

Łukasz GUZ¹, Zbigniew SUCHORAB¹ i Henryk SOBCZUK¹

KALIBRACJA SOND PSYCHROMETRYCZNYCH

PSYCHROMETRIC PROBES CALIBRATION

Abstrakt: Potencjał wody jest wyznacznikiem zdolności przemieszczania się wody w materiałach porowatych, jakimi są materiały budowlane. Gdy potencjał wody jest bliski zeru, para wodna zawarta w przegrodzie jest praktycznie w stanie nasycenia i istnieje ryzyko wykroplenia się wody wewnątrz konstrukcji. Zmierzony przez sondę psychrometryczną potencjał wody może być w prosty sposób przeliczony na wilgotność względną materiału porowatego. Aby możliwy był pomiar potencjału wody, należy każdą sondę skalibrować, tzn. określić zależność pomiędzy potencjałem wody i napięciem generowanym na termozłączu. W wyniku zapisu zmieniającego się napięcia na sondzie otrzymuje się krzywą psychrometryczną, której kształt odzwierciedla fizyczne zjawiska przemian fazowych wody zachodzących podczas pomiarów. Przy wilgotności względnej poniżej ok. 92% kształt krzywej psychrometrycznej jednak nie pozwala na jednoznaczne określenie etapu parowania wykroplonej na termozłączu wody, gdyż niewielka ilość wykroplonej wody, odparowując, nie powoduje ustabilizowania się temperatury termozłącza w punkcie rosy. Zmierzone wówczas napięcie generowane wskutek zjawiska Seebecka nie będzie dokładnie odzwierciedlać wilgotności względnej materiału porowatego, dlatego metody wykorzystujące do analizy napięcie na sondzie są wtedy obarczone pewnym błędem. Metoda analizy, wykorzystująca powierzchnię pola pod krzywą psychrometryczną, która jest proporcjonalna do czasu chłodzenia termozłącza, umożliwia w tych warunkach pomiar. Dzięki krzywej kalibracyjnej wiążącej powierzchnię pod krzywą psychrometryczną z potencjałem wody (lub też z wilgotnością względną) można określić stan wilgotności, pomimo iż kształt krzywej psychrometrycznej na to nie pozwala. Powyższa metoda może również obniżyć dolną granicę pomiarową wilgotności względnej dla sond psychrometrycznych.

Słowa kluczowe: sonda psychrometryczna, potencjał wody wilgotność względna, kalibracja

Zarówno planowanie modernizacji, jak i strategia wykonania prac modernizacyjnych i remontowych budynku zależy od aktualnego stanu zawilgocenia przegród budowlanych. Obiekty zabytkowe mają zwykle przegrody o znacznej miąższości, w których zawilgocenie zmienia się powoli i w sposób zróżnicowany w przekroju przegród.

Ocena zawilgocenia struktur budowlanych *in situ* jest utrudniona i przy zastosowaniu klasycznych metod wymaga pobrania próbek materiału. Ciągłe monitorowanie zmian zawilgocenia jest w takim przypadku niemożliwe. Nieinwazyjne mierniki wilgotności umożliwiają pomiar wilgotności tylko do określonej głębokości warstwy przegrody. Zastosowanie sondy psychrometrycznej do pomiaru potencjału w materiale budowlanym może rozwiązać te problemy. Podczas instalacji sondy (wiercenia otworu) przegroda nie ulega większemu uszkodzeniu. Zainstalowanie kilku sond na różnych głębokościach umożliwia pomiar zawilgocenia całego przekroju przegrody.

Sonda psychrometryczna umożliwia pomiar potencjału wody Ψ , który jest różnicą energii wiązania wody w materiale porowatym i w czystej wodzie, wyraża się go często w jednostkach ciśnienia [1]. Potencjał wody w materiale porowatym jest identyczny w stanie równowagi termodynamicznej we wszystkich fazach, w szczególności w fazie ciekłej i gazowej. Pomiar potencjału wody w materiale porowatym niesie zatem informację o wilgotności względnej RH badanego materiału. Zależność pomiędzy wilgotnością względną a potencjałem można opisać za pomocą równania:

¹ Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin, tel. 081 538 44 24, email: L.Guz @wis.pol.lublin.pl, Z.Suchorab@wis.pol.lublin.pl, H.Subczuk@wis.pol.lublin.pl

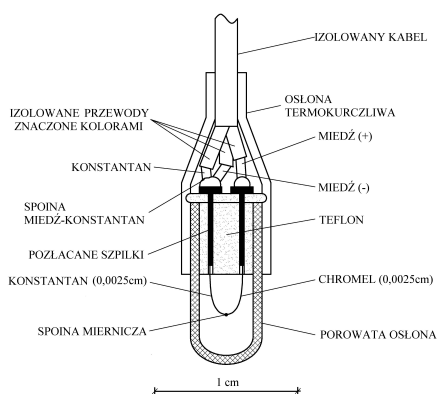
$$RH = \exp\left(-\frac{\Psi \cdot V_w}{R \cdot T}\right) \quad (1)$$

gdzie: RH - wilgotność względna [-], R - uniwersalna stała gazowa [J/mol·K], T - temperatura materiału porowatego [K], V_w - objętość molowa wody [m³/mol].

Do pomiaru potencjału wody za pomocą sondy psychrometrycznej wykorzystuje się zjawisko Seebecka, polegające na tym, że na złączu różnych metali generowana jest różnica potencjałów elektrycznych zależna od temperatury złącza, oraz zjawisko Peltiera, dzięki któremu pewna ilość ciepła jest pochłaniana lub oddawana zależnie od kierunku prądu przez termozłącze [2]. Wykorzystanie tych zjawisk umożliwia zmianę temperatury termozłącza w stosunku do temperatury otoczenia i to zarówno jej podniesienie, jak i obniżenie, a także pomiar aktualnej temperatury termozłącza.

Budowa sondy psychrometrycznej

Przekrój poprzeczny sondy psychrometrycznej pokazano na rysunku 1. Podstawowym elementem każdej sondy są spoiny: miernicza i odniesienia. Spoina miernicza jest wykonana poprzez zespawanie w osłonie azotu bardzo cienkich drutów konstantanowego i chromelowego o grubości 0,0025 cm każdy. Cienkie druty połączone są z przewodami sondy poprzez połączone szpilki większej średnicy. Nad wkładem teflonowym szpilki przyspawane są do przewodów sondy, tworząc dwie spoiny odniesienia dla spoiny miernicznej. Przestrzeń pomiędzy spoinami odniesienia wypełniona jest żywicą epoksydową. Do pomiaru temperatury spoin odniesienia, czyli też temperatury sondy służy spoina powstała poprzez zespawanie przewodu miedzianego i konstantanowego [3].



Rys. 1. Budowa sondy psychrometrycznej

Fig. 1. Construction of the psychrometric probe

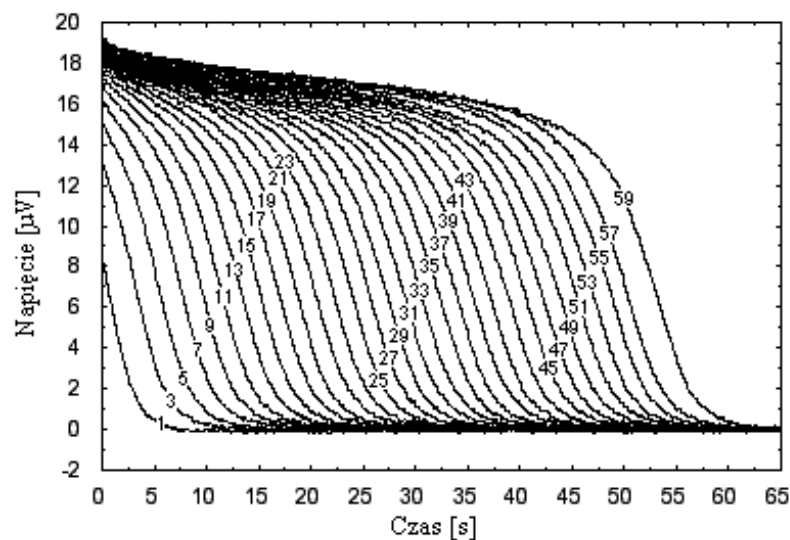
Zasada pomiaru

Pomiar potencjału wody za pomocą sondy psychrometrycznej składa się z kilku następujących po sobie etapów. Aby spowodować ochłodzenie spoiny miernicznej poniżej punktu rosy oraz wykroplenie się na niej wody, należy wymusić przepływ prądu

w odpowiednim kierunku o natężeniu ok. 3÷8 mA. Po wyłączeniu prądu chłodzącego skroplona woda odparowuje, powodując spadek temperatury złącza i w tym czasie następuje pomiar przebiegu napięcia generowanego w obwodzie spiny pomiarowej wskutek zjawiska Seebecka [4].

Do pomiarów wykorzystano mikrowoltomierz cyfrowy Easy Test LOM/mPts o szumach własnych kilkunastu nanowoltów, umożliwiający pomiar sond psychrometrycznych Wescor PST-55. Wyniki wszystkich pomiarów były rejestrowane za pomocą komputera, który pozwolił na ich dalszą analizę.

W wyniku monitoringu zmieniającego się w czasie napięcia na sondzie otrzymuje się krzywe psychrometryczne. Początek pomiaru określony jest momentem wyłączenia prądu chłodzącego. Wykroplona na termozłączu woda, odparowując z intensywnością zależną od wilgotności względnej powietrza, odbiera energię z otoczenia, w wyniku czego temperatura termozłącza pomiarowego spada poniżej temperatury otoczenia. Wytworzone w termozłączu napięcie jest proporcjonalne do spadku jego temperatury i jest wyznacznikiem wilgotności względnej badanego materiału [5]. Proces pochłaniania ciepła podczas parowania i proces dopływu ciepła z otoczenia kompensują się w pewnym stopniu, dzięki czemu obserwuje się plateau na krzywej psychrometrycznej. Kompensacja ta trwa aż do wyparowania zapasu wody wykroplonej na złączu, kiedy to sygnał elektryczny gwałtownie zanika. W końcowej fazie pomiaru temperatura termozłącza powoli powraca do wartości początkowej i sygnał zmierza do zera. Rodzina krzywych psychrometrycznych otrzymanych podczas kalibracji sond w roztworze soli NaCl z zastosowaniem różnych czasów chłodzenia termozłącza przedstawiono na rysunku 2.

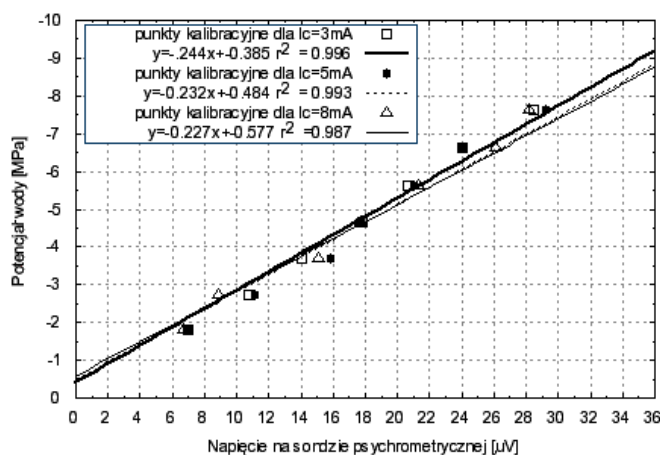


Rys. 2. Krzywe kalibracyjne dla roztworu soli NaCl o potencjale $-4,641$ MPa. Czas chłodzenia termozłącza od 1 do 59 s co 2 s; zastosowany prąd chłodzący wynosi 5 mA

Fig. 2. Psychrometric curves for NaCl salt solution with potential $-4,641$ MPa. Cooling time from 1 to 59 s; heating current 5 mA

Linie kalibracyjne

Gdy kalibrację przeprowadzi się dla roztworu soli o różnych stężeniach, można wykreślić linie kalibracyjne, których przykłady przedstawiono na rysunku 3. Do ustalenia zależności kalibracyjnej $\Psi=f(U)$ między potencjałem wody a napięciem generowanym przez sondę stosuje się roztwory soli o znanych potencjałach osmotycznych, wskutek czego powietrze nad roztworem ma określoną przez stężenie soli wilgotność względną [6]. Linie kalibracyjne zostały sporządzone dla prądów chłodzenia termozłącza 3; 5; 8 mA nad roztworami soli NaCl o potencjale: -1,824; -2,746; -3,685; -4,641; -5,616; -6,615 i -7,631 MPa. Dzięki równaniom linii kalibracyjnych można podczas badań skorelować napięcie na sondzie z aktualnym potencjałem wody.



Rys. 3. Linie kalibracyjne dla różnych prądów chłodzenia sporządzone nad roztworem soli NaCl

Fig. 3. Calibration lines for different cooling current obtained over NaCl salt solution

Jakkolwiek w szerokim zakresie potencjałów wody krzywe psychrometryczne mają opisane powyżej cechy i kształt, to w granicy niskiego potencjału kształt krzywych nie wykazuje tych cech, a raczej mają kształt podobny do krzywych z rysunku 2 otrzymanych dla czasu chłodzenia do około 15 s. Dla takich krzywych trudno jest jednoznacznie określić, gdzie się kończy i czy w ogóle występuje faza plateau, gdyż niewielka ilość wykroplonej wody, odparowując, nie powoduje ustabilizowania się temperatury termozłącza w punkcie rosy. Zmierzone wówczas napięcie generowane wskutek zjawiska Seebecka nie będzie dokładnie odzwierciedlać wilgotności względnej materiału porowatego, dlatego metody wykorzystujące do analizy napięcie na sondzie będą wtedy obarczone pewnym błędem. W takich sytuacjach pomocna jest analiza pola pod krzywą psychrometryczną.

Zastosowanie dłuższego czasu chłodzenia powoduje wykroplenie się większej ilości wody. Odparowanie większej ilości wody w fazie pomiaru trwa dłużej, a przez to plateau utrzymuje się dłużej, proporcjonalnie do długości czasu chłodzenia. Powyższy efekt jest widoczny na rodzinie krzywych przedstawionych na rysunku 2. Dla tak zestawionych krzywych psychrometrycznych można zauważyć proporcjonalny przyrost pola powierzchni

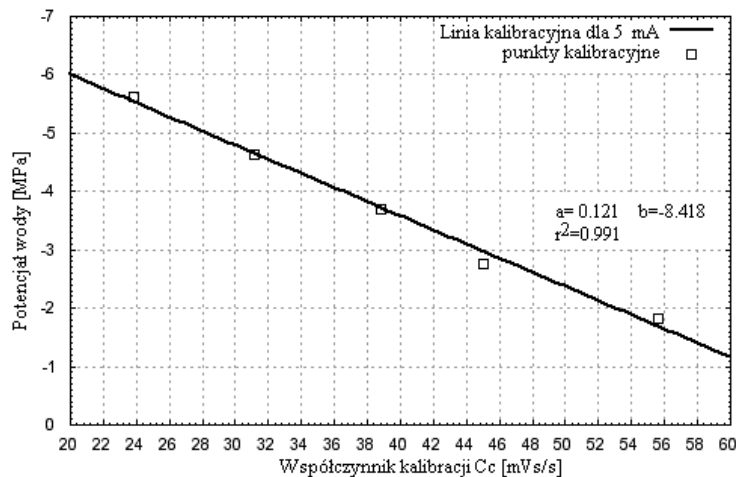
pod krzywą wraz ze wzrostem czasu chłodzenia. Przyrost pola jest proporcjonalny do czasu chłodzenia, nawet gdy krzywe nie mają określonego kształtu.

Pole pod krzywą łatwo określić w sytuacji, gdy krzywe psychrometryczne zapisane są w postaci cyfrowej. Wielkość ta jest stosunkowo nieczuła na poziom szumu, jakim obciążony jest pomiar mikrowoltowego sygnału. Dzieląc pole pod krzywą przez czas chłodzenia termozłącza, otrzymuje się stałą dla danego roztworu parametr C_c :

$$C_c = \frac{\int_0^t U(t)dt}{t_c} \quad (2)$$

gdzie: C_c - współczynnik kalibracji [$\mu\text{V}\cdot\text{s/s}$], U - napięcie na sondzie [μV], t_c - czas chłodzenia termozłącza [s], t - czas pomiaru [s].

Obliczone wartości współczynników kalibracji C_c dla roztworów soli o potencjale osmotycznym: $-1,824$; $-2,746$; $-3,685$; $-4,641$; $-5,616$; $-6,615$; i $-7,631$ MPa posłużyły do wykreślenia specyficznych linii kalibracyjnych. Przykładowa linia przedstawiona została na rysunku 4. Współczynniki kalibracji C_c wyznaczone podczas kalibracji układają się w linii prostej, co wskazuje na liniową zależność. Współczynnik korelacji współczynnika C_c dla różnych sond psychrometrycznych Wescor PST-55 mieścił się w granicach od 0,892 do 0,995.



Rys. 4. Linia kalibracyjna wykreślona z wykorzystaniem parametru pola pod krzywą psychrometryczną

Fig. 4. Calibration line charted using area under psychrometric curve

Podsumowanie

Przeprowadzone badania wykazały, iż możliwe jest wykreślenie krzywej kalibracyjnej wykorzystującej jako parametr pole pod krzywą psychrometryczną. Krzywa kalibracyjna może być wykorzystana w sytuacji, gdy niemożliwe jest określenie na krzywych psychrometrycznych zakresów faz termodynamicznych, jak to ma często miejsce podczas badań w materiale o wilgotności względnej poniżej około 92%.

Podziękowanie

Powyższe badania były przeprowadzone w ramach grantu naukowego polskiego Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego Nr 4952/B/T02/2008/34.

Literatura

- [1] Sobczuk H.: *Badanie przepływu ciepła i wody w materiałach budowlanych*. [w:] II Kongres Inżynierii Środowiska, tom I, Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, 2005, **32**, 77-91.
- [2] Kassem E.: *Measurements of moisture suction in hot mix asphalt mixes*. Texas A&M University, 2005, 7-26.
- [3] Wiebe H.H., Campbell G.S., Gardner W.H., Rawlings S.L., Cary J.W. i Brown R.W.: *Measurement of plant and soil water status*. Utah State Univ., Logan, UT, 1971, 2-26.
- [4] Andraski B.J. i Scanlon R.: *Thermocouple Psychrometry*, [w:] Methods of soil analysis (praca zbiorowa pod red. H. Dane, G.C. Topp). Soil Science Society of America, Madison, Wisc. 2002, 609-649.
- [5] Skierucha W., Walczak R.T. i Wilczek A.: *Monitoring system for verification of mass and energy transport models in porous media*. Instytut Agrofizyki PAN, Lublin 2004, 40-50.
- [6] Guz Ł. i Sobczuk H., *Badanie potencjału wody w materiałach budowlanych za pomocą sondy psychrometrycznej*. Proceedings of ECOpole, 2008, **2**(1), 185-190.

PSYCHROMETRIC PROBES CALIBRATION

Abstract: Water potential determines the ability of water migration in porous materials like buildings materials. When water potential is close to zero, water vapor contained in buildings materials is almost saturated and the risk of water vapor condensation in the wall construction appears. Water potential measured with psychrometric probe can be easily recalculated into moisture of the porous material. To enable the water potential measurements, each probe must be previously calibrated which means finding a correlation between water potential and voltage generated on thermocouple. As a result of voltage changes, the trace on thermocouple junction is forming calibration curve which shape reflects the physical phenomena of water phase transition during measurement. However at the low value of water potential, below 92%, the shape of psychrometric curve does not allow to determine the evaporation phase of condensed water on thermocouple. Evaporation of a small amount of water does not cause the temperature stabilization of the thermocouple at dew point temperature. Measured voltage generated through Seebeck effect would not precisely represent the relative moisture of the porous material, that is why the methods using this voltage on probe will be embarked with some error. In these circumstances very helpful can be the analysis method used field under psychrometric probe, that in some range is proportional to thermocouple cooling time. With calibration curve correlating field under psychrometric curve to water potential (or with relative humidity) it can be determined the water potential even when shape of psychrometric curve not allow to this. This method allows to decrease the lower boundary of measurements with psychrometric probe.

Keywords: psychrometric probe, water potential, relative humidity, calibration