) кульок. Показано шляхи протікання струму через білі кульки

непровідних кульок (рис. 4), і показано, що питома електропровідність таких систем дорівнює нулеві за законом

$$\sigma(x) = \sigma_0 (x - x_c)^t,$$

де  $x$  – відносна кількість провідних кульок,  $x_c$  – поріг протікання (таке значення  $x$ , за якого електропровідність зникає), множник  $\sigma_0$  за порядком величини дорівнює питомій електропровідності системи, в якій немає непровідних кульок. Величину  $t$  називають критичним індексом електропровідності, і в теорії протікання визначено, що для тривимірних систем  $t = 1,6-1,7$ .

У нашому випадку грубо можемо вважати, що всі піщинки у ґрунті є однаковими, і кожна з них захоплює з доданої у систему води лише певну визначену її кількість – такий собі „квант” води. Тоді величина  $x$  у нашому випадку є пропорційною до об’ємної частки води в системі, а отже, провідність залежно від неї за

теорією має зростати з показником степеня, що дорівнює 1,6–1,7. Але насправді величина провідності зростає трохи інтенсивніше. Це, імовірно, пов’язане з тим, що піщинки здатні захоплювати неоднакову кількість води, і величина „кванту” води не є сталою, а збільшується з додаванням води.

З графіка (рис. 5) також видно, що у випадку малозволоженого ґрунту наявність домішок у воді (принаймні до величини мінералізації  $\approx 3 \text{ г/дм}^3$ ) не впливає на величину провідності. Це можна пояснити тим, що у системі провідного кластера з мокрих піщинок, що електрично сполучає собою електроди, є вузькі місця, здатність яких пропускати струм є обмежена. Справді, украй малою є ймовірність того, що мокрі провідні піщинки в піску шикуватимуться у безперервні провідні ланцюжки, що сполучали б електрично анод з катодом. Набагато ймовірнішим є існування в піску досить коротких ланцюжків провідності, хаотично розташованих в об’ємі. Ланцюжки ці перетинаються, утворюючи зв’язний кластер провідності. При цьому, зрозуміло, існують вузлик-розгалуження – місця, де перетинаються два або й більше ланцюжків провідності. Отже, таку систему можна описати двома параметрами: кількістю таких вузлів в одиниці об’єму та середньою довжиною ланцюжків провідності між двома найближчими вузлами. Чим більша зволоженість системи, тим більшою є перша величина і меншою друга, і навпаки. Логічно припустити, що у разі малої

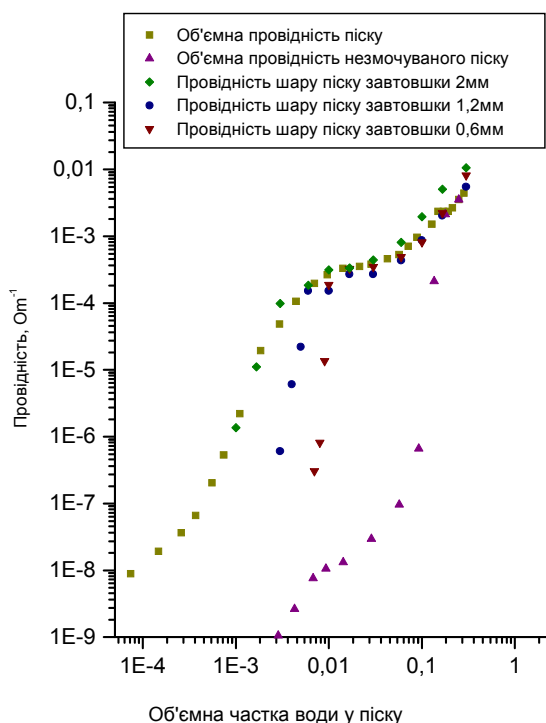


Рис. 5. Залежність провідності піску (пісок з незмочуваними піщинками, тонкі шари піску) від об’ємної частки води (дистильована вода) у ньому

зволоженості піску гілки кластера провідності проходять в його об'ємі не скрізь так густо і вдало, щоб, шунтуючи одна одну, забезпечувати рівномірну провідність

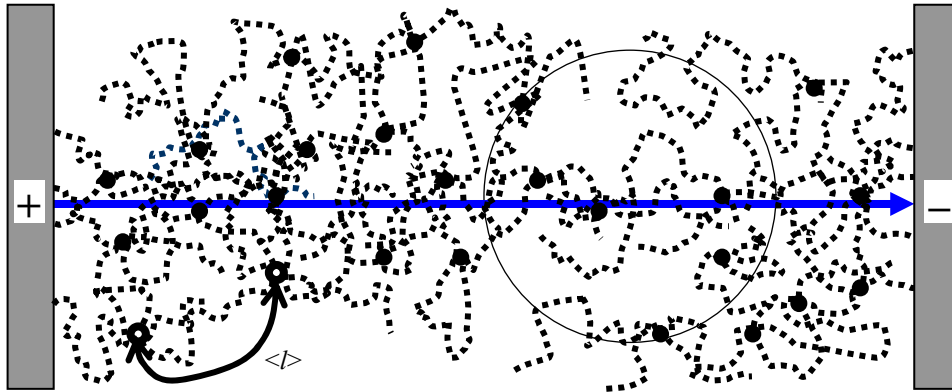


Рис. 6. Провідний кластер – система з мокрих піщинок, яка виникає у малозволоженому піску, між двома плоскими електродами (схематично). Колом обведено вузьке місце в системі. Жирними точками показано вузли-розгалуження кластера провідності.  $\langle l \rangle$  – середня довжина ланцюжка провідності між двома сусідніми вузлами кластера



Рис. 7. Зменшення можливостей для самошунтування гілок кластера провідності у тонкому шарі піску

в напрямі анод–катод (рис. 6). Крім того, у деяких місцях кластера провідності поганий електричний контакт можуть давати слабкозволожені піщинки, особливо, якщо такі піщинки є вузлами кластера.

Щоб перевірити слушність наведених припущень щодо механізму провідності у малозволоженому ґрунті, було доведено два досліди. Якщо провідність слабковологого піску забезпечується через кластер зі зволжених піщинок, то:

1. Якщо всі піщинки зробити незмочуваними, провідність піску має значно зменшитись. Такий дослід було проведено з вошеним піском, методику приготування якого описано вище. Як видно з рис. 5, за одних і тих самих значеннях зволоженості звичайного і вошеного піску величина провідності другого є на кілька порядків меншою, що підтверджує висловлені припущення. За умови сильної зволоженості величини провідності і звичайного, і вошеного піску збігаються, оскільки у цій ситуації наявний вже інший механізм провідності – капілярний (див. нижче).

2. Оскільки гілки кластера провідності шунтують одна одну, то у тонких шарах слабковологого піску провідність теж має зменшуватись, бо сама геометрія системи відсікає більшість гілок кластера, що могли б забезпечувати провідність в обраному напрямі (рис. 7). Справді, досліди, методику яких описано вище,

засвідчили (рис. 5), що питома провідність тонкого (< 2 мм) шару піску є для тих же величин зволоження значно меншою, ніж провідність грубших (від 2 мм і більше) шарів, яка, своєю чергою, співпадає з величинами питомої провідності, одержаними в об'ємних вимірюваннях. Причому чим тонший шар піску, тим дужчий ефект, що також цілком логічно видно з запропонованої моделі. Ми припускаємо, що товщина шару піску  $\approx 2$  мм, нижче якої спостерігається зменшення провідності, приблизно дорівнює середній довжині ланцюжка провідності між двома сусідніми вузлами кластера. Це також збігається з діаметром піщинок: 0,2 мм, тож, якщо слушне попереднє припущення, між вузлами кластера знаходиться приблизно 10 піщинок. Встановлений факт різкого зменшення провідності тонких шарів вологого піску свідчить про те, що корозія металевих поверхонь, що контактують з тоншими від 2 мм шарами ґрунту (щілинна корозія), відбувається зовсім по-іншому, ніж корозія поверхонь, що контактують з товстими пластами ґрунту. Через малу провідність цих шарів ґрунту, дієвість катодного захисту ділянок поверхонь металів, що контактують з такими шарами (щілини, тріщини в металі, в ізоляції тощо), є вельми сумнівною.

Коли більшість піщинок у системі стає зволоженою (об'ємна частка вологи у ґрунті сягає при цьому величини  $\approx 0,3\%$ ), додавання вологи вже не впливає практично на збільшення провідності, бо не спричиняє появи нових провідних ланцюжків. Відповідно, на графіку маємо поличку.

І нарешті, коли мокрими стають усі піщинки (об'ємна частка вологи в ґрунті при цьому становить  $\approx 5\%$ ), провідність починає збільшуватися за рахунок заповнення вологою простору між ними, унаслідок чого у ґрунті виникає розгалужена система провідних капілярів. На останній ділянці провідність збільшується за теорією протікання [1], а саме з показником степеня 1,6–1,7. Це можна легко пояснити, якщо уявно поділити товщу вологи, що заповнює собою порожнини між піщинками, на окремі об'єми, завбільшки з піщинку, і звести отже задачу до задачі твердих сфер, розглядаючи самі піщинки як непровідні кульки, а уявні об'єми вологи як провідні.

На прикладі модельного ґрунту досліджено його провідність залежно від об'ємної частки електроліту. Визначено найбільш можливі механізми провідності, а також те, що провідність тонких шарів піску значно відрізняється від провідності суцільного його об'єму, що створює специфічні умови катодного захисту металу в ґрунті у випадку щілинної корозії, щілинних порушень ізоляції тощо.

1. Эфрос А. Л. Физика и геометрия беспорядка. М.: Наука, 1982. 176 с.
2. Стрижевский И. В., Зиневич А. М., Никольский К. К. и др. Защита металлических сооружений от подземной коррозии. М.: Недра, 1981. 293 с.
3. Сборник руководящих материалов по защите городских подземных трубопроводов от коррозии. Л.: Недра, 1987. 406 с.

**RESEARCH OF FEATURES OF THE MOIST SOIL CONDUCTIVITY****M. Yelizarov**

*Kremenchuk State Polytechnic University, Physic Department  
Pershotravneva Str., 20, UA-39600 Kremenchuk, Ukraine  
e-mail: yel@bigmir.net*

Soil conductivity depending on volume part of electrolyte has been investigated by the example of model soil. Most likely mechanisms of conductivity are determined. Conductivity of thin layers of a soil considerable differs from the same of entire volume of a soil, there is why specific conditions for cathode protection of metal in a soil arises in case of the crevice corrosion, isolation cracking etc.

*Key words:* soil, corrosion, conductivity.

Стаття надійшла до редколегії 09.06.2008

Прийнята до друку 17.05.2006