

УДК 621.313

П.Ф. Буданов, А.М. Чернюк

Українська інженерно-педагогічна академія, Харків

## МОДЕЛЬ ПЕРКОЛЯЦІЇ ПРОВІДНОСТІ ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОЛІТИЧНОГО ЗАЗЕМЛЕННЯ

*Розглянутий процес зниження величини питомого опору ґрунту залежно від об'ємних концентрацій електроліту при протіканні через пористу структуру неоднорідного середовища ґрунту і показано, що існують деякі оптимальні значення об'ємної концентрації електроліту при яких питомий опір ґрунту досягає мінімальних значень, а електропровідність ґрунту – максимальних значень. Показано, що для забезпечення іонної провідності електроліту, тобто утворення каналів перколювань провідності в пористій структурі неоднорідного середовища ґрунту від діелектричної до фази, що проводить, проводиться на основі фазового переходу перколяції.*

**Ключові слова:** іонна провідність, перколяція, нескінченний кластер перколяції, пориста структура неоднорідного середовища ґрунту, питомий опір ґрунту.

### Вступ

#### Постановка проблеми і аналіз публікацій.

При експлуатації озброєння і військової техніки особлива увага приділяється питанням електробезпеки. Нині штатні заземлителі пересувних електроустановок що перебувають на озброєнні, навіть при значних трудовитратах на їх монтаж, не забезпечують нормований опір заземлення в ґрунтах з високим питомим опором [1].

Ґрунти будь-якого роду – пісок, глина, чорнозем – в абсолютно сухому стані мають великий питомий опір (понад  $10^4$  Ом·м), тобто є практично непровідниками струму. Таким чином, проблема зниження питомого опору ґрунту, який значною мірою визначається властивостями його неоднорідного середовища є актуальною.

Загальний опір заземлення залежить від опору прилеглих до заземлителя шарів ґрунту. Тому можна добитися зниження опору заземлення понижен-

ням питомого опору ґрунту лише в невеликій області навколо заземлителя [2 – 4].

Сьогодні з цією метою, в місцях з високим питомим опором ґрунту  $\rho$ , застосовують різні методи штучного зниження  $\rho$ . При цьому зменшуються кількість заземлителів і розміри території, на якій повинні розташовуватися заземлителі.

Штучне зниження питомого опору ґрунту досягається або хімічним шляхом за допомогою електролітів, або шляхом укладання заземлителів в котловани з насипним вугіллям, коксом, глиною.

Досвід показав, що максимальне зменшення опору заземлення досягається при використанні різних електролітів. Такий спосіб полягає в тому, що навколо заземлителів ґрунт просочується різними розчинами електроліту: хлористого натрію, хлористого кальцію, сірчанокислої міді (мідного купоросу) і т.д.

У зв'язку з цим, в роботі [4], авторами було запропоновано використовувати переносні електролі-

тичні заземлителі (ЕЗ), призначені для використання в різних грунтах, що мають високий питомий опір, без застосування спеціальної техніки і насипного ґрунту.

У роботах [2, 3] авторами експериментально досліджувалися особливості роботи переносних електролітичних заземлителів (ПЕЗ). При цьому були визначені і математично описані явно виражені форми (у вигляді параболи) локального неоднорідного об'ємного тіла електроліту в ґрунті в місцях заземлення. Ці дослідження дозволили отримати форму об'ємного тіла електроліту в динаміці збільшення об'єму електроліту в ґрунті.

У роботах [2, 3], авторами було встановлено, що при протіканні електроліту через ґрунт утворюється локальна неоднорідність в місці заземлення, яка характеризується і залежить від ряду чинників: об'єму і концентрації електроліту; структури і властивостей ґрунту (складом, наявністю неоднорідностей); стану ґрунту). Необхідно відмітити, що в ході експерименту не було дано теоретичних пояснень про неоднорідну форму об'ємного тіла електроліту в ґрунті.

**Метою статті** є дослідження процесу електролітичного заземлення в пористій структурі неоднорідного середовища ґрунту з використанням теорії протікання (перколяції).

### Основний матеріал

Розглянемо процес зниження величини питомого опору ґрунту залежно від об'ємних концентрацій при протіканні електроліту через його пористу структуру неоднорідного середовища.

Як відомо, основним провідником струму в ґрунті є електроліт, що має іонну провідність, т.е. заряди в ньому переносяться іонами, що утворилися в результаті електричної дисоціації (розпаду) молекул солей, кислот і підстав при розчиненні їх у воді. Під впливом електричного поля в розчині електроліту виникає спрямоване переміщення іонів до електродів, що і обумовлює провідність ґрунту.

При цьому, чим більше переноситься іонів в одиницю часу через одиницю площі (при даних напруженості поля і температурі розчину), тим більше струм, тобто тим вище провідність ґрунту. Звідси можна зробити висновок: чим більше в ґрунті міститься об'єму електроліту, тим менше буде його питомий опір  $\rho$ . Проте ця закономірність справедлива лише в певних межах. Так, при високій концентрації іонів в ґрунті, що відповідає високій об'ємній концентрації електроліту ( $V_{c \max}$ ) в ґрунті, відстані між іонами виявляються невеликими; це призводить до зростання сил міжіонного тяжіння, зниження швидкості переміщення іонів за рахунок гальмівної дії цих сил, а в результаті до зростання питомого опору ґрунту.

При низькій концентрації іонів, що відповідає низькій об'ємній концентрації електроліту ( $V_{c \min}$ ) в ґрунті, гальмівна роль міжіонних зв'язків практично відсутня і іони переміщуються з більшою швидкістю. Проте число іонів, що проходять через одиницю площі за деякий відрізок часу, може бути дуже невеликим, що також свідчить про зростання питомого опору ґрунту.

Таким чином, для неоднорідного середовища ґрунту існують деякі оптимальні значення об'ємної концентрації електроліту  $V_c$ , тобто  $V_{c \min} \leq V_c \leq V_{c \max}$ , при яких питомий опір ґрунту  $\rho$  досягає  $\min$ , а електропровідність ґрунту  $\sigma - \max$ . Таке завдання вирішується, якщо забезпечується іонна провідність електроліту, тобто забезпечуються канали провідності для молекул електроліту в пористій структурі неоднорідного середовища ґрунту від діелектричної до фази ґрунту, що проводить (рис. 1).

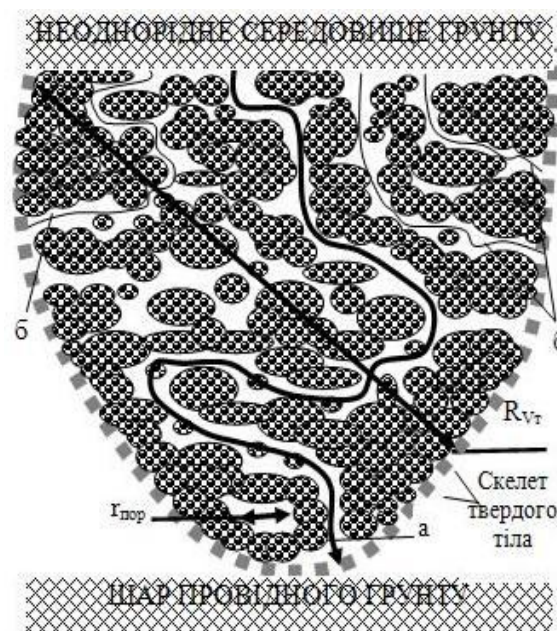


Рис. 1. Пориста структура неоднорідного ґрунту

**1. Проведення досліджень основних характеристик пористої структури неоднорідного середовища ґрунту.** Для розуміння процесу утворення каналів іонної провідності розглянемо основні структурні характеристики пористого неоднорідного середовища ґрунту. Загальною характерною ознакою пористої структури неоднорідного середовища ґрунту є наявність порожнеч в об'ємному твердому тілі (рис. 1). Порожнечі, як і скелет твердого тіла, можуть мати складну форму і різні геометричні розміри. Порожнечі можуть бути виключно малими – пори, сумірними з розмірами молекул або дуже великими – пустотні простори (каверни).

Таким чином, неоднорідне середовище ґрунту є пористою об'ємною структурою, що містить в достатній кількості порожнечі, характерний розмір яких

$r_{пор}$  малий порівняно з характерним розміром об'ємного тіла  $R_v$ .

Крім того, пори в неоднорідному середовищі ґрунту можуть бути такими, що повідомляються (рис. 1, а) або не повідомляються або (тупиковими (рис. 1, б)).

Частина порового простору, що взаємоповідомляється, є ефективним поровим простором структури неоднорідного середовища ґрунту (рис. 1, а).

Закономірності перенесення речовини в пористих тілах визначаються структурними характеристиками об'ємного тіла. Складність і різноманітність структури пористих матеріалів викликає необхідність в створенні моделей провідності пористих тел. Найбільш простою моделлю пористого тіла є статистичні моделі, які показують що доцільно розглядати пори не лише як об'ємно-структурні, але і як фазово-структурні неоднорідності ґрунту.

Поняття пористості безпосередньо пов'язане з уявленнями про вільний об'єм  $V_{св}$  і проникність.

Вільний об'єм ( $V_{св}$ ) визначається в неоднорідному об'ємному твердому тілі як незаповнений атомами (молекулами електроліту) простір з близькою до нульовою електронною щільністю.

Характер розподілу вільного об'єму обумовлений мірою просторової однорідності упаковки атомів (молекул електроліту).

Так, геометричний вільний об'єм  $V_{геом.}$  характеризує об'єм, який займає в твердому тілі фаза "порожнечі"

$$V_{геом.} = V - \sum \omega, \quad (1)$$

де  $V$  – повний об'єм твердого тіла;  $\sum \omega$  – сумарний власний об'єм молекул.

В цьому випадку пору можна розглядати як локальне виділення вільного об'єму, що має визначені формою, місцем локалізації і розмірами, що істотно перевищують міжатомні відстані речовини матриці.

Тоді відношення сумарного об'єму  $V-V_k$ , займаного в тілі фазою "порожнечі", до повного об'єму тіла характеризує об'ємну долю (у процентному вираженні – об'ємну концентрацію) пір, або пористість  $C$  тіла :

$$C = (V - V_k) / V. \quad (2)$$

де  $V_k$  – об'єм компактного тіла.

Необхідно, відмітити, що величиною зворотної пористості, являється міра заповнення. Як  $V_k$  приймається об'єм компактного тіла, ідентичного по масі і хімічному складу тілу, що містить пори. Якщо  $\sum \omega / V = K_{уп}$  – коефіцієнт упаковки молекул, то відносний геометричний вільний об'єм є величиною  $V_{геом.} = 1 - K_{уп}$ .

У роботі [2, 3], авторами була досліджена форма і об'єм електролітичного тіла і отримані результати, які з урахуванням вище сказаного дозволяють

зробити введення про те, що об'єм компактного тіла  $V_k$  має форму параболи і залежить від об'єму електроліту  $V_{ел.}$ , що протікає через пористу структуру неоднорідного середовища ґрунту, тобто від сумарного власного об'єму молекул електроліту  $\sum \omega$ .

Проникність пористої структури є важливою фізичною властивістю, яка дозволяє електроліту переміщатися через пори, що повідомляються між собою, без порушення або зміщення часток ґрунту. Високу або низьку проникність ґрунту визначає в основному розмір пір і їх взаємозв'язок. Ґрунти розрізняються дуже широким діапазоном розмірів окремих пір, а також розташуванням їх один відносно одного. Із зменшенням розміру зерен пористість зростає, а завдяки великій звивистості відносна проникність такої системи зменшується. Ґрунти з великими порами і низькою пористістю (гравелісти, піщани, легені супіщани) мають найвищу фільтраційну здатність.

У таких ґрунтах електроліти (хімічні розчини) швидше просуваються углиб і досягають ґрунтових вод, що призводить до зниження питомого опору  $\rho$  і забезпечує високу питому провідність  $\sigma$ . В той же час ґрунти з маленькими порами і високою пористістю (глинисті, важкі суглинні) мають низьку фільтраційну здатність, в них електроліт локалізується в місці протікання. На рис. 2. показаний розподіл пір по діаметрах. Числові мітки у кривих розподілу відповідають глибині залягання певних шарів неоднорідного ґрунту.

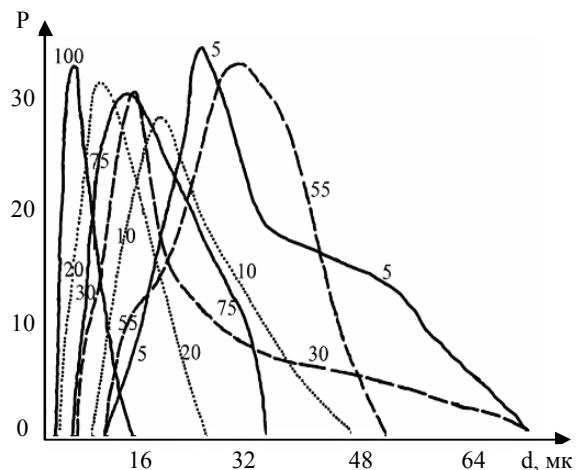


Рис. 2. Розподіл пір за діаметрами

У роботі для дослідження проникності пористої структури об'ємного електролітичного тіла ґрунту були досліджені фракції піску з діаметром частин від 0,2 до 1,4 мм. Серед вивчених фракцій найбільшу проникність мають фракції крупнозернистого піску з діаметром  $d$  від 0.6 до 1.4 мм. Також було встановлено, що проникність електроліту через структуру об'ємного тіла не залежить від його концентрації і виду.

Дослідження пористості об'ємного тіла, показали, що на відміну від проникності пористість залежить не лише від властивостей середовища, але і від типу електроліту.

**2. Дослідження процесу провідності в структурі перколяції.** Пояснимо процес утворення іонних каналів провідності для молекул електроліту в пористій структурі неоднорідного середовища ґрунту від діелектричної до фази ґрунту, що проводить, на основі фазового переходу перколяції [5].

Процес утворення струмопровідних шляхів що сполучають діелектричний і такий, що проводить шари ґрунту при протіканні електроліту через його структуру, складається з твердих часток і порового простору (об'єму) полягає в утворенні кластера перколяції.

Електроліт, згідно теорії перколяції [5], протікаючи через структуру ґрунту заповнює пори і таким чином утворює хоч би один струмопровідний шлях перколяції, що сполучає шар ґрунту – діелектрика і ґрунту – провідника.

Як відомо [5], природу перколяції мають процеси проходження рідин через пористу нерухому фазу, тому в роботі, авторами було запропоновано, для моделювання процесу протікання (просочування) електроліту через пористу структуру неоднорідного ґрунту використовувати теорію перколяції, відповідно до якої, структуру електролітичного ґрунту можна представити у вигляді стохастичної системи, що складається з тієї, що проводить і непровідної (діелектричною) фази і що утворюють так званий нескінченний кластер (рис. 3).

Відомо [5], що в теорії перколяції об'єкт дослідження – це двофазне середовище, в якому випадково розподілена та, що проводить і непровідна (діелектрична) фази, а незалежним параметром є концентрація фази  $x$ , що проводить, яка є вірогідністю того, що пора з молекулами електроліту буде такою, що проводить, тоді для об'ємного електролітичного тіла  $x_{от}$  визначається виразом (4):

$$x_{от} = \frac{N_{пор.эл.}}{N_0}, \quad (4)$$

де  $N_{пор.эл.}$  – число пір, що проводять, в об'ємі електролітичного тіла ґрунту;  $N_0$  – загальне число пір в об'ємі електролітичного тіла ґрунту.

Виходячи з вище розглянутих міркувань витікає, що при  $x_{от} = 0$  структура об'ємного електролітичного тіла не є такою, що проводить, а при  $x_{об.эл.т} = 1$  – що проводить. Звідси витікає, що існує критична вірогідність або поріг протікання  $x_{от} = x_c$  в інтервалі  $0 < x_c < 1$ , при якому відбувається перехід пористої структури неоднорідного середовища ґрунту з діелектричної у фазу (рис. 3), що проводить.

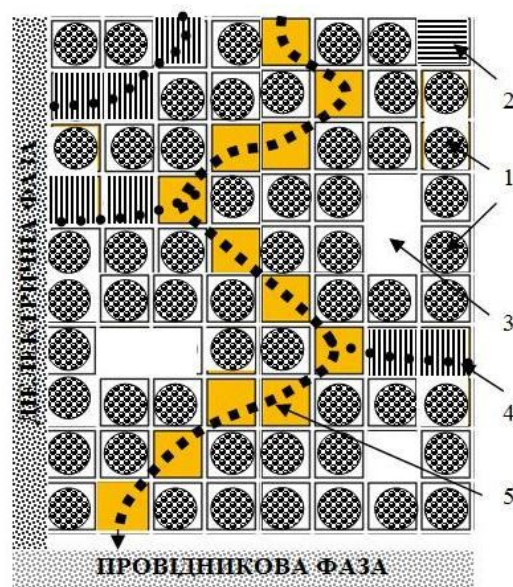


Рис. 3. Схема утворення каналу перколяції, що проводить, при протіканні електроліту через пористу структуру об'ємного тіла неоднорідного середовища ґрунту: 1 – тверді частки (0.05...1.0 мкм); 2 – окрема ізолювана пора, заповнена молекулами електроліту; 3 – вільний поровий простір (без електроліту); 4 – тупикові (мертві) канали; 5 – канал перколяції, що проводить

Знання критичної концентрації  $x_c$  (порогу протікання), нижче за яку протікання відсутнє, є важливим прикладним значенням теорії перколяції при моделюванні фізичних процесів перенесення.

Для об'ємного електролітичного тіла, в якому число пір дуже велике, поріг протікання  $\square$  визначається виразом (5):

$$x_c = \lim_{N_0 \rightarrow \infty} x_c(N_0). \quad (5)$$

Таким чином, вираз (5) є основним затвердженням теорії перколяції, а поріг протікання є величиною постійної  $x_c = \text{const}$  для структури об'ємного електролітичного тіла і розмірності його простору.

Експериментальні дослідження, проведені авторами в роботі показали, що зважаючи на випадковий характер заповнення пір електролітом, в кінцевій системі чітко певного порогу (розміру критичного кластера) не існує, а є так звана критична область значень, в яку потрапляють значення порогу перколяції, отримані в результаті різних випадкових реалізацій.

Із збільшенням розмірів об'єму електролітичного тіла критична область може звузитися в точку (рис. 4, 5).

Необхідно відмітити, що важливу роль при описі такої системи грає саме зв'язуючий кластер перколяції, який пронизує усю структуру об'ємного електролітичного тіла і зв'язуючи усі заповнені електролітом пори забезпечуючи тим самим провідність пористої структури об'ємного тіла як цілого (рис. 1, 3).

Для розробки моделі перколяції провідності електролітичної об'ємної структури, авторами запропоновано виходити з того, що згідно теорії перколяції, провідність такої стохастичної двофазної системи визначається вірогідністю  $P(x_{об.ел.т})$  того, що випадково заповнена пора електролітом належить нескінченному сполучаючому кластеру перколяції.

На початку розглянемо характер зміни функції  $P(x_{об.ел.т})$  поблизу порогу протікання  $x_c$ .

Як видно з графіку на рис. 4, залежність вірогідності  $P(x_{об.ел.т})$  поблизу критичної точки  $x_c$  є лінійною тобто  $P(x_{об.ел.т}) \sim (x_{об.ел.т} - x_c)$ .

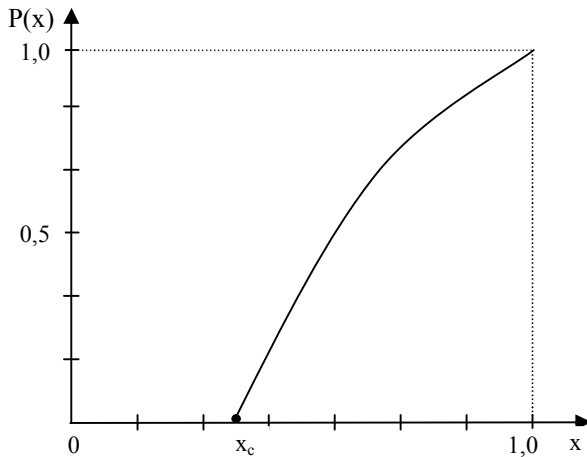


Рис. 4. Графік залежності вероятности вблизи критической точки

Далі проаналізуємо вірогідність  $P_{БК}(x_{пор})$  того, що випадково заповнена електролітом пора належить нескінченному сполучаючому кластеру перколяції.

$$P_{БК}(x_{пор}) = \frac{N_{пор.БК}}{N_0}, \quad (6)$$

де  $N_{пор.БК}$  – кількість пір з молекулами електроліту що входять в сполучаючий кластер перколяції.

З виразу (6) виходить, що пора заповнена електролітом є елементом, що проводить, і при цьому пов'язана з нескінченним кластером, який складається з елементів, що проводять, – пір  $(N_{пор.БК})$ .

Тоді вірогідність протікання електроліту  $P(x_{об.ел.т})$  через усю структуру об'ємного електролітичного тіла при переході до нескінченної системи і  $N_0 \rightarrow \infty$ ,  $N_{порБК} \rightarrow \infty$  визначається виразом (7):

$$P(x_{об.ел.т}) = \lim_{N_0 \rightarrow \infty} P_{БК}(x_{пор}). \quad (7)$$

З виразу (7) виходить, що вірогідність протікання  $P(x_{об.ел.т})$  визначається щільністю заповнення пір електролітом, а, отже, і щільністю усього БК,

тобто є основною характеристикою БК.

По фізичному сенсу, виникнення БК об'ємного електролітичного тіла є фазовим переходом другого роду, і параметром порядку що утворюється в результаті такого переходу являється потужність або щільність БК ( $P_{ПК}$ ) – тобто вірогідність довільної пори з молекулами електроліту структури об'ємного тіла належати створившійся перколяції БК.

Тоді для об'ємного електролітичного тіла величина  $P(x_{об.ел.т})$  і  $P_{ПК}$  поблизу критичної точки  $x_c$  змінюється статечним чином відповідно до виразу (8):

$$P_{ПК} = P(x_{об.ел.т}) \sim (x_{об.ел.т} - x_c)^\beta, \quad (8)$$

де  $\beta$  – критичний показник перколяції, отриманий в розрахунковим шляхом в чисельних експериментах: при розмірності  $D=3$  для об'ємного тіла  $\beta_{об.т} = 0.4$ .

Розглядаючи структуру БК (рис. 1, 3), автори виходили з того, що розмір геометричного об'ємного тіла  $R_v$  з точки зору масштабів набагато більше за розміром радіусу кореляції  $R_k$ , що є характерним просторовим масштабом структури кластера перколяції об'ємного тіла.

Тоді для об'ємного тіла залежність функції  $R_k(x_{об.ел.т})$  в околиці критичної точки (порогу протікання)  $x_c$  має статечну вигляд і визначається виразом (9):

$$R_k(x_{об.ел.т}) \sim |x_{об.ел.т} - x_c|^v, \quad (9)$$

де  $v$  – індекс радіусу кореляції отриманий чисельними експериментами і залежить від геометричної розмірності; при  $D=3$  для об'ємного тіла  $v = 0,85 \pm 0,05$ .

На основі виразу (9) пояснимо зв'язок розміру об'ємного електролітичного тіла  $R_v$  з радіусом кореляції  $R_k$  БК (рис. 5).

З графіку на рис. 5. видно, що для того, щоб об'ємне електролітичне тіло стало таким, що проводить, нескінченний кластер пір, що проводять, з молекулами електроліту повинен вирости до розмірів найоб'ємнішого тіла  $R_v$ , тобто

$$R_k = R_v.$$

Крім того, якщо відкласти величину  $R_v$  на осі  $R_k$ , то лінія  $R_v - R_k$ , перетинає графік  $R_k(x)$  в двох точках, значення яких відхиляються в обидві сторони від точки  $x_c$  на ширину критичної області  $\Delta x_c$ , тобто інтервал значень, які прийматиме величина порогу протікання  $x_c$  при різних реалізаціях експерименту в структурі об'ємного електролітичного тіла неоднорідного середовища ґрунту.

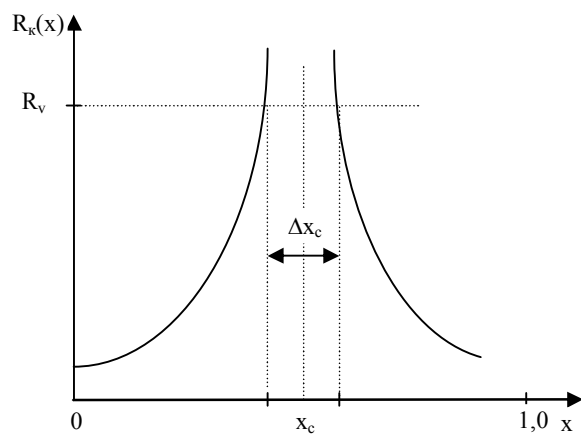


Рис. 5. Графік залежності радіуса кореляції  $R_k$  від вірогідності провідності пір з електролітом

Виходячи з вище за сказане, модель провідності  $\sigma$  пористої структури неоднорідного середовища ґрунту визначається виразом (10):

$$\sigma = f(x_c, R_k), \quad (10)$$

т.е., модель провідності  $\sigma$  необхідно розглядати як функції від об'ємної концентрації електроліту  $x_c$  і розміру об'ємної структури кластера  $R_k$  перколяції для просторів розмірності Евкліда  $3 > d > 2$ .

### Висновки

1. Існує критична концентрація електроліту  $x_c$  ( $0 < x_c < 1$ ) при якій уперше виникає сполучаючий (нескінченний) кластер.

2. Провідність пористої структури неоднорідного середовища ґрунту необхідно розглядати як функції від критичної об'ємної концентрації електроліту і розміру структури об'ємного тіла для просторів розмірності Евкліда.

### Список літератури

1. Иванов В.Г. Электролитичні заземлителі. Переваги і перспективи використання / В.Г. Иванов, А.М. Чернюк // Энергетика і електрифікація, №6, 2007, с.23-29.
2. Чернюк А.М. Обґрунтування початкових положень для дослідження характеристик багатощарової структури електролітичний заземлитель-ґрунт / А.М. Чернюк // Наукові праці ДонНТУ. – 2010. – Вип. 169. – С. 166-171.
3. Визначення форми об'ємного тіла електроліту в ґрунті при роботі переносних електролітичних заземлювачів // Збірник наукових праць ХУПС. – Х.: ХУПС, 2012. – Вип. 1(30). – С. 131-134.
4. Артюх С.Ф., Иванов В.Г., Мезеря А.Ю., Чернюк А.М., Колобродов С.О. Патент на корисну модель №46648 Переносний електролітичний заземлювач 25.12.2009р.
5. Тарасевич Ю.Ю. Перколяція: теорія, додатки, алгоритми / Ю.Ю. Тарасевич. – М.: Едиторіал УРСС, 2002. – 112 с.

Надійшла до редколегії 25.04.2012

Рецензент: д-р техн. наук Г.І. Канюк, Українська інженерно-педагогічна академія, Харків.

### МОДЕЛЬ ПЕРКОЛЯЦИИ ПРОВОДИМОСТИ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ЗАЕМЛЕНИЯ

П.Ф. Буданов, А.М. Чернюк

Рассмотрен процесс снижения величины удельного сопротивления ґрунта в зависимости от об'ємных концентраций электролита при протекании через пористую структуру неоднородной среды ґрунта и показано, что существуют некоторые оптимальные значения об'ємной концентрации электролита при которых удельное сопротивление ґрунта достигает минимальных значений, а электропроводность ґрунта – максимальных значений. Показано, что для обеспечения ионной проводимости электролита, т.е. образования перколяционных каналов проводимости в пористой структуре неоднородной среды ґрунта от диэлектрической до проводящей фазы проводится на основе перколяционного фазового перехода.

**Ключевые слова:** ионная проводимость, перколяция, бесконечный кластер перколяции, пористая структура неоднородной среды почвы, удельное сопротивление почвы.

### MODEL OF PERKOLYACII OF CONDUCTIVITY OF PROCESS OF ELECTROLYTIC GROUNDING

P.F. Budanov, A.M. Chernyuk

Considered process of decline of size of specific resistance of soil depending on the by volume concentrations of electrolyte at flowing through the porous structure of heterogeneous environment of soil and it is shown that some optimal values of by volume concentration of electrolyte are at which specific resistance of soil arrives at minimum values, and conductivity of soil - maximal values. It is shown that for providing of ionic conductivity of electrolyte, id est formation of channels of percolating of conductivity in the porous structure of heterogeneous environment of soil from dielectric to the phase which conducts, conducted on the basis of phase transition of percolating.

**Keywords:** ionic conductivity, percolation, endless cluster of percolation, porous structure of heterogeneous environment of soil, specific resistance of soil.