

STANISŁAW PRZESTALSKI

METODA SOND POROWATYCH

Katedra Fizyki WSR we Wrocławiu

WSTĘP

Metoda sond porowatych została zastosowana w pomiarach wilgotności gleb jako udoskonalenie bezpośrednich metod elektrycznych. Te ostatnie polegały na pomiarach oporu elektrycznego warstwy gleby zawartej między dwiema elektrodami i opierały się na założeniu, że między oporem elektrycznym i wilgotnością badanej warstwy istnieje określona zależność funkcyjna. Doświadczenia wykazały jednak, począwszy od pierwszych [22], że na zależność między oporem a wilgotnością wpływa wiele ubocznych czynników. Należą do nich m. in. gęstość gleby, jej skład, struktura mechaniczna, jakość i stężenie elektrolitów, temperatura. Ponadto poważnym źródłem błędów jest kontaktowy opór elektryczny między elektrodami i glebą. Niezależnie od tego, że jest on czynnikiem bardzo zmiennym, może przewyższać rzeczywisty opór wilgotnej gleby. Pomimo więc poważnych zalet, do jakich należy możliwość bezpośrednich pomiarów, a co najważniejsze, możliwość wykonywania pomiarów ciągłych w warunkach polowych, należało tę metodę uznać za nieużyteczną.

W celu usunięcia źródeł błędów wywołanych wpływem zmian struktury gleby, zmian jej gęstości i oporu kontaktowego, Bouyoucos i Mick [7] w 1940 r. zaproponowali wykorzystanie do pomiarów wilgotności gleb sond porowatych, a więc układów o niezmienniej strukturze i gęstości, z wmontowanymi w nie na stałe elektrodami.

Pierwsze sondy zostały wykonane z gipsu i do chwili obecnej gipso-we bloki są stosowane najczęściej. Wprowadzane z czasem modyfikacje polegały na stosowaniu różnych rodzajów gipsu, gipsu utrwalonego żywicą [5], mieszaniny gipsu i cementu, pianki gipsowej i substancji o nazwie technicznej „gray hydrocol” zastosowanej przez Bouyoucos

sa [6] w 1969 r. Oprócz sond gipsowych wykorzystuje się bloki z innych substancji, a więc z nylonu [4], z włókna szklanego [9, 13], z włókna szklanego otoczonego gipsem [3], z uwodnionego wapna, cementu i azbestu oraz z grudek badanej gleby, utrwalonych za pomocą parafiny, kolodiu, polichlorku winylidenu [8] itp.

Wymiary i kształty bloków oporowych są różne. Najczęściej stosuje się bloki równoległościenne i cylindryczne. Standardowe bloki gipsowe [20] mają wymiary $2,5 \times 1,375 \times 0,5$ cala i są zaopatrzone w prostoliniowe elektrody długości 2 cali, oddalone od siebie o 0,75 cala. Inni autorzy [11] wolą mniejsze sondy cylindryczne, np. o rozmiarach 5/16 cala średnicy i 1,5 cala wysokości. Małe wymiary bloków zmniejszają zaburzenia przy umieszczaniu ich w glebie i przyspieszają osiągnięcie stanu równowagi wilgotnościowej.

Linijowe elektrody okazały się niezadowolające ze względu na występowanie elektrycznych prądów błądzących poza blokiem. Aby zredukować te prądy, wprowadzono [11, 16, 17] elektrody koncentryczne ze stali nierdzewnej, zgrzewane punktowo.

Metoda sond porowatych, początkowo popularna, obecnie jest stosowana znacznie rzadziej pomimo tego, że jej zaletą jest wykonywanie pomiarów w sposób ciągły w warunkach polowych. Ograniczenie jej stosowania wywołane jest występowaniem różnych czynników, które istotnie utrudniają określenie korelacji między oporem sondy i wilgotnością gleby.

PODSTAWY METODY

Metoda sond porowatych polega na pomiarach oporu elektrycznego bloku, umieszczonego w glebie, za pomocą odpowiedniego przyrządu pomiarowego, np. mostka Wheatstone'a. U podstaw metody leży założenie o równowadze termodynamicznej między sondą i glebą.

Funkcję, która może opisać układ porowaty (np. glebę lub sondę), jest parcjalny potencjał molarny Gibbsa \bar{G} , który ma postać:

$$d\bar{G} = \bar{V}dP + \left(\frac{\partial \bar{G}}{\partial T} \right)_{P, s, w, w} dT + \left(\frac{\partial \bar{G}}{\partial W} \right)_{P, T, s, w} dW + \left(\frac{\partial \bar{G}}{\partial s} \right)_{P, T, w, w} ds + dw + Mgdh \quad (1)$$

gdzie:

\bar{V} — molarna objętość wody,

P — zewnętrzne ciśnienie działające na układ,

T — temperatura,

W — wilgotność,

- s — czynnik odpowiadający za strukturę gleby (np. może to być czynnik określający rozkład por ze względu na ich rozmiary),
 w — czynnik określający efekt osmotyczny powstały z istnienia substancji rozpuszczonych,
 M — masa molarna wody,
 h — wysokość,
 g — przyspieszenie ziemskie.

Równanie (1) dla większej przejrzystości możemy zapisać w postaci równoważnej:

$$d\bar{G} = \bar{V}dP + X_TdT + X_WdW + X_sds + dw + Mgdh \quad (2)$$

gdzie:

X_T , X_W i X_s — odpowiednie pochodne cząsteczkowe występujące po prawej stronie równania (1).

Suma następujących składników wyrażenia (2):

$$X_WdW + X_sds + dw = \bar{V}dP_s \quad (3)$$

pozwala formalnie wprowadzić nowy parametr układu P_s , zwany w gleboznawstwie siłą ssącą.

Rozważmy teraz układ składający się z zetknięcia ze sobą sondy i gleby. Oznaczamy wielkości występujące w równaniu (3), a charakteryzujące sondę porowatą, za pomocą indeksów „1”, a wielkości charakteryzujące glebę — za pomocą indeksów „2”. Warunkiem równowagi termodynamicznej układu jest:

$$\bar{G}_1 = G_2 \quad (4)$$

Dla przypadku izotermiczno-izobarycznego ($dP = 0$, $dT = 0$), kiedy ponadto sonda i odpowiednia warstwa gleby znajdują się na tym samym poziomie ($dh = 0$), warunek równowagi (4) sprowadza się do równości:

$$X_{W_1}dW_1 + X_{s_1}ds_1 + dw = X_{W_2}dW_2 + X_{s_2}ds_2 + dw_2 \quad (5)$$

czyli do równości sił ssących:

$$P_{s_1} = P_{s_2} \quad (6)$$

gdzie:

P_{s_1} — określa siłę ssącą sondy,

P_{s_2} — siłę ssącą gleby.

Ostatni warunek można również sformułować opierając się w swych rozważaniach na termodynamice procesów nieodwracalnych (np. [21]).

Gdyby w roztworze glebowym oraz wewnątrz sondy nie występowały żadne substancje rozpuszczalne lub stężenia ich byłyby dostatecznie małe, tak aby można było zaniedbać ich wpływ, to $dw_1 = dw_2 = 0$ i równanie (5) przyjęłoby postać:

$$X_{W_1}dW_1 + X_{s_1}ds_1 = X_{W_2}dW_2 + X_{s_2}ds_2 \quad (7)$$

Z powyższych rozważań wynika, że w zależności od warunków między glebą i sondą może dojść do równowagi termodynamicznej (4), (5) lub (7). W przypadku zaistnienia warunków, które prowadzą do równowagi (7), istnieje możliwość określenia wzajemnej, choć nie bezpośredniej zależności między oporem sondy i wilgotnością gleby. W przypadkach bardziej złożonych (4) i (5) wyniki doświadczeń są znacznie trudniejsze do interpretacji i użyteczność metody zostaje poważnie ograniczona.

KRYTYKA METODY SOND POROWATYCH

Wyrażenie (7) zwraca uwagę na to, że gleba i sonda mogą osiągnąć identyczną wilgotność tylko wtedy, gdy przy pozostałych warunkach nie zmienionych mają one taką samą strukturę. Tym się tłumaczą poszukiwania sond porowatych o strukturze najbardziej zbliżonej do struktury badanej gleby. Do takich sond należą grudki utrwalonej gleby [8]. Oczywiście nawet i w tym przypadku nie należy oczekiwać idealnych rezultatów, ponieważ struktura gleby ulega zmianom, natomiast struktura sond pozostaje w czasie niezmienna.

Warunek (7) wskazuje również na to, że jeśli struktury sondy i gleby będą się bardzo znacznie różniły między sobą, to może mieć miejsce taka sytuacja, w której wilgotność sondy będzie przyjmowała bardzo duże wartości nawet przy niewielkich wilgotnościach gleby. Ten przypadek został doświadczalnie stwierdzony w układzie sonda gipsowa-piaszek luźny [28]. W pracy tej wykazano, że dla pewnego zakresu wilgotności piasku wartości wilgotności sondy różnią się tak nieznacznie, że na podstawie pomiarów elektrycznych różnic tych, praktycznie rzecz biorąc, nie można ustalić. Należy zauważyć, że średnia porowatość sondy jest znacznie mniejsza niż porowatość piasku. Z tego samego względu najprawdopodobniej spotkały się z niepowodzeniem połowe pomiary wilgotności gleb (szczególnie lekkich) za pomocą bloków gipsowych, przedstawione w pracy [14].

Jeśli jednak różnice strukturalne bloku pomiarowego oraz gleby nie są zbyt duże, to przy zachowaniu omówionych wyżej warunków prowadzących do równowagi (7) istnieje możliwość określenia wilgotności gleby w drodze pomiarów oporu elektrycznego sondy. W przypadku równowagi (7), a więc w przypadku równowagi sił ssących gleby i sondy (przy wykluczeniu substancji rozpuszczonych) opór elektryczny sondy jest pewną miarą siły ssącej sondy [11]. Pomiar więc oporu sondy, po odpowiednim jej wykalibrowaniu, informuje nas o sile ssącej zarówno sondy, jak i gleby. Dzięki zależności między siłą ssącą gleby i jej wil-

gotnością możemy pośrednio sądzić o wilgotności gleby. Analiza tego typu pomiarów wskazuje na istnienie histerezy związanej z sorpcją i desorpcją wody w bloku. Histereza ta rzutuje na dokładność pomiarów. Wielkość histerezy zależna jest od rodzaju sond. Badania porównawcze [3] różnych rodzajów sond z tego punktu widzenia wskazały, że najmniejszą histerezą odznaczają się bloki gipsowe. Bloki gipsowe mają również i tę wyższość nad innymi rodzajami sond, że ze względu na rozpuszczanie się siarczanu wapnia [10] przejawiają pewne właściwości buforowe. Dzięki temu bloki gipsowe są niewrażliwe na niewielkie zasolenie gleby, nie przekraczające 0,07% wszystkich rozpuszczonych soli i 0,02% chlorku sodu [12].

Pomiary przedstawione w pracy [11] wskazują, że krzywe obrazujące zależność między wilgotnością gleby i oporem sondy zbiegają się przy większych wilgotnościach, co uniemożliwia ich określenie. Na przykład w przypadku gliny i sondy gipsowej oraz sondy cementowej wilgotności większe od 32% są nie do rozróżnienia. Przy wilgotnościach mniejszych od 22% dla sondy gipsowej, a 17% dla sondy cementowej opory sond wzrastają tak znacznie, że przekraczają możliwości pomiaru, wobec czego również nie są wymierzalne.

W zakresie od 20 do 30% wilgotności można, przy zastosowaniu pewnych zabiegów, uzyskać wyniki obarczone błędem nie przekraczającym przy średnich wilgotnościach $\pm 20\%$. Ogólnie rzecz biorąc, można dobrać takie warunki, że istnieje możliwość określenia wilgotności gleb za pomocą sond gipsowych w zakresie siły ssącej od pF 2,6 do pF 4,2 [15].

Warunki leżące u podstaw równości (7) nie są w rzeczywistości nigdy spełniane. W ogólnym przypadku na rezultaty pomiarów będą miały wpływ, oprócz poprzednio wspomnianych, następujące czynniki:

- temperatura,
- substancje rozpuszczone w wodzie glebowej,
- zmiany struktury gleby,
- ciśnienie zewnętrzne

oraz

- ewentualne reakcje chemiczne w układzie wodnym sondy i gleby,
- zaburzenia na granicy faz sonda-gleba,
- czas relaksacji.

Aby pomiary wykonane metodą sond porowatych przynosiły korzyści, należy uwzględnić przy interpretacji wyników doświadczalnych wszystkie wymienione czynniki. Część tych czynników można określić za pomocą niezależnych pomiarów i odpowiednio skorygować wyniki doświadczeń. Należą tu przede wszystkim pomiary temperatury, dzięki

którym można skorygować odpowiednio opór sondy, korzystając z formuły [19]:

$$R_c = R_o^{1 + 0,02(T_c - T_o)}$$

gdzie:

- R_o — opór zmierzony,
- R_c — opór skorygowany,
- T_o — temperatura zmierzona,
- T_c — temperatura skorygowana,

przy czym opory podane są w omach, a temperatura w stopniach Fahrenheita. Istnieje również możliwość skorygowania danych w zależności od zasolenia gleby [1].

Pozostałe wpływy należy uwzględnić, w miarę możliwości, przy organizacji doświadczenia. Należy je tak zaprojektować, aby czynniki te miały możliwie małe znaczenie.

Czynnik czasu dochodzenia do stanu równowagi jest w dużym stopniu uzależniony od rozmiarów sondy. Nie można jednak stosować sond o rozmiarach zbyt małych, ponieważ małe sondy mają niedostatecznie dobry kontakt z glebą. W sondach stosowanych w praktyce czas relaksacji wynosi około kilkudziesięciu dni [2]. Z tego względu metoda sond porowatych powinna być stosowana w warunkach stacjonarnych. Przybliżone warunki stacjonarne mogą raczej występować w badaniach wilgotności gruntów, np, pod powierzchniami dróg, niż w badaniach typu rolniczego.

Wszystkie wymienione czynniki mają swój udział w powstawaniu błędów pomiarowego. Z racji dużej ilości źródeł błędów wyniki pomiarowe są niepewne i dlatego metoda sond porowatych, nawet przy uwzględnieniu tych źródeł, ma charakter jedynie jakościowy i może tylko wskazywać na kierunek zmian wilgotnościowych w glebie. W pewnych sytuacjach jednak nawet informacje jakościowe mogą mieć praktyczne znaczenie. I wobec tego metoda sond porowatych bywa wykorzystywana w doświadczeniach zakrojonych na większą skalę. Jest to uzasadnione tym, że przy poprawnym podejściu do zagadnienia, tzn. po uwzględnieniu wpływów możliwości wszystkich błędów pomiarowych utrzymuje się pożyteczne informacje, wskazujące na tendencje gleby do nawilgacania się lub zmniejszania wilgotności. Wybór metody sond porowatych usprawiedliwiony może być ponadto niskimi kosztami bloków oraz możliwością wykorzystania ich do ciągłych pomiarów *in situ*.

WNIOSKI

Na wyniki pomiarów wilgotności gleby metodą sond porowatych wpływają liczne czynniki. Można do nich zaliczyć zmiany strukturalne elementów układu sonda-gleba, histerezę, ewentualne rozpuszczenie się substancji, z której blok został wykonany, ewentualne reakcje chemiczne, temperaturę, domieszki rozpuszczone w wodzie glebowej, w szczególności elektrolity, ciśnienia zewnętrzne, zaburzenia na granicy faz układu, czas relaksacji. Wszystkie te czynniki składają się na całkowity błąd metody. Ze względu na ich ilość i trudności w ich pełnym wyeliminowaniu należy uznać rozważaną metodę za metodę jakościową, która jednak, ze względu na stosunkowo niskie koszty bloków oraz możliwości zastosowania jej w pomiarach ciągłych, może być w pewnych warunkach z pożytkiem stosowana.

LITERATURA

- [1] Aitchison G. D., Richards B. G.: A broad-scale of moisture conditions in pavement subgrades through-cut Australia. Symposium in print, Australia, Butterworths 1965, 278.
- [2] Bolt G. H., Frissel M. J.: Thermodynamics of soil moisture. Netherlands J. Agr. Sci., 8, 1960, 57-78.
- [3] Bourget S. J., Elrick D. E., Tanner C. B.: Electrical resistance units for moisture measurements: their moisture hysteresis, uniformity, and sensitivity. Soil Sci., 86, 1958, 298-304.
- [4] Bouyoucos G. J.: Nylon electrical resistance unit for continuous measurements of soil moisture in the field. Soil Sci., 67, 1949, 319-330.
- [5] Bouyoucos G. J.: More durable plaster of paris moisture blocks. Soil Sci., 76, 1953, 447-451.
- [6] Bouyoucos G. J., Cook R. L.: Construction, operation and accuracy of the Gray Hydrocol sensor. Soil Sci., 108, 1969, 309-312.
- [7] Bouyoucos G. J., Mick A. H.: An electrical resistance method for the continuous measurement of soil moisture under field conditions. Mich. Agr. Exp. Sta. Tech. Bul., 172, 1940.
- [8] Brasher B. R. i in.: Use of saran resin to coat natural soil clods for bulk-density and water retention measurements. Soil Sci., 101, 1966, 108.
- [9] Colman E. A., Hendrix T. M.: The fibreglas electrical soil moisture measurement. Soil Sci., 67, 1949, 425-438.
- [10] Cope F., Trickett S. S.: Measuring soil moisture. Soils and Fertilizers, 28, 1965, 201-208.
- [11] Croney D., Coleman J. D., Curren E. W.: The electric resistance method of measuring soil moisture. Br. J. Appl. Phys., 2, 1951, 85-91.
- [12] Czudowski A. F. i in.: Podstawy agrofizyki. PWN, Warszawa 1967, 847.
- [13] Danilin A. J.: Omiczeskij metod izmierienija wlaźnosti poczwy s primienieniem ugolnych elektrodow w stieklowołoknie. Trudy Naucz. Isledow. Inst. Gidrometeotol. Priborostroj., Moskwa 1957.

- [14] Krężel R.: Wyniki badań nad wilgotnością gleby metodą konduktometryczną za pomocą płytek gipsowych. Zesz. nauk. WSR Wroc., 18, 1958, 89-101.
- [15] Marshal T. J.: Relations between water and soil. Tech. Comm. No. 50, Commonw. Bur. Soils, Herpender 1959, 91.
- [16] Pereira H. C.: A cylindrical gypsum block for moisture studied in deep soils. J. Soil Sci., 3, 1951, 212-223.
- [17] Perier E. R., Marsh A. W.: Performance characteristics of various electrical resistance units and gypsum materials. Soil Sci., 86, 1958, 140-147.
- [18] Przestalski S.: Krytyczne uwagi o pomiarach wilgotności gleby za pomocą sond porowatych. Zesz. nauk. WSR Wroc., 25, 1959, 135-152.
- [19] Salter C. S., Bryant J. C.: Comparison of four methods of soil moisture measurements. Soil Sci., 61, 1946, 131-155.
- [20] Tanner C. B. i in.: Gypsum moisture block calibration based on electrical conductivity in distilled water. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 13, 1949, 62-65.
- [21] Taylor A.: The influence of temperature upon the transfer of water in soil systems. Mededelingen van de landbouwhogeschool en de opzoekingsstations van de staat de Gent; Deel XXVII, 2, 1962, 535-551.
- [22] Whitney M., Gardner F. O., Briggs L. J.: An electrical method of determining the moisture content of arable soils. U.S.D.A. Bull., 6, 1897.

С. ПРЖЕСТАЛЬСКИ

МЕТОД ПОРИСТЫХ ЗОНДОВ

Кафедра Физики, Высшая Сельскохозяйственная Школа г. Вроцлав

Резюме

В статье проводится общий термодинамический анализ системы состоящей из пористого зонда и почвы. Если система находится в термодинамическом равновесии, то нарциальный молекулярный потенциал Гибльса в обоих элементах одинаков:

$$\bar{G}_1 = \bar{G}_2 \quad (1)$$

Для изотермо-изобарического случая, если-же сверх того в системе отсутствуют водорастворимые вещества и химические реакции, то:

$$X_{W_1} dW_1 + X_{s_1} ds_1 = X_{W_2} dW_2 + X_{s_2} ds_2 \quad (2)$$

где индексы „1” относятся к зонду, а индексы „2” — к почве.

$$X_W = \left(\frac{\delta \bar{G}}{\delta W} \right)_{P, T, s, w}$$

$$X_s = \left(\frac{\delta \bar{G}}{\delta s} \right)_{P, T, w, w}$$

W — влажность; s — фактор ответственный за структуру почвы или зонда; P — давление; T — температура; w — фактор определяющий осмотический эффект.

Уравнение (2) указывает на то, что в самом простом случае обозначение влажности зонда (нп. путем измерения электрического сопротивления зонда)

разрешает вычислить влажность почвы. В частности получаемые результаты хорошо отражают положение, если структура почвы и зонда тождественны или сходны.

В состав уравнения (1) входят выражения характеризующие влияние температуры, давления, осмотических, электрических и химических эффектов. Кроме того на результат измерения влияет время релаксации. При таких обстоятельствах результат определения влажности по методу пористых зондов обусловлен точностью измерений многих независимых от себя параметров. Каждому измерению сопутствует погрешность, что в сумме приводит к очень сомнительному конечному результату. Учитывая еще длительность времени релаксации, по соотношению с временем протекания изменений в пахотных почвах, мы в праве полагать, что обсуждаемый метод мало пригоден полевого определения влажности почв. Однако им можно будет пользоваться при измерениях влажности грунта нр. под полотном дорог, если влажность будет там изменяться медленно и если будут независимо обозначены все добавочные параметры оказывающие влияние на состояние равновесия между зондом и субстратом.

S. PRZESTALSKI

METHOD OF POROUS BLOCKS

Department of Physics University, College of Agriculture in Wrocław

Summary

A general thermodynamic analysis of a system consisting of porous block and soil has been carried out. If the system remains in a thermodynamic equilibrium, than the partial molal Gibbs free energy is the same in both elements of the system:

$$\bar{G}_1 = \bar{G}_2 \quad (1)$$

For the isothermal-isobaric conditions when no water-soluble substances nor chemical reactions occur, then

$$X_{W_1} \cdot dW_1 + X_{s_1} \cdot ds_1 = X_{W_2} \cdot dW_2 + X_{s_2} \cdot ds_2 \quad (2)$$

where: index "1" refers to the block and index "2" — to the soil,

$$X_W = \left(\frac{\delta \bar{G}}{\delta W} \right)_{P, T, s, w}$$

$$X_s = \left(\frac{\delta \bar{G}}{\delta s} \right)_{P, T, w, W}$$

W — moisture, s — factor responsible for the structure of soil or block, P — pressure, T — temperature, w — factor determining osmotic effect.

Equation (2) suggests that in the simplest case the determination of the block moisture (e.g. by means of measuring electric resistance of the block) would enable to calculate soil moistening degree. In particular, the obtained results describe the situation correctly in the soil structure is the same, or similar, as that of the block.

Generally equation (1) contains expressions describing the influences of temperature and pressure as well as osmotic, electric and chemical effects. In addition, the relaxation time influences the measurements results. In this situation the possibility of moisture determination by the porous block method depends on measurements of many independent parameters.

Each of the measurements involves error what in sum leads to very doubtful results. Taking into account the long relaxation time, in relation to the period in which usually changes occur in arable soils, the method in question seems to be unsuitable for field measurements of soil moisture. Nevertheless, this method can be used for measurements of soils, e.g. under road pavements, if the moistening changes run slow there and if all additional parameters influencing the equilibrium state between the block and medium are determined independently.

Adres

*prof. dr hab. Stanisław Przystalski
Katedra Fizyki WSR
Wrocław, Norwida 25*

Wpłynęło do PTG w styczniu 1971 r.