

Elektroosmotyczne osuszanie gruntu w warunkach pola jednorodnego; próba ujęcia teoretycznego

*Janusz Haurylkiewicz
Politechnika Koszalińska*

1. Wstęp

Melioracja geotechniczna jest ulepszaniem podłoża gruntowego, najczęściej ze względu na posadowienie budowli. Jednym z dość skutecznych sposobów jest wykorzystanie zjawiska elektroosmozy. Jest to zjawisko elektrokinetyczne polegające na powodowaniu przepływu wody w gruncie przez pole elektryczne nałożone na określoną część ośrodka gruntowego (por. [2,6,7]). Zazwyczaj pole to ma stały w czasie gradient potencjału, a pod względem geometrii zbliżone jest do jednorodnego lub – rzadziej – do osiowosymetrycznego (por. [8]).

Wykorzystanie elektroosmozy do osuszania gruntów praktykowane jest w geotechnice od dawna (por. [1,3,4,5,8]) i od dawna znane są procedury obliczeniowe przydatne w planowaniu i projektowaniu instalacji elektroosmotycznych. Cechą charakterystyczną tych procedur jest zakładanie stałej oporności właściwej ośrodka gruntowego i przyjmowanie parametrów procesu osuszania (zarówno wynikowych, jak i pośrednich) na podstawie doświadczeń firm meliorujących w analogicznych warunkach geotechnicznych (por. [1]).

W dostępnej autorowi literaturze przedmiotu brak wykładu jednolitego podejścia teoretycznego, które mogłoby wesprzeć wspomniane wyżej podejście praktyczne. Chodzi tu zwłaszcza o zmiany oporności podczas elektroosmozy, uwzględnianie początkowych i końcowych wartości określonych parametrów osuszanego gruntu, zmiany parametrów pola elektrycznego i wpływu wody w czasie itp.

Celem niniejszej pracy jest zaproponowanie dość prostego teoretycznego ujęcia elektroosmotycznej melioracji gruntu, które pozwoliłoby na prognozowanie przebiegu i efektów elektroosmozy na podstawie określonych paramet-

trów wejściowych do obliczeń. W dalszych rozdziałach precyzuje się założenia przyjęte w rozwiązaniu, przedstawi się model procesu, przeprowadzi się analizy teoretyczne odnoszące się do zagadnienia płaskiego i przedstawi się wyniki teoretycznych obliczeń najważniejszych technologicznych parametrów elektroosmozy w trzech wariantach sieci elektrycznej.

2. Założenia

W prezentowanym rozwiązaniu teoretycznym zakłada się, że:

- a) ośrodek gruntowy przed wprowadzeniem pola elektrycznego jest jednorodny i izotropowy pod względem przewodnictwa elektrycznego,
- b) w gruncie osuszonym są trzy jego składniki – szkielet, woda i powietrze,
- c) woda gruntowa posiada dodatni ładunek elektryczny,
- d) powstanie w gruncie gradientu potencjału elektrycznego powoduje natychmiastowy ruch wody gruntowej przez ośrodek od anody do katody, skąd jest ona bieżąco odprowadzana poza obszar objęty melioracją,
- e) grunt charakteryzuje się dwiema wartościami oporności właściwej: początkową ρ_p i końcową ρ_k , przy czym wartości te związane są jednoznacznie z początkową i końcową wilgotnością gruntu,
- f) prędkość filtracji elektroosmotycznej v wyraża się wzorem

$$v = k_e i_e, \quad (1)$$

gdzie:

k_e – współczynnik filtracji elektroosmotycznej [$\text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$],

i_e – gradient potencjału elektrycznego obliczany jak stosunek różnicy potencjału ΔU do odległości Δx , na której ta różnica występuje [V m^{-1}],

- g) rzeczywista prędkość przepływu wody w procesie elektroosmozy wyraża się wzorem

$$u = \frac{v}{n_e}, \quad (2)$$

gdzie:

n_e – porowatość efektywna, tj. część jednostkowej objętości porowej zajęta przez filtrującą wodę [-],

- h) efekty hydrauliczne pola naprężeń mechanicznych są pomijalnie małe w porównaniu z efektami pola elektrycznego; inaczej mówiąc, prędkość filtracji powodowana spadkiem hydraulicznym (zgodnie z prawem Darcy) jest

do pominięcia w porównaniu z prędkością filtracji powodowanej spadkiem potencjału elektrycznego,

- i) ewentualne procesy elektrochemiczne nie mają znaczącego wpływu na przebieg filtracji elektroosmotycznej, w szczególności na współczynnik filtracji k_e , na gradient i_e , oraz na porowatość efektywną n_e .

3. Model procesu w zagadnieniu płaskim

W zagadnieniu tym anody i katody rozmieszczone są na przemian równoległymi rzędami tak gęsto w rzędach, że pole elektryczne między rzędem anod i rzędem katod jest praktycznie jednorodne, tj. pomijalne są niejednorodności pola występujące przy elektrodach (Rys. 1). Zgodnie z założeniem (d) jednocześnie z przyłożeniem gradientu pola między rzędami elektrod w gruncie rozpoczyna się przepływ wody ku katodzie. W konsekwencji w pewnym momencie t proces elektroosmozy nie występuje już na odległości x od anody (średnicę anody pomija się), a ogranicza się do zakresu $s-x$. Obwód elektryczny modelujący analizowany obszar gruntu przedstawia Rys. 1c, gdzie opory R_k i R_p odpowiednio brył gruntu osuszonego i nieosuszonego (na odcinkach x i $s-x$) wyrażają się standardowym wzorem na opór przewodnika

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (3)$$

gdzie:

ρ – oporność właściwa materiału,

l – długość przewodnika,

S – pole przekroju poprzecznego przewodnika.

4. Wyznaczenie gradientu potencjału elektrycznego

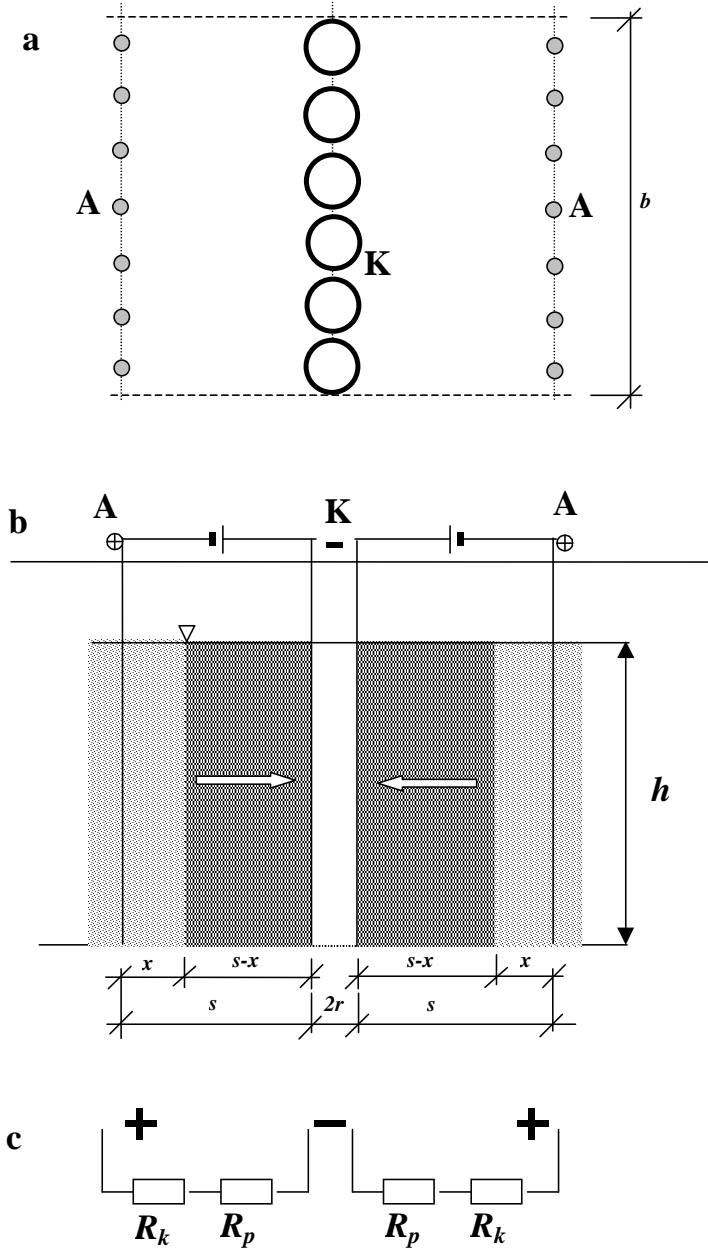
Przyjmując oznaczenia wg rys. 1:

opór bryły gruntu osuszonego

$$R_k = \rho_k \frac{x}{bh}, \quad (4)$$

opór bryły gruntu nieosuszonego

$$R_p = \rho_p \frac{s-x}{bh}, \quad (5)$$



Rys. 1. Liniowy układ anod (A) i katod (K); a – plan, b – przekrój, c – schemat obwodu elektrycznego

Fig. 1. Linear anodes (A) and cathodes (K) system, a – plan, b – section, c – pattern of electrical circuit

Korzystając z elementarnych związków zachodzących w obwodzie elektrycznym otrzymuje się:

- opór zastępczy bryły gruntu między rzędem anod i rzędem katod (połączenie szeregowo):

$$R_z = \frac{\rho_p}{bh}(px + s), \quad (6)$$

- natężenie prądu w obwodzie (pomija się opór wewnętrzny instalacji i źródła prądu):

$$I = \frac{Ubh}{\rho_p(px + s)}. \quad (7)$$

- spadek potencjału na części gruntu z czynnym procesem elektroosmozy:

$$\Delta U = I R_p = \frac{U(s - x)}{px + s}. \quad (8)$$

- gradient potencjału elektrycznego, zgodnie z objaśnieniem do wzoru (1):

$$i_e = \frac{\Delta U}{s - x} = \frac{U}{px + s}, \quad (9)$$

gdzie przez

$$p = \frac{\rho_k - \rho_p}{\rho_p} \quad (10)$$

oznaczono względny przyrost oporności właściwej gruntu (względem oporności początkowej) spowodowany osuszeniem.

5. Prędkość przepływu wody

Rzeczywistą prędkość przepływu wody w strefie osuszanej zgodnie z założeniami (f) i (g) – wzory (1) i (2) – otrzymuje się po podstawieniu do nich wyrażenia (9):

$$u = \frac{k_e U}{n_e (px + s)}. \quad (11)$$

Zgodnie z założeniem (d) wielkość u jest jednocześnie prędkością

$$u = dx / dt, \quad (12)$$

(gdzie t – czas liczony od momentu przyłożenia pola elektrycznego do gruntu) przemieszczania się (od anody ku katodzie) pionowej płaszczyzny granicznej oddzielającej obszar czynnej elektroosmozy od obszaru, w którym elektroosmoza się już zakończyła, stąd:

$$dx = \frac{k_e U}{n_e (px + s)} dt \quad (13)$$

oraz

$$dt = \frac{n_e (px + s)}{k_e U} dx. \quad (14)$$

6. Objętość przepływu i objętość wody zebranej

Wydatek wody (objętość przepływu) w pewnym momencie odpowiada-
jącym położeniu płaszczyzny granicznej w odległości x od rzędu anod

$$Q = v b h = \frac{k_e U b h}{px + s}, \quad (15)$$

a objętość wody zebrana w rzędzie katod w ciągu czasu dt :

$$dV_w = v b h dt = \frac{k_e U b h}{px + s} dt. \quad (16)$$

Objętość ta wyrażona jest tu w zależności od dwóch zmiennych x i t związa-
nych wzorem (12), więc także (wykorzystując wzór (2)):

$$dV_w = v b h dx / u = n_e b h dx. \quad (17)$$

Całkowita objętość wody zebranej w rzędzie katod w procesie osuszenia całej bryły gruntu między anodami i katodami (całkując wyrażenie (17) po x od 0 do s) wynosi:

$$V_w = n_e b h s. \quad (18)$$

7. Czas osuszania

Czas T_x osuszania bryły gruntu na odcinku x wynika ze wzoru (14), skąd całkując (od 0 do x) otrzymuje się:

$$T_x = \frac{n_e (0,5 p x^2 + s x)}{k_e U}. \quad (19)$$

Czas T_s osuszania całej bryły gruntu (na odcinku s) odpowiada wartości $x = s$, zatem:

$$T_s = \frac{n_e s^2 (0,5 p + 1)}{k_e U}. \quad (20)$$

Wzór (19) umożliwia też określenie zasięgu x osuszenia bryły gruntu, gdy dany jest czas T_x działania elektroosmozy. Z rozwiązania wyrażenia (19) względem x otrzymuje się:

$$x = \frac{s}{p} \left(\sqrt{1 + \frac{2 p k_e T_x U}{n_e s^2}} - 1 \right). \quad (21)$$

8. Tempo elektroosmozy

Przez tempo elektroosmozy rozumie się w praktyce różne wielkości: dopływ wody do rzędu katod, prędkość zmniejszania się średniej wilgotności między rzędami elektrod, prędkość zmniejszania się szerokości bryły gruntu nieosuszonego, prędkość przemieszczania się granicy między osuszoną i nieosuszoną bryłą gruntu. Tutaj przyjęto to ostatnie znaczenie tempa elektroosmozy. W zagadnieniu płaskim jest ono równoważne prędkości przepływu wody u .

Tempo elektroosmozy wyrażać można w zależności od jej zasięgu x , jak to przedstawia wzór (11) ale otrzymane wyrażenie (21) pozwala na wyrażenie tempa elektroosmozy jako funkcji czasu osuszania T_x bryły o szerokości x .

Z podstawienia do wzoru (11) w miejsce x wyrażenia we wzorze (21) i po prostych przekształceniach otrzymuje się:

$$u = \frac{dx}{dt} = \frac{k_e U}{n_e s \sqrt{1 + \frac{2pk_e T_x U}{n_e s^2}}} . \quad (22)$$

Ze wzoru (11) należy korzystać dla określenia tempa elektroosmozy na granicy (bryły osuszonej) oddalonej o x od rzędu anod, natomiast ze wzoru (22) – dla określenia tego tempa dla określonego momentu po włączeniu procesu elektroosmozy.

9. Moc i praca prądu

Moc rozwijana w procesie elektroosmozy na jednym polu między rzędami anod i katod (wykorzystując wzór (7)):

$$P = UI = \frac{U^2 bh}{\rho_p (px + s)} \quad (23)$$

Jak wynika z powyższego wyrażenia, moc prądu maleje wraz z postępowaniem elektroosmozy.

Praca prądu w czasie dt i na odcinku dx postępu elektroosmozy (wykorzystując wzór (14)):

$$dL = P dt = \frac{n_e}{\rho_p k_e} Ubh dx . \quad (24)$$

Jak wynika z powyższego wyrażenia, ilość pracy prądu potrzebnej do osuszenia odcinka dx (stosunek dL / dx) nie zależy od x – jest stała w ciągu procesu. Całkując (24) otrzymuje się pracę potrzebną do osuszenia pola o szerokości x (licząc od rzędu anod):

$$L_x = \frac{n_e}{\rho_p k_e} Ubh x , \quad (25)$$

oraz pracę potrzebną do osuszenia całego pola o szerokości s :

$$L_s = \frac{n_e}{\rho_p k_e} U b h s, \quad (26)$$

Jeśli osuszane pole ma w rzucie kształt prostokąta o wymiarach b i l , a rzędy elektrod są założone równoległe do boku o długości b w rozstawie $s+r$, to liczba N pól jednokierunkowego przepływu prądu wyniesie:

$$N = \frac{l}{s+r}, \quad (27)$$

a praca nad osuszeniem całego pola będzie równa

$$L_c = N L_s = \frac{n_e}{\rho_p k_e} b h l \frac{U}{1 + \frac{r}{s}}. \quad (28)$$

Powyższe wyrażenie zapisano eksponując zwiększonymi odstępami trzy czynniki: pierwszy jest parametrem gruntowym (funkcją parametrów gruntu), drugi jest parametrem geometrycznym (objętością osuszanej bryły gruntu), trzeci jest parametrem sieci (funkcją parametrów sieci elektrycznej).

Dwa pierwsze parametry dla danego pola pracy terenowej należy uznać za stałe, trzeci natomiast może być kształtowany przez projektanta procesu elektroosmozy. Dla określonego napięcia sieci widoczny jest wpływ relacji między promieniem katody i rozstawem rzędów elektrod, ale dla konkretnego promienia katody wpływ rozstawu jest znaczący przy stosunku s/r rzędu poniżej 10. Zazwyczaj stosunek s/r jest rzędu ponad 50, i wtedy wartość parametru sieci wynosi 0,98 U , co oznacza, że zmiana rozstawu elektrod przy takim rzędzie wielkości s/r nie wpływa praktycznie na zużycie energii elektrycznej. Należy jednak pamiętać, że zgodnie ze wzorem (20) rozstaw rzędów elektrod wpływa bardzo istotnie na czas osuszania. Czas ten bowiem rośnie wprost proporcjonalnie do wzrostu kwadratu rozstawu. Warto zauważyć, że jest to analogia do proporcjonalnej zależności czasu konsolidacji warstwy gruntu od kwadratu długości drogi jednokierunkowej filtracji.

Poza analizowaną tu wielkością energii elektrycznej potrzebnej do procesu elektroosmozy pozostają wielkości potrzebne na straty w sieci i na pompowanie wody z katod.

10. Przykład obliczeń teoretycznych

Osuszeniu elektroosmotycznemu ma być poddany il tworzący masyw gruntowy w kształcie prostokąta o długości 100 m, szerokości 50 m i miąższości 3 m. Należy zaproponować rzędowy układ elektrod i przedstawić teoretyczne oszacowanie następujących elementów procesu elektroosmozy: objętość wody odprowadzonej z gruntu, czas osuszania, zużycie energii, początkowe natężenie prądu I_o . Parametry gruntu są następujące:

- porowatość efektywna $n_e = 0,35$,
- oporność właściwa gruntu mokrego $\rho_p = 400 \Omega\text{m}$,
- oporność właściwa gruntu osuszonego $\rho_k = 2000 \Omega\text{m}$,
- współczynnik filtracji elektroosmotycznej $k_e = 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{Vs}$,

Elektrody rozmieszczono rzędami równoległymi do boku 50 m, zatem $b = 50 \text{ m}$, $l = 100 \text{ m}$, $h = 3 \text{ m}$, $bh = 15\,000 \text{ m}^3$. Przyjęto katody o promieniu wewnętrznym $r = 0,05 \text{ m}$. Obliczenia wykonano dla trzech kombinacji napięcia sieci U i rozstawu $(s+r)$ rzędów elektrod, jak niżej.

Lp. -	$s+r$ m	s m	U V	T_s doby	L_c kWh	I_o A
1	2	1,95	24	0,19	8,54	4,61
2	4	3,95	12	1,59	4,33	1,14
3	10	9,95	6	20,1	2,18	0,23

Objętość wody odprowadzonej z gruntu jest taka sama w każdym wariantcie i wynosi

$$n_e bhl = 0,35 \cdot 50 \cdot 3 \cdot 100 = 5250 \text{ m}^3.$$

Wartość przeciętną odpływu wody do katod otrzyma się z podzielenia tej objętości wody przez czas osuszania. Chwilowy odpływ jest jednak największy na początku procesu osuszania, jak określa wzór (15) i może znacznie różnić się od przeciętnego.

Obliczenie T_s wykonywano wg wzoru (20), obliczenie L_c – wg wzoru (28), obliczenie I_o – wg wzoru (7) przy $x = 0$.

11. Podsumowanie

1. Zaproponowany model teoretyczny procesu elektroosmozy w zagadnieniu płaskim jest prosty i pozwala na obliczenie najważniejszych parametrów tego procesu.
2. Podane wzory umożliwiają obliczenie nie tylko parametrów zakończonego procesu, ale także parametrów chwilowych, co jest istotne dla zaplanowania organizacji pracy (m.in. dobór pomp).
3. Poza analizą pozostała kwestia rozstawu elektrod w rzędach zapewniającego dostateczne przybliżenie do modelu płaskiego.
4. Wiele parametrów procesu zależy nie od bezwzględnych wartości oporności właściwej gruntu mokrego w stanie pierwotnym i gruntu osuszonego, ale od relacji między tymi wartościami.
5. Energia zużyta na osuszanie określonej bryły gruntu praktycznie nie zależy od rozstawu rzędów elektrod, jeśli ten rozstaw przekracza 25 średnic katody.
6. Rozstaw rzędów elektrod wpływa bardzo istotnie na czas osuszania gruntu.
7. Otrzymane wyniki teoretyczne dokumentują pierwszy etap pracy nad zagadnieniem tytułowym i wymagają koniecznie sprawdzenia doświadczalnego.

Literatura

1. **Bannik G. I.:** Technicheskaja melioracija gruntov; Viszcza Szkoła, Kiev, 1976.
2. **Collins R. E.:** Flow of fluids through porous materials; Reinhold, N.Y., 1961.
3. **Hough B. K.:** Basic soils engineering; Ronald Press, N.Y., 1969.
4. **Keil K.:** Ingenieurgeologie und geotechnik; Knapp, Halle, 1951.
5. **Knaupe W.:** Baugruben – sicherung und wasserhaltung; VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 1979.
6. **Mironenko V. A., Szestakov V. M.:** Osnovy gidrogeomechaniki; Nedra, Moskva, 1974.
7. **Mitchell J. K.:** Fundamentals of soil behavior; Wiley, N.Y., 1993.
8. **Wiłun Z.:** Zarys geotechniki; WKiŁ, Warszawa, 2000.

Electroosmotic Soil Dewatering In Homogeneous Field Conditions; An Essay Of Theoretical Approach

Abstract

Electroosmosis appears today an efficient and relatively cheap way of fine wet soils improvement. In practice, implementation of electroosmosis bases on the professional skills and experience of the specialized geotechnical firm. In spite of that approach it is very interesting how theoretical findings look related to electroosmosis, because in related literature one hardly can find information regarding many parameters of the electroosmotic process. The aim of the paper is to fill the gap, to give useful theoretical solutions of this topic, which allow to form prognosis about proceeding and effects of electroosmosis process in space and in time basing on the input parameters for calculations.

Simple flat case of the process is analyzed here. Firstly, some assumptions are made regarding soil and groundwater properties as well as electrical field imposed on the soil mass. Electric potential gradient is calculated on the base of the electroosmosis range and electric resistance of soil in the wet and in the dry zones. The Darcy's law of water flow through porous medium is used to work out the velocity of flow and the velocity of seepage. It is shown, that simple differential equation (14) governs the relationship between time of the process duration and the range of the improved ground. Volume flow and gathered water volume in the cathode pipes are then defined and rate of the process is formulated as well. Useful equations defining power and work of the electric current are worked out and an example of calculations is shown. Finally, some closing remarks are made, including very important request of the field verification of all theoretical findings.

Final conclusions of this paper are:

1. Proposed theoretical model of the electroosmosis process in the flat case is simple and allows to calculate the most important parameters of this process.
2. Equations given in the paper allow to calculate not only the parameters of finished process, but also momentary parameters, which is very important for planning works organization (for example assorting pumps).
3. The issue of distance of electrodes in rows which assures sufficient approximation to the flat model was not analyzed here.
4. Many parameters of the process do not depend on absolute values of specific resistance of wet soil in a primal state and dewatered soil, but they depend on relation between those values.
5. Energy used for dewatering particular soil solid practically does depend on spacing of electrodes rows, if his spacing is bigger than 25 times diameter of cathode.
6. Spacing of electrodes rows influences very strongly time of soil dewatering.
7. Theoretical results document the first stage of the research on the issue given in the title and they require experimental verification.