

PSYCHROMETRYCZNY POMIAR POTENCJAŁU WODY W MATERIAŁACH ROLNICZYCH*

W. Skierucha

Instytut Agrofizyki im. B. Dobrzańskiego PAN, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin
e-mail: skieruch@demeter.ipan.lublin.pl

Streszczenie. Aby ocenić status wody w materiałach rolniczych, takich jak gleba czy roślina, należy znać jej energię, ilość oraz zmienność tych dwu wielkości w przestrzeni i w czasie. Taka pełna wiedza dotycząca wody jest trudna do uzyskania nawet w warunkach laboratoryjnych. Rozwój metod pomiaru przybliży moment, gdy dokładność osiągnięta w laboratorium będzie osiągalna w warunkach polowych. Technika reflektometryczna umożliwia dokładne i szybkie oszacowanie ilości wody w glebie. Zastosowanie psychrometrów termoelektrycznych Spannera wykorzystujących zjawisko Peltiera do skraplania pary wodnej na termometrze „mokrym” w warunkach polowych, umożliwi zmierzenie potencjału całkowitego wody w glebie w zakresie od -4 do -80 barów. Modelowanie ruchu wody umożliwia z kolei ocenę i prognozę zmian mierzonych wielkości w czasie i w przestrzeni.

W pracy przedstawiono opis metody, efekty prac prowadzonych w Instytucie Agrofizyki PAN oraz zamierzenia odnośnie pomiaru potencjału całkowitego wody w materiałach rolniczych z zastosowaniem psychrometru termoelektrycznego Spannera.

Słowa kluczowe: psychrometr termoelektryczny, potencjał wody, tensjometr.

WSTĘP

Reakcja roślin na zmiany wilgotności gleby jest ściśle związana z potencjałem wody w glebie. Potencjał wody w glebie jest definiowany jako praca niezbędna do usunięcia jednostkowej ilości wody z gleby, w stosunku do pracy niezbędnej do usunięcia jednostkowej ilości wody swobodnej o tej samej lokalizacji.

*Praca częściowo finansowana z grantu „INSUMAT” V Ramowego Programu Unii Europejskiej, nr grantu: G5RD-CT-2000-00197.

Pomiędzy ilością wody w materiałach rolniczych, θ , takich jak gleba czy roślina, a jej potencjałem, ψ , występuje współzależność opisywana tzw. „krzywą retencji” lub „krzywą pF”, $\theta(\psi)$. Ponieważ zależność $\theta(\psi)$ wykazuje histerezę [1], nie można wyliczyć jednej ze zmiennych na podstawie pomiaru drugiej. Z tego powodu w badaniach polowych trzeba mierzyć zarówno θ , jak też ψ .

Potencjał wody w materiałach rolniczych zależy od czynników, które warunkują energię cząsteczek wody w rozważanym systemie. Tymi czynnikami są w uproszczeniu: sole, faza stała, ciśnienie oraz temperatura. Stopień, w jakim wspomniane czynniki zmieniają potencjał wody w glebie może być wyrażony poprzez chemiczną aktywność wody. Aktywność ta jest, w znaczeniu termodynamicznym, ruchliwością cząsteczek pary wodnej i można ją wyrazić jako względną prężność pary wodnej w systemie. Zatem potencjał wody może być przedstawiony w kategoriach względnej prężności pary wodnej w systemie:

$$\psi = \frac{RT}{V} \ln \frac{e}{e_0} \left[\frac{J}{m^3} \right] \quad (1)$$

gdzie: ψ jest potencjałem wody [$J \cdot m^{-3} = Pa$], R jest uniwersalną stałą gazową (równą $8,31 J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$), T [K] jest temperaturą bezwzględna, V jest objętością cząsteczkową wody (równą $1,8 \cdot 10^{-3} m^3 \cdot mol^{-1}$), e jest prężnością pary wodnej w systemie, e_0 jest prężnością pary wodnej dla wody swobodnej w takich samych warunkach.

Z drugiej strony całkowity potencjał wody w systemie, ψ , jest sumą wielu składników i może być wyrażony następująco [1]:

$$\psi = \sum_1^n \psi_i \quad (2)$$

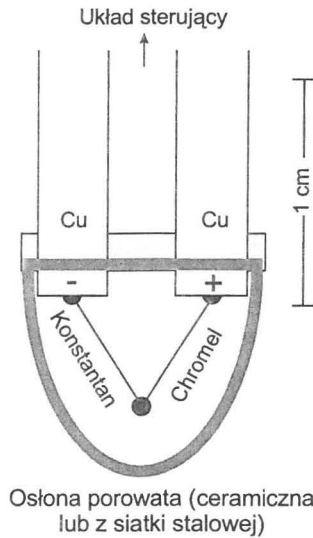
gdzie indeksy dolne odnoszą się do takich składników jak: grawitacyjny, matrycowy, osmotyczny, ciśnieniowy itp. Z porównania (1) i (2) widać, że monitoring całkowitego potencjału wody można ograniczyć do tylko jednej zmiennej: względnej prężności pary wodnej, e/e_0 .

METODA PSYCHROMETRYCZNA POMIARU POTENCJAŁU WODY

Dynamiczny rozwój badań dotyczących relacji energetycznych wody w systemach glebowym i roślinnym ma swój początek w klasycznej pracy Spannera [2]. Zastosował on tam efekt Peltiera w celu ochłodzenia termozłącza pomiarowego poniżej punktu rosy, co umożliwiło kondensację pary wodnej, a więc zwilżenie czujnika termometru „mokrego”. Metoda Spannera została zastosowana i wdrożona w wielu aplikacjach, w szczególności w warunkach polowych [3,4,5].

Budowę czujnika psychrometrycznego do pomiaru potencjału całkowitego wody w glebie lub roślinie przedstawia Rys. 1. Czujnik składa się z dwóch cienkich przewodów z konstantanu i chromelu (o średnicy 0,025 mm) połączonych razem i tworzących termoparę. Oba pozostałe końce konstantanu i chromelu połączone są z przewodami miedzianymi, łączącymi czujnik z rejestratorem. Wymuszenie przepływu prądu w termozłączu konstantan-chromel w kierunku od konstantanu do chromelu powoduje podgrzanie termozłącza, natomiast w kierunku przeciwnym jego ochłodzenie. Generowanie ciepła na termoparze lub jego absorpcja zachodzi zgodnie ze zjawiskiem Peltiera. Gdy termozłącze konstantan-chromel znajduje się w temperaturze innej niż dwa pozostałe końce przewodów je tworzących, to generowane jest napięcie elektryczne między połączeniami konstantan-miedź i chromel-miedź. Generowanie napięcia elektrycznego na końcach termozłącza zachodzi zgodnie ze zjawiskiem Seebecka.

Oba opisane zjawiska fizyczne wykorzystane są w prezentowanym psychrometrze do pomiaru potencjału całkowitego gleby i rośliny. Zjawisko Peltiera wykorzystywane jest przy chłodzeniu złącza tak, aby jego temperatura spadła poniżej punktu rosy, co powoduje kondensację pary na złączu termopary. Po wyłączeniu prądu chłodzenia, woda, która zwilżyła złącze termopary paruje do otoczenia chłodząc je. Aktualna temperatura termozłącza, mierzona przy wykorzystaniu zjawiska Seebecka, pozostaje na tym samym poziomie do momentu aż skondensowana na nim woda całkowicie wyparuje. Wtedy temperatura złącza ulega podwyższeniu do temperatury otoczenia. Obserwowana różnica temperatur zależy od wilgotności względnej otaczającego powietrza, im mniejsza wilgotność względna, tym szybciej paruje skondensowana na termozłączu woda i tym większa jest różnica temperatur między termozłączem i otoczeniem. Po przeprowadzeniu kalibracji powyżej opisanego urządzenia możliwy jest pomiar wilgotności względnej powietrza w materiale, w równowadze termodynamicznej z powietrzem



Rys. 1. Budowa czujnika psychrometrycznego do pomiaru potencjału całkowitego wody.

Fig. 1. Construction of psychrometric sensor for total water potential measurement.

otaczającym termoparę chromel-konstantan psychrometru Peltiera, a tym samym potencjału całkowitego wody w otoczeniu czujnika psychrometrycznego.

Popularna metoda tensjometryczna pomiaru potencjału wody wykorzystuje tensjometry jako czujniki ciśnienia kapilarnego wywieranego przez matrycę glebową na wodę w glebie. Ciśnienie to jest miarą składowej matrycowej potencjału całkowitego wody w glebie. Tensjometr składa się z porowatego kubka ceramicznego, wypełnionego wodą, do którego dołączony jest czujnik ciśnienia (najczęściej manometr). Woda jest odsysana z kubka przez siłę wywieraną przez matrycę glebową do momentu, gdy ciśnienie w kubku zrówna się z ciśnieniem kapilarnym, a więc z potencjałem matrycowym wody w glebie. Porowata ścianka kubka ceramicznego stanowi zaporę dla powietrza i fazy stałej, ale przepuszcza sole obecne w elektrolicie glebowym. Z tego powodu składowa osmotyczna potencjału nie wpływa na wskazania tensjometru. Użyteczny zakres wskazań tensjometru leży w granicach $0 \div -0,9$ bara ($0 \div -90$ kPa). Zakres ten pokrywa się z zakresem aktywnym kapilarnego ciśnienia matrycy glebowej, dla którego zachodzi większość procesów determinujących wegetację roślinną.

Zakres działania psychrometrów termoelektrycznych w zastosowaniu do mierzenia potencjału wody w glebie i roślinach nie pokrywa się z zakresem działania tensjometrów i leży w granicach $-2 \div -70$ barów ($-200 \div -7000$ kPa). Dla małych wartości ciśnienia (ok. -2 bary) granicę stanowi stała czasu czujnika, zbyt duża aby nadażyć za zmianami jego temperatury oraz dokładność przyrządu pomiarowego. Należy podkreślić, że psychrometr mierzy całkowity potencjał wody, zaś tensjometr tylko jego składnik matrycowy. Dla dużych wartości potencjału (ok. -70 barów) granicę stosowalności psychrometru stanowi niemożność schłodzenia termopary poniżej punktu rosy. W praktyce, dla przewodów z chromelu i konstantanu o średnicy 0,025 mm osiąga się wartości potencjału ok. -70 barów (-7000 kPa). Należy tu zaznaczyć, że jest to wartość wystarczająca, gdyż w większości przypadków praktycznych górna granica pomiaru nie przekracza -15 barów.

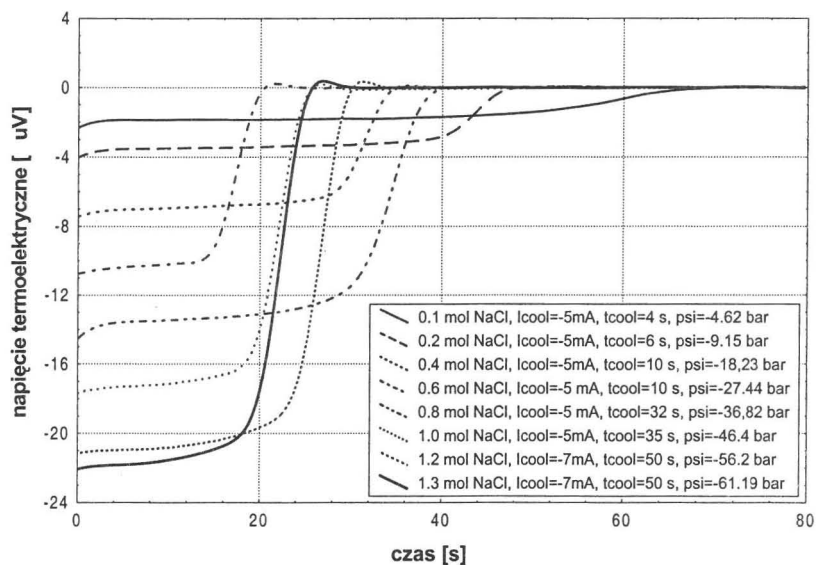
Tak więc aktualnie brakuje możliwości bezpośredniego pomiaru całkowitego potencjału wody w zakresie $0 \div -2$ bara.

WYNIKI I DYSKUSJA

Opracowany i wykonany w Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie prototyp miernika [6], może wykonywać jednoczesny pomiar ośmiu sond psychrometrycznych w sposób automatyczny przez sterowanie komputerem. Dotychczasowe prace nad techniką psychrometryczną oznaczania całkowitego potencjału wody w glebie i roślinie ograniczają się do rozwiązań konstrukcyjnych, przy czym

myślą przewodnią jest wykorzystanie nowoczesnych rozwiązań elektronicznych w celu osiągnięcia jak największej dokładności pomiaru i rozszerzenia zakresu pomiaru potencjału wody do wartości bezwzględnych poniżej -2 bary.

Krzywe kalibracyjne zebrane z przyrządu opracowanego w IAPAN przedstawione są na Rys. 2.



Rys. 2. Termogramy wysychania termometru „mokrego”, zebrane podczas kalibracji sond psychrometrycznych z wykorzystaniem roztworów NaCl.

Fig. 2. Thermograms of „wet bulb” drying, collected during calibration of psychrometric sensors over NaCl solutions.

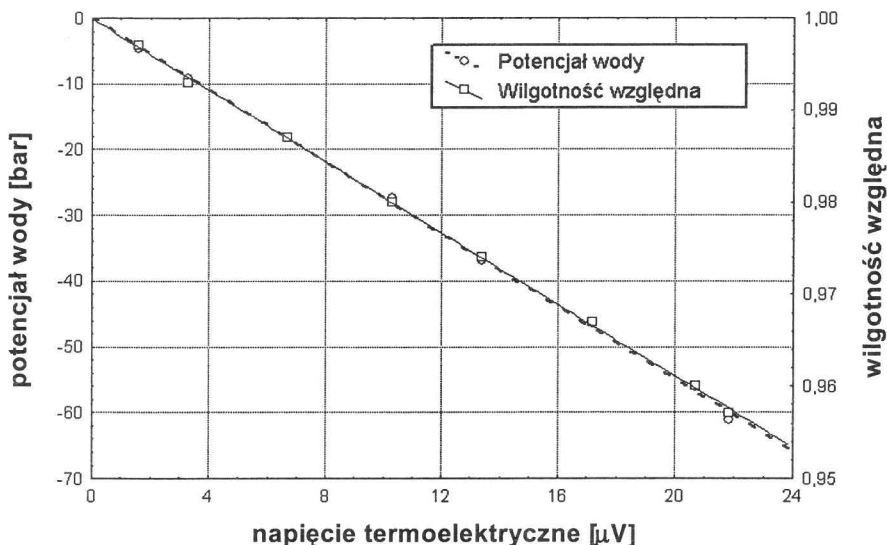
Każda z krzywych jest wpasowaną linią trendu do danych pomiarowych, liczoną metodą dopasowania funkcją odwrotnie wykładniczo-ważoną, polegającą na tym, że wagi określające wpływ pojedynczych punktów danych na kolejne fragmenty krzywej (w zależności od ich odległości od danego fragmentu) są wyliczane według ujemnej (malejącej) funkcji wykładniczej. Przedstawione krzywe składają się z 4000 punktów reprezentujących pojedynczy pomiar zebrany w sekwencji czasowej co 20 ms.

Przedstawione w legendzie na Rys. 2 wartości prądów, I [mA], dotyczą prądu chłodzenia termopary konstantan-chromel, które zachodzi w czasie t [s]. Wartości czasu chłodzenia jak i wielkości prądów chłodzenia różnią się ze stężeniem molowym roztworu kalibracyjnego NaCl.

Zależność kalibracyjną w postaci funkcji:

$$\psi = f(V) = -2,751 \cdot V + 0,166, \quad (3)$$

gdzie V jest napięciem termoelektrycznym czujnika w mikrowoltach, wyznaczono na podstawie zarejestrowanych odpowiedzi czujników psychrometrycznych na wymuszenia prądowe powodujące kondensację wody na termozłączu chromel-konstantan i późniejsze odparowanie tej wody (Rys. 3).

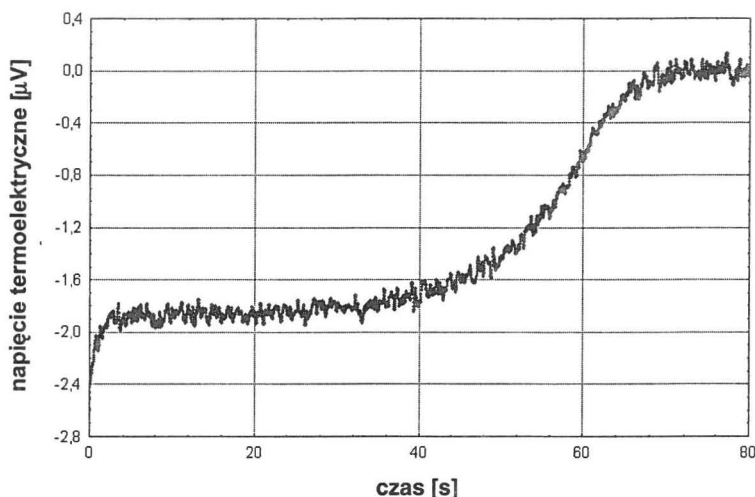


Rys. 3. Kalibracja czujnika psychrometrycznego.

Fig. 3. Calibration of psychrometric sensor.

Zależność ta jest funkcją liniową, dla której jednostkowemu przyrostowi napięcia termoelektrycznego odpowiada przyrost potencjału równy $-2,751$ bara, lub inaczej jednostkowemu przyrostowi potencjału w barach odpowiada przyrost napięcia termoelektrycznego równy $-0,362$ μV . Zakres pomiaru potencjału całkowitego wody, tzn. $0 \div -2$ bara, będący przedmiotem szczególnego zainteresowania ze strony fizyki gleby, stanowi niewielką część zależności kalibracyjnej przedstawionej na Rys. 3.

Opracowany mikrowoltomierz dokonuje pomiarów z dokładnością $\pm 0,1$ μV . Wykres krzywej kalibracji bez wygładzania danych przedstawia Rys. 4.



Rys. 4. Wykres pokazujący rozrzut wyników (bez wygładzania danych) dla sondy psychrometrycznej umieszczonej w roztworze 0,1 mola NaCl ($\psi = -4,62$ bara).

Fig. 4. Readout from the microvoltmeter presenting scatter of results (raw data) for psychrometric probe placed over the 0.1 molal solution of NaCl ($\psi = -4.62$ bar).

Zakładając liniowość zależności kalibracyjnej (3) dla wartości potencjału zbliżających się do zera można obliczyć, że mikrowoltomierzem o uzyskanej dokładności powinno się dać mierzyć potencjał wody równy $-0,5$ bara (odpowiada to 50 kPa). Wartości tej odpowiadałoby napięcie termoelektryczne równe $0,12$ μV , co można wyliczyć z zależności kalibracyjnej (3).

Należy zaznaczyć, że pomiar psychrometryczny jest bardzo czuły na różnice temperatury między termozłączem pomiarowym a próbką badanego materiału. Aby móc z mierzyć potencjał wody wynoszący $-0,5$ bara należy utrzymać termozłącze i badany materiał w tej samej temperaturze z dokładnością około $0,005^\circ\text{C}$. Stanowi to trudne zadanie techniczne, szczególnie w warunkach polowych.

WNIOSEK

Zbudowany rejestrator umożliwia prowadzenie badań nad stosowalnością metody, a szczególnie jej poszerzenia o wartości z przedziału $0 \div -2$ bara.

PIŚMIENICTWO

1. **Konstankiewicz K., Pukos A., Walczak R.:** Domenowa teoria histerezy dla termodynamicznych procesów w glebie. *Problemy Agrofizyki*, 13, 1974.
2. **Spanner D.C.:** The Peltier effect and its use in the measurement of suction pressure. *J. Exptl. Botany*, 2, 145-168, 1951.
3. **Rawlins S.L., Dalton F.N.:** Psychrometric measurement of soil water potential without precise temperature control. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 31, 297-301, 1967.
4. **Brown R.W.:** Measurement of water potential with thermocouple psychrometers: construction and applications. *USDA Forest Service Res. Pap. INT-80*, 1970.
5. *Water Potential Systems. WESCOR Scientific Products Catalogue*. 1998.
6. **Skierucha W., Sobczuk H., Malicki M.A.:** Zastosowanie psychrometru Peltiera do pomiaru potencjału wody: prototyp przyrządu pomiarowego. *Acta Agrophysica*, 53, 125-134, 2001.

PSYCHROMETRIC MEASUREMENT OF WATER POTENTIAL
IN SOIL AND PLANTS*W. Skierucha*

Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin
e-mail: skieruch@demeter.ipan.lublin.pl

Summary. To determine soil and plant water status it is necessary to know its energy and quantity as well as variability in space and time. Such full knowledge concerning water is very hard to achieve even in laboratory conditions. The development of measurement techniques enables to get closer to the laboratory precision in field conditions. Reflectometric technique helps to measure the quantity of water in soil quickly and exactly. Application of Spanner thermocouple psychrometers using Peltier effect for water vapor condensation on "wet bulb" in field conditions enables to measure the total water potential in soil and plant in the range $-4 \div -80$ bars. Modeling of water movement enables the estimation and prognosis of changes of measured variables in time and space.

The study presents the description of the method, the results of work performed in the Institute of Agrophysics PAS and plans concerning the measurement of the total water potential in agricultural materials using Spanner thermocouple psychrometer.

K e y w o r d s : thermocouple psychrometer, water potential, tensiometer.