

Łukasz GUZ<sup>1</sup> i Ewa TARGOSIŃSKA<sup>1</sup>

## KOREKCJA POMIARÓW TERMOPAROWEJ SONDY PSYCHROMETRYCZNEJ ZA POMOCĄ WSPÓŁCZYNNIKA TEMPERATUROWEGO

### CORRECTION OF THE THERMOCOUPLE PSYCHROMETER PROBE MEASUREMENTS USING TEMPERATURE COEFFICIENT

**Abstrakt:** Termoparowe sondy psychrometryczne służą do pomiaru potencjału wody. Często wykorzystywane są w agrotechnice. Znajdują też inne zastosowanie, np. w szczególnych przypadkach mogą zostać zastosowane do oceny wilgotności porowatych materiałów budowlanych. Zastosowanie w budownictwie drastycznie ogranicza ich wąski zakres pomiarowy, który mieści się w granicach 94÷99% wilgotności względnej powietrza. Odczyt z sondy psychrometrycznej jest dodatkowo funkcją zależną od temperatury. Dlatego podczas analizy wyników pomiarów przeprowadzonych w odmiennych warunkach środowiskowych należy dokonać korekcji wyników ze względu na temperaturę pomiaru. Celem niniejszej pracy jest przeanalizowanie sposobu wykorzystania korekcji temperaturowej dla termoparowych sond psychrometrycznych PST-55 Wescor. Kalibracja sond została przeprowadzona w laboratoryjnym piecu Memmert VO500 w temperaturach 20÷35°C. Wzrost temperatury o 1°C następował w ciągu 10 minut, a następnie temperatura utrzymywana była przez 2 godziny. Jako roztwór kalibrujący został użyty wodny roztwór NaCl o stężeniach: 0,4 M, 0,7 M, 1,1 M oraz 1,4 M. Zaproponowany został uogólniony wzór  $\Psi = f(U, T)$ , wyznaczający potencjał wody w funkcji napięcia sondy i temperatury.

**Słowa kluczowe:** termoparowa sonda psychrometryczna, korekcja pomiarów

Termoparowe sondy psychrometryczne umożliwiają pomiar potencjału wody w ośrodkach porowatych [1]. Sonda zbudowana jest z cienkich przewodów z chromelu i konstantanu, tworzących termoparę pomiarową, oraz termopar referencyjnych, powstałych po podłączeniu ich do miedzianych przewodów sondy. Pomiar temperatury możliwy jest dzięki dodatkowej termoparze, powstałej z połączenia przewodów sondy miedź-konstantan. Termoparę pomiarową zwilża się, wykorzystując zjawiska Peltiera [2]. Następnie woda odparowuje, obniżając temperaturę termopary i wskutek zjawiska Seebecka następuje wytworzenie mikrowoltowego napięcia. Wielkość napięcia jest funkcją zależną od wilgotności względnej powietrza, która wpływa na szybkość odparowywania. Potencjał wody mógłby być obliczony z wartości wilgotności względnej, jednak do kalibracji sondy stosuje się roztwory o znanym potencjale wody. Otrzymany bezpośrednio wynik potencjału można wykorzystać do wyznaczenia wilgotności względnej [3]. Dokładna budowa, zasada działania i procedury wykonywania pomiaru za pomocą sond opisane są w artykułach [3, 4].

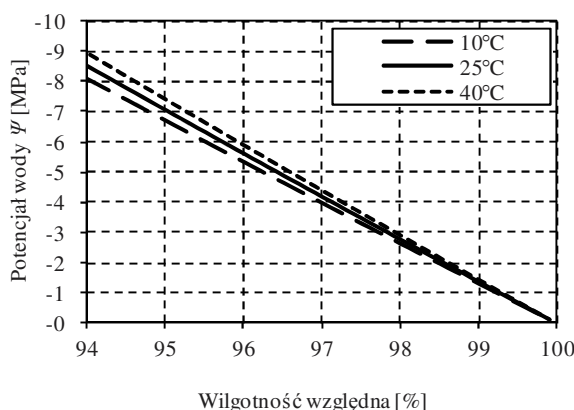
Sondy najczęściej wykorzystywane są w agrotechnice do pomiaru wilgotności roślin i gleb [5]. Można je również zastosować do pomiaru wilgotności materiałów budowlanych, które mają porowatą strukturę. Ich zastosowanie ogranicza wąski zakres pomiarowy, wynoszący około 94÷99% wilgotności względnej powietrza, będącego w termiczno-wilgotnościowej równowadze z badanym materiałem. Aby w szerszym zakresie wyznaczyć stan zawilgocenia materiałów porowatych, należałoby użyć innych

<sup>1</sup> Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin, tel. 81 538 47 84, email: L.Guz@wis.pol.lublin.pl, Ewa.Targosinska@pollub.edu.pl

technik pomiarowych, np. reflektometrycznych [6]. Reflektometryczne sondy powierzchniowe nie wymagają wykonywania żadnych ingerencji w strukturę materiału, dzięki temu mogą być stosowane do analiz stanu zawilgocenia konstrukcji budowlanych szczególnie w budynkach zabytkowych [7, 8].

Temperatura znacząco wpływa na dokładność pomiarów psychrometrycznych podczas trzech etapów pomiaru poprzez: (i) zmiany odczytów wskutek powstania gradientu temperatury w sondzie, (ii) temperaturową zależność napięcia wyjściowego sondy od potencjału wody oraz poprzez (iii) temperaturową zależność między potencjałem wody a wilgotnością względną w przypadku przeliczania tych wartości [3].

Między potencjałem wody a wilgotnością względną istnieje temperaturowa zależność opisana równaniem Kelvina [1]. W zakresie wilgotności względnej 94÷99% funkcja ma charakter zbliżony do liniowego i temperatura nie powoduje znaczących rozbieżności z praktycznego punktu widzenia (rys. 1). Dopiero przy parametrach skrajnych: różnicy temperatury 30°C i wilgotności względnej 0,94 powstaje błąd przeliczeniowy równy 0,85 MPa, co stanowi blisko 10% wyniku.



Rys. 1. Zależność między potencjałem wody a wilgotnością względną dla temperatury 10, 25 i 40°C

Fig. 1. Relation between water potential and relative humidity in temperature 10, 25 and 40°C

Temperatura wpływa również na wielkość sygnału generowanego przez sondę. Im wyższa temperatura otoczenia, tym wykroplony film wodny na termoparze odparowuje szybciej, generując w ten sposób większe napięcie. Gdy do przeliczenia napięcia na potencjał wody użyta zostanie funkcja wyznaczona dla identycznej temperatury, wynik będzie najdokładniejszy. Wymaga to wyznaczenia dla każdej sondy linii kalibracyjnych w przewidywanym zakresie temperatur. Innym sposobem korekcji wyników jest wyznaczenie jednej referencyjnej linii kalibracyjnej dla 25°C. Aby odczytać potencjał wody z tej linii, należy uprzednio przeliczyć napięcie sondy do spodziewanego do uzyskania, jeżeli pomiar odbywałby się w 25°C, używając wzoru [9, 10]:

$$U_c = U / (0,027T + 0,325) \quad (1)$$

gdzie:  $U_C$  - napięcie skorygowane [ $\mu\text{V}$ ],  $U$  - napięcie odczytane z sondy [ $\mu\text{V}$ ],  $T$  - temperatura sondy w chwili dokonywania pomiaru [ $^{\circ}\text{C}$ ].

Nachylenie funkcji w rzeczywistości nie jest idealnie liniowe w całym zakresie pomiarowym sondy psychrometrycznej. Dlatego zamiast współczynnika nachylenia 0,027 można stosować funkcję  $m$  (2), której współczynnik korelacji do danych pomiarowych wynosi  $r^2 = 0.97$  [11]:

$$m = -0,000210\Psi^2 - 0,002606\Psi + 0,023332 \quad (2)$$

gdzie:  $m$  - współczynnik nachylenia [-],  $\Psi$  - potencjał wody [kPa].

Negatywny wpływ na dokładność wyników pomiarowym ma także przepływ energii cieplnej, wywołujący gradient temperatury w sondzie psychrometrycznej [12, 13]. Jest to czynnik znacznie utrudniający pomiary zwłaszcza w terenie, gdzie występują dobowe wahania temperatury.

Materiał przedstawiony poniżej dotyczy korekcji wyników pomiarów, koniecznej z powodu temperaturowej zależności napięcia wyjściowego sondy od potencjału wody. Termoparowe sondy psychrometryczne Wescor PST-55 kalibrowano w zakresie od 20 do 35 $^{\circ}\text{C}$  w celu oszacowania wpływu temperatury na wyniki pomiarów.

### Metodyka badań

Termoparowe sondy psychrometryczne Wescor PST-55 kalibrowano w roztworach soli NaCl o stężeniach 0,4; 0,7; 1,1 i 1,4 M, w kolejności od najniższego stężenia. Sondy umieszczone były w szklanej kolbie laboratoryjnej z roztworem o objętości 0,1 dm<sup>3</sup>, którą dodatkowo zabezpieczano z zewnątrz folią aluminiową, odbijającą przypadkowy wpływ promieniowania. Kalibrację przeprowadzono jednocześnie dla ośmiu sond przy zachowaniu jednakowych warunków kalibracji. Wartości potencjału wody dla poszczególnych stężeń, które zależne są od temperatury, pokazano w tabeli 1.

Potencjał wody roztworu chlorku sodowego (NaCl) w temperaturze 20, 25 i 30 $^{\circ}\text{C}$  [14]

Tabela 1

Water potentials of sodium chloride (NaCl) solution at temperature 20, 25 and 30 $^{\circ}\text{C}$  [14]

Table 1

Stężenie molowe	$\Psi$ [MPa]		
	20 $^{\circ}\text{C}$	25 $^{\circ}\text{C}$	30 $^{\circ}\text{C}$
0,4	-1,791	-1,823	-1,855
0,7	-3,151	-3,210	-3,270
1,1	-5,026	-5,127	-5,226
1,4	-6,487	-6,623	-6,754

Ustawienia parametrów kalibracji: prąd grzewczy 5 mA w czasie 5 s, prąd chłodzący 5 mA w czasie 30 s. Parametry te są optymalne w zakresie potencjału wody od 0 do -8 MPa [15]. Podgrzanie termopary w sondzie przed pomiarem sprzyja jej osuszeniu z ewentualnej wilgoci.

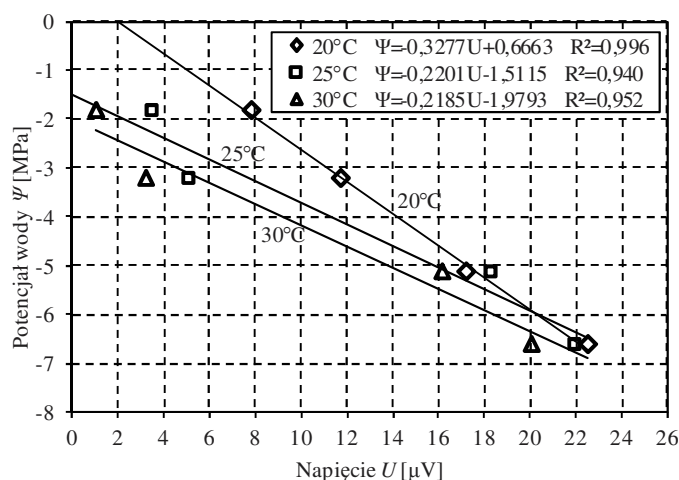
Do uzyskania zadanych warunków termicznych wykorzystana została suszarka laboratoryjna Memmert VO-500, która zmieniała temperaturę automatycznie według programu czasowego. Zmiana temperatury o 1 $^{\circ}\text{C}$  następowała w ciągu 10 minut,

a następnie utrzymywana była przez 2 godziny. Kalibrację przeprowadzono w zakresie  $20 \div 35^\circ\text{C}$  i  $35 \div 20^\circ\text{C}$ .

Sondy podłączone były do wielokanałowego mikrowoltomierza Psychrometer PS/1 firmy Easy Test Lublin. Dane o zmierzonym napięciu przekazywane były do komputera PC za pomocą łącza RS-232. Sterowanie miernikiem i bieżące wykreślanie zmian amplitudy napięcia z sond odbywało się za pomocą programu Psychro v.3 opracowanym na potrzeby tych pomiarów.

### Wyniki badań

Kalibracja przeprowadzona w zakresie temperatur od 20 do  $35^\circ\text{C}$ , co pozwoliło na sporządzenie linii kalibracyjnych dla różnych temperatur (rys. 2). Linie trendu wykazują zbieżność dla potencjału wody w granicach od  $-6$  do  $-7$  MPa, wywołanego największym stężeniem użytym podczas kalibracji. Przy niskich stężeniach roztworów kalibracyjnych uwidacznia się duża rozbieżność punktów pomiarowych. Jeżeli do pomiaru wykonanego w temperaturze  $20^\circ\text{C}$  zostałaby użyta linia kalibracyjna wyznaczona dla  $25^\circ\text{C}$ , powstałby błąd równy 2 MPa. Każda linia kalibracyjna posiada odmienny współczynnik nachylenia  $a$  oraz współczynnik  $b$  oznaczający punkt przecięcia linii z osią rzędnych. Te dwa współczynniki zestawiono na rysunku 3 i wyznaczono dla nich funkcję aproksymującą w zależności od temperatury.



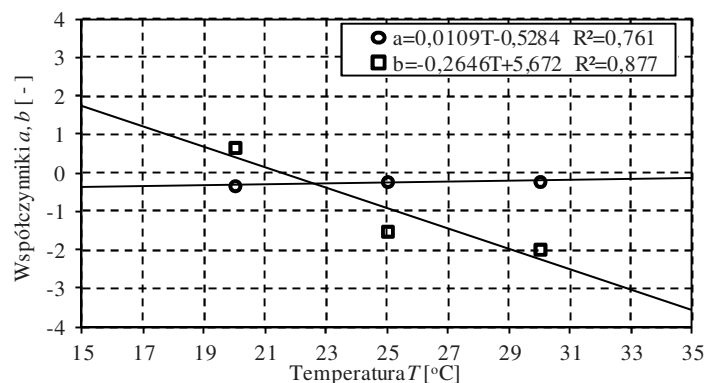
Rys. 2. Linie kalibracyjne wyznaczone dla wartości średnich z wszystkich sond podczas kalibracji w roztworach NaCl 0,4; 0,7; 1,1 i 1,4 M w temperaturze 20, 25 i  $30^\circ\text{C}$

Fig. 2. Calibration lines derived for average value of all probes used during calibration in 0.4; 0.7; 1.1 and 1.4 M NaCl solution in temperature 20, 25 and  $30^\circ\text{C}$

Podstawiając funkcję wyznaczoną dla współczynników  $a$  oraz  $b$  do równania linii kalibracyjnej danej sondy, otrzymuje się ogólny wzór, umożliwiający przeliczenie sygnału sondy psychrometrycznej na potencjał wody z uwzględnieniem temperatury. Zależność

potencjału wody od napięcia i temperatury  $\Psi = f(U, T)$ , wyprowadzona dla średnich wartości z przebadanych sond, jest przedstawiona za pomocą wzoru:

$$\Psi = (0,0109T - 0,5284)U + (-0,2646T + 5,672) \quad (3)$$



Rys. 3. Współczynnik nachylenia  $a$  i przecięcia osi rzędnych  $b$  dla linii kalibracyjnych w różnych temperaturach

Fig. 3. Factor value of slope  $a$  and y-intercept  $b$  of calibration line derived in various temperatures

Równanie (3) umożliwia uwzględnienie temperatury podczas przeliczania napięcia sondy na potencjał wody. Ze względu na odmienne charakterystyki termoparowych sond psychrometrycznych dla każdej sondy powinno być wyznaczone równanie podobne do równania uśrednionego (3).

### Podsumowanie i wnioski

Na wielkość napięcia generowanego przez termoparową sondę psychrometryczną znacząco wpływa temperatura, w jakiej odbywa się pomiar. Jeśli pomiary odbywają się w stałej temperaturze w laboratorium, zbliżonej do temperatury, w której kalibrowano sondę, nie ma konieczności korekcji zarejestrowanego napięcia. Jednak pomiar *in-situ* w zmiennej temperaturze może prowadzić do powstania znacznych błędów, dochodzących do 2 MPa/5°C. Konieczne jest uwzględnienie temperatury przy korekcji napięcia sondy lub wybranie linii kalibracyjnej wyznaczonej dla zbliżonej temperatury.

### Literatura

- [1] Wescor Inc. Water Potential Systems. Wescor. Logan, UT, 1998.
- [2] Wiebe HH. Water condensation on Peltier-cooled thermocouple psychrometers: A photographic study. *Agron J.* 1984;76:166-168.
- [3] Andraski BJ, Scanlon BR. W: *Methods of Soil Analysis*. Dane JH, Topp GC, editors. Part 4, Physical Methods. Soil Sci Society of America; 2002, 609-642.
- [4] Guz Ł, Suchorab Z, Sobczuk H. Psychrometric probes calibration. *Proc ECOpole.* 2009;3(1):133-138.
- [5] Kotov AA, Kotova LM. Thermocouple psychrometer for measurements of water potential in plant tissues by isopiestic method. *Russ J Plant Physiol.* 2010;57(5):732-738. DOI: 10.1134/S1021443710050171.
- [6] Suchorab Z, Jedut A, Sobczuk H. Water content measurement in building barriers and materials using surface TDR probe. *Proc ECOpole.* 2007;2(1):123-127.

- [7] Suchorab Z, Sobczuk H, Cerny R i in. Sensitivity range determination of surface TDR probes, Environ Protec Eng. 2009;35(3):179-189.
- [8] Jedut A, Suchorab Z, Sobczuk H. Surface probes for building materials moisture measurement by reflectometric method. Proc ECOpole. 2010;4(1):61-66.
- [9] Brown RW. Measurement of water potential with thermocouple psychrometers: Constructions and applications. USDA Forest Service Res Paper No. INT-80; 1970.
- [10] Skierucha W. Design and performance of psychrometric soil water potential meter. Sens Actuators A. 2005;118:86-91. DOI: 10.1016/j.sna.2004.08.004.
- [11] Comstock JP. Correction of thermocouple psychrometers readings for the interaction of temperature and actual water potential. Crop Sci. 2000;40:709-712.
- [12] Abuel-Naga HM, Bouazza A. Effects of temperature and thermal gradient on thermocouple psychrometer measurements. Geotechnique 2011;61(10):875-885. DOI: 10.1680/geot.9.P.102.
- [13] Wiebe HH, Brown RW, Barker J. Temperature gradient effects on in situ hygrometer measurements of water potential. Agron J. 1977;69:933-939.
- [14] Lang AR. Osmotic coefficients and water potentials of sodium chloride solutions from 0 to 40°C. Aust J Chem. 1967;20:2017-2023.
- [15] Martinez EM, Cancela JJ, Cuesta TS, Neira XX. Review. Use of psychrometers in field measurements of plant material: accuracy and handling difficulties. Span J Agric Res. 2011;9(1):313-328.

## **CORRECTION OF THE THERMOCOUPLE PSYCHROMETER PROBE MEASUREMENTS USING TEMPERATURE COEFFICIENT**

Faculty of Environmental Engineering, Lublin University of Technology

**Abstract:** Thermocouple psychrometer probes are used to water potential measurement. They are often used in agricultural applications. Psychrometric probes can be also used in other domains, such as moisture estimation in the porous building materials. Their application in building physics is strongly limited by narrow sensitivity range of the sensors, which, varies between 94÷99% of relative humidity of air in the porous material. Also, readouts of the thermocouple probes are function of the temperature during measurement. Therefore, in order to analyze the results of measurements performed in the different environmental conditions it is necessary to correct the results regarding to temperature. The aim of this article is to assessment of the temperature correction method for the thermocouple psychrometer probes Wescor PST-55. Calibration of the probe was carried out in a laboratory oven Memmert VO500 at a temperature range between 20 and 35°C. Temperature increase of 1°C appeared during 10 min period and afterwards the temperature was maintained for 2 hours. For calibration there were used NaCl solutions at molar concentrations 0.4 M, 0.7 M, 1.1 M and 1.4 M. The general  $\Psi=f(U,T)$  equation was proposed, which allow to calculate water potential as a function depending on voltage and temperature.

**Keywords:** thermocouple psychrometer probe, readings correction