

Jerzy STAWICKI\*  
Władysław OPYDO\*

## UPROSZCZONA METODA POMIARU WSPÓŁCZYNNIKA PRZEWODZENIA CIEPŁA GRUNTU

W pracy przedstawiono uproszczoną metodę pomiaru wartości współczynnika przewodzenia ciepła gruntu. Zaproponowana metoda pozwala na częściowe wyeliminowanie błędów pomiarów związanych ze zmianami struktury i gęstości gruntów, które występują przy stosowaniu tradycyjnych metod. Jednocześnie pozwala z zadawalającą dokładnością wyznaczać wartość tego współczynnika. Do opracowania matematycznych wyników badań wykorzystano program komputerowy Statistica.

### 1. WPROWADZENIE

Ciepłe właściwości gruntu, a przede wszystkim wartość współczynnika przewodności cieplnej gruntu, mają decydujący wpływ na przepływ ciepła i rozkład temperatury w gruncie. Ponadto wpływają także na przemieszczanie się w nim wody [6]. Zatem decydują o długości i intensywności procesu wegetacyjnego roślin. Dlatego właściwości te są celem badań wielu dziedzin nauki, takich jak: agrofizyka, klimatologia, meteorologia, biologia oraz dziedzin technicznych związanych z energetyką i budownictwem.

Badania wykazały, że decydujący wpływ na ciepłe właściwości gruntu ma ilość zawartej w nim wody, gęstość gruntu oraz jego skład mineralogiczny [1, 6]. Temperatura gruntu, ciśnienie i wilgotność powietrza zawartego między cząstkami gruntu nie wpływają znacząco na jego właściwości cieplne.

Bezpośrednie pomiary właściwości cieplnych gruntu są trudne i skomplikowane. Dlatego poszukuje się prostszych metod pomiarowych, umożliwiających prowadzenie pomiarów bezpośrednio w terenie.

Przy tych pomiarach zakłada się zwykle, że wymiana ciepła w gruncie, przy braku wymuszonych zewnętrznymi czynnikami przepływów wody i powietrza, odbywa się w wyniku przewodzenia; tzn. skutki wymiany ciepła przez promieniowanie i konwekcję są tak małe, że mogą zostać pominięte.

Kolejnym założeniem upraszczającym jest przyjęcie, że grunt jest ośrodkiem jednorodnym i izotropowym.

\* Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy.

\*\* Politechnika Poznańska.

Zwykle pomiaru współczynnika przewodzenia ciepła gruntu lub materiału sypkiego dokonuje się wykorzystując tzw. aparat rurowy [3]. Podstawy teoretycznego tego pomiaru polegają na tym, że przy ustalonym przewodzeniu ciepła przez ściankę cylindryczną, o stałej przewodności cieplnej i temperaturze wewnętrznej ( $T_w$ ) oraz temperaturze zewnętrznej ( $T_z$ ) jej powierzchni, przepływ ciepła odbywa się tylko w kierunku promieniowym. Wtedy równanie przewodnictwa we współrzędnych walcowych upraszcza się do następującej postaci [4]:

$$\frac{d^2T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} = 0, \quad (1)$$

z warunkami brzegowymi: przy  $r = r_w$ ,  $T = T_w$ , oraz przy  $r = r_z$ ,  $T = T_z$ , gdzie:  $r_z$ ,  $r_w$  – promienie (zewnątrzny i wewnętrzny) ścianki cylindrycznej przewodzącej ciepło,  $T_z$ ,  $T_w$  – temperatury zewnętrznej i wewnętrznej powierzchni ścianki cylindrycznej.

Wartość ciepła przewodzonego w powyższym układzie można obliczyć podstawiając wynik rozwiązania równania (1) do równania Fourier'a. Po scałkowaniu otrzymanej w ten sposób zależności otrzymuje się następujący wzór pozwalający obliczyć wartość ciepła przewodzonego przez ściankę cylindryczną o długości  $L$  w jednostce czasu (moc):

$$Q_h = \frac{2\pi\lambda L(T_w - T_z)}{\ln \frac{r_z}{r_w}}. \quad (2)$$

Jeżeli jest znana ta wartość ( $Q_h$ ), to wzór (2) można wykorzystać do obliczania wartości współczynnika przewodności cieplnej  $\lambda$ . Do prowadzenia takich pomiarów zaprojektowano i zbudowano tzw. aparat rurowy [3]. Pomiaru współczynnika przewodzenia ciepła materiału sypkiego przy pomocy tego aparatu dokonuje się w ten sposób, że próbkę badanego materiału umieszcza się we wnętrzu aparatu mającego kształt rury wykonanej z materiału izolacyjnego. Próbka badanego materiału tworzy ściankę cylindryczną, bo w jej wnętrzu, osiowo, w środku, umieszcza się elektryczny grzejnik główny, a po obu końcach, także osiowo, elektryczne grzejniki osłonowe; grzejniki mają kształt walców o promieniu  $r_w$ . Następnie cały aparat umieszcza się w ultratermostacie o temperaturze ( $T_z$ ). Po włączeniu grzejników mierzy się temperaturę powierzchni wewnętrznej próbki graniczącej z grzejnikiem głównym ( $T_w$ ) oraz temperaturę powierzchni zewnętrznej próbki ( $T_z$ ). Z chwilą ustalenia się tych temperatur dokonuje się ich pomiaru i ze wzoru (2) oblicza się wartość współczynnika przewodzenia ciepła materiału [3].

Wadą metod pomiaru współczynnika przewodzenia ciepła jest konieczność stosowania złożonej aparatury wymagającej ultratermostatów, grzejników osłonowych oraz użycia, do skonstruowania urządzenia, wysokiej klasy materiałów izolacyjnych. Źródłem błędów pomiaru jest zmiana gęstości gruntu związana z

pobieranie próbek do badań i umieszczaniem jej w przyrządzie pomiarowym. Dlatego tych celem badań było znalezienie prostszej metody pomiaru współczynnika przewodzenia ciepła gruntu, umożliwiającej przeprowadzenie pomiaru bezpośrednio w gruncie, bez naruszania struktury gruntu.

## 2. OPIS STANOWISKA POMIAROWEGO

Badania prowadzono wykorzystując stanowisko, którego głównym elementem był cylindryczny pojemnik wykonany z polichlorku winylu. Miał on średnicę 1 m i wysokość 0,4 m. Napelniono go gruntem modelowym, który był mieszaniną piasków krzemowych o następującym składzie i granulacji: 3% piasku o średnicy ziaren poniżej 0,15 mm, 54% o średnicy ziaren od 0,15 do 0,30 mm, 38% o średnicy ziaren od 0,30 do 0,45 mm i 5% ziaren o średnicy powyżej 0,45 mm.

Wilgotność gruntu w pojemniku zmieniano przez dodawanie wody destylowanej bądź przez suszenie na sitach i przedmuchiwanie ciepłym powietrzem.

Wartość wilgotności gruntu, przy pomiarach wilgotności, stanowiącą odniesienie do wartości mierzonej, określono metodą szuszkarkową.

W badaniach stosowano dwa rodzaje czujników – czujniki pasywne i czujniki aktywne. Czujniki pasywne były wykorzystywane wyłącznie do mierzenia temperatury. W tym celu każdy czujnik miał wbudowany termistor. Natomiast czujnik aktywny, oprócz termistora, miał na swojej powierzchni dodatkowy element grzejny, wykonany z drutu oporowego [5].

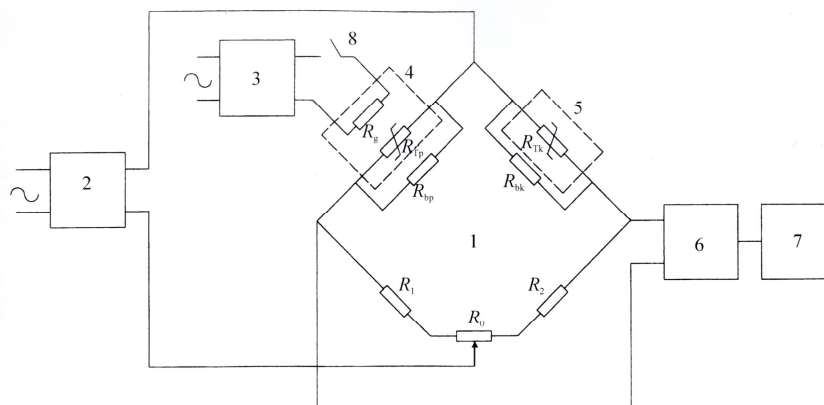
Czujniki miały kształt walca o średnicy 4 mm i długości 120 mm. Wykonano je z rurki aluminiowej, której powierzchnię anodyzowano elektrolitycznie. We wnętrzu rurki umieszczano termistor. Na powierzchni czujnika aktywnego, dodatkowo, nawijano element grzejny z drutu oporowego o średnicy 0,1 mm. Rezystancja tego elementu była równa 100  $\Omega$ . Wnętrze rurki z termistorem zalewano żywicą epoksydową. Żywicą powlecano też powierzchnię drutu oporowego elementu grzejnego.

W części badań, dla zmniejszenia nierównomierności rozkładu temperatury w gruncie podczas pomiaru, przy końcach walcowego czujnika aktywnego, w jego osi, nad nim i pod nim umieszczono grzejniki osłonowe. Grzejniki te miały kształt walców o średnicy 4 mm i długości 60 mm. Wykonano je z rurki aluminiowej, której powierzchnię anodyzowano elektrolitycznie. Na nią nawijano element grzejny z drutu oporowego o średnicy 0,1 mm. Rezystancja elementu grzejnego grzejnika osłonowego wynosiła 50  $\Omega$ . Wnętrze rurki wypełniano żywicą epoksydową. Żywicą epoksydową pokrywano też powierzchnię drutu oporowego.

W badaniach prowadzonych przy ustalonej wymianie ciepła elementy grzejne czujników aktywnych i grzejników osłonowych zasilano ze stabilizowanego zasilacza prądu stałego.

Pomiar temperatury za pomocą czujników termistorowych prowadzono przy pomocy układu niezrównoważonego mostka Wheatstone'a. Schemat układu

pomiarowego przedstawia rys. 1. Mostek zasilano prądem o stałej wartości wynoszącej  $40 \mu\text{A}$ . Do zasilania mostka stosowano źródło prądowego o rezystancji wewnętrznej większej od  $2 \text{ M}\Omega$ .



Rys. 1. Schemat układu pomiarowego: 1 – symetryczny mostek Wheatstone’a, 2 – zasilacz stałoprądowy, 3 – zasilacz do wytwarzania impulsu energii, 4 – czujnik aktywny, 5 – czujnik kompensacyjny, 6 – rejestrator cyfrowy MC 101/8/20 przebiegów czasowych napięcia, 7 – komputer, 8 – łącznik elektroniczny o regulowanym czasie łączenia,  $R_{Tp}$  – rezystancja termistora czujnika aktywnego,  $R_g$  – rezystancja grzejnika rezystancyjnego czujnika aktywnego,  $R_{bp}$  – rezystancja bocznika termistora czujnika aktywnego,  $R_{Tk}$  – rezystancja termistora czujnika kompensacyjnego,  $R_{bk}$  – rezystancja bocznika termistora czujnika kompensacyjnego,  $R_1$  i  $R_2$  – rezystancje pozostałych rezystorów mostka,  $R_o$  – potencjometr do zerowania układu pomiarowego

Wskaźnikiem równowagi mostka był woltomierz, którego funkcję pełnił rejestrator cyfrowy MC101/8/20, mający rezystancję wejściową większą od  $10 \text{ M}\Omega$ . Był on połączony z mikrokomputerem (PC), który umożliwiał przechowywanie w swej pamięci danych – zarejestrowanych przebiegów czasowych napięcia.

Wartość natężenia prądu w układzie była celowo ograniczona, ponieważ prąd płynący przez termistory powoduje wydzielanie się pewnej ilości ciepła, które w konsekwencji prowadzi do podniesienia temperatury, zakłócając w ten sposób pomiar.

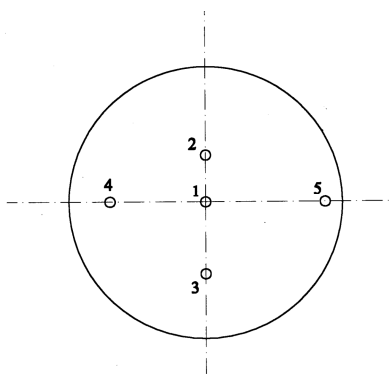
W obwodzie mostka (rys. 1) umieszczono dodatkowy potencjometr  $R_o$  mający małą rezystancję (do  $200 \Omega$ ) w stosunku do rezystancji użytych termistorów. Potencjometr ten służył do wstępnego zrównoważenia mostka. Początkowe niezrównoważenie było wynikiem różnic pomiędzy parametrami A i B dwóch stosowanych termistorów (pomiarowego i kompensacyjnego). Wartości rezystancji poszczególnych gałęzi mostka były w przybliżeniu równe i wynosiły ok.  $10 \text{ k}\Omega$ , przy temperaturze  $18 \text{ }^\circ\text{C}$ . Jedną gałąź mostka stanowił termistor pomiarowy  $R_{Tp}$ , wbudowany w czujnik aktywny. Czujnik ten miał wbudowany także grzejnik rezystancyjny  $R_g$  do wytwarzania energii cieplnej.

Celem linearyzacji charakterystyki rezystancyjno-temperaturowej termistor  $R_{Tp}$  był zbocznikowany rezystorem  $R_{bp}$ . W drugiej gałęzi mostka włączony był termistor  $R_{Tk}$ , wbudowany w czujnik kompensacyjny, którego charakterystyka rezystancyjno-temperaturowa była linearyzowana rezystorem  $R_{bk}$ . Umieszczano go w gruncie z dala od czujnika aktywnego. Jego zadaniem była, przy długotrwałych badaniach, kompensacja ewentualnych zmian temperatury gruntu spowodowanych nawet małymi zmianami temperatury otoczenia. Dla zlinearyzowania charakterystyki rezystancyjno-temperaturowej termistor ten był zbocznikowany rezystorem  $R_{bk}$ .

Użyte egzemplarze termistorów – pomiarowego  $R_{Tp}$  i kompensacyjnego  $R_{Tk}$  – dobierano tak, aby miały podobne charakterystyki rezystancyjno-temperaturowe.

### 3. WYNIKI POMIARÓW I ICH OMÓWIENIE

W badaniach prowadzonych przy ustalonej wymianie ciepła wykorzystano jednocześnie pięć czujników pomiarowych, w tym jeden aktywny. Przyjęto zasadę, że czujnik aktywny będzie umieszczany w środku cylindrycznego pojemnika z gruntem – rys. 2.



Rys. 2. Rozmieszczenie czujników pomiarowych w pojemniku z gruntem – widok z góry;  
1 – czujnik aktywny, 2÷5 – czujniki pasywne; odległość od czujnika aktywnego nr 1,  
umieszczonego w środku pojemnika, do czujnika pasywnego nr 2 – 2 cm, nr 3 – 4 cm,  
nr 4 – 6 cm i nr 5 – 10 cm

Dla zminimalizowania zakłóceń rozkładu temperatury w pobliżu jednego czujnika przez czujnik sąsiedni, czujniki pasywne umieszczono w ten sposób, żeby pomiędzy czujnikiem aktywnym, a każdym z czujników pasywnych nie było żadnego innego czujnika, mogącego zmienić przepływ strumienia energii cieplnej.

Wyniki badań przy ustalonym przewodzeniu ciepła przeprowadzono w laboratorium dla modelowego gruntu. Pomiaru wykonano dla pięciu różnych wilgotności gruntu. Moc wydzielana przez czujnik aktywny w tych pomiarach wynosiła 1 W. W osi symetrii czujnika walcowego, bezpośrednio nad nim i pod nim, umieszczono po jednym, walcowym grzejniku osłonowym, o mocy 0,5 W

każdy. Koniec górnego czujnika osłonowego umieszczano równo z powierzchnią gruntu. Po włączeniu zasilania czujnika aktywnego i grzejników osłonowych ustalenie się temperatury następowało po kilkunastu godzinach.

Kompleksowe wyniki obliczeń wartości współczynnika przewodzenia ciepła modelowego gruntu o różnych wilgotnościach, wykonane na podstawie pomiarów rozkładu temperatury, przedstawiono w tabeli 1.

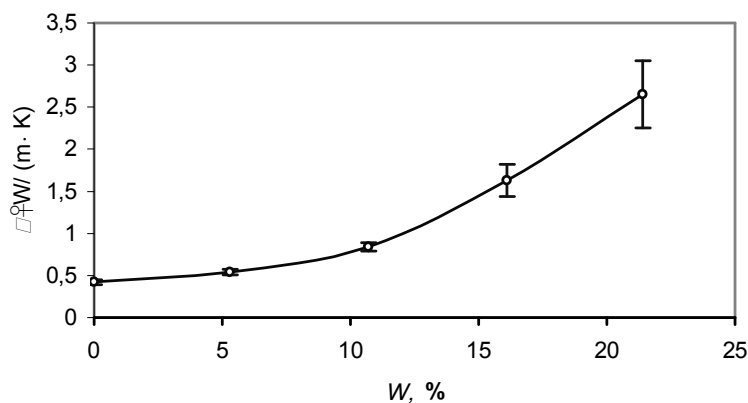
Uzyskane w pomiarach wyniki rozkładów temperatury zostały wykorzystane do obliczenia wartości współczynnika przewodzenia modelowego gruntu mającego różne wilgotności. Wartość tego współczynnika obliczono ze wzoru (2), po jego przekształceniu. Przedział ufności obliczono dla założonego poziomu ufności  $\alpha = 0,95$ .

Tabela 1. Zestawienie wyników obliczeń wartości współczynnika przewodzenia ciepła modelowego gruntu o różnych wilgotnościach, wykonane na podstawie pomiarów rozkładu temperatury; przedział ufności obliczono przy poziomie ufności  $\alpha = 0,95$

Lp.	W, %	Wartość współczynnika przewodzenia ciepła $\lambda$ , obliczona z różnicy temperatur między następującymi parami czujników						Wartość średnia $\bar{\lambda}$ , odchylenie standardowe $s$ oraz przedział ufności $\bar{\lambda} \pm t_{\alpha} s$ współczynnika przewodzenia ciepła		
		W/(m·K)						$\bar{\lambda}$	$s$	$\bar{\lambda} \pm t_{\alpha} s$
		2-4	2-6	2-10	4-6	4-10	6-10	W/(m·K)	W/(m·K)	W/(m·K)
1	0	0,43	0,42	0,42	0,41	0,41	0,41	0,42	0,01	0,40÷0,44
2	5,3	0,53	0,54	0,54	0,53	0,54	0,55	0,54	0,01	0,52÷0,56
3	10,7	0,82	0,84	0,84	0,87	0,85	0,83	0,84	0,02	0,79÷0,89
4	16,1	1,52	1,64	1,59	1,68	1,71	1,66	1,63	0,08	1,44÷1,82
5	21,4	2,35	2,45	2,66	2,63	2,84	2,87	2,65	0,22	2,12÷3,18

Wykorzystując wyniki obliczeń, zawarte w tabeli 1, wykreślono zależność współczynnika przewodzenia ciepła modelowego gruntu od jego wilgotności. Zależność tę przedstawia rys. 3. Z rysunku 3 wynika, że znając wartość współczynnika przewodzenia ciepła badanego gruntu można określić jego wilgotność.

Porównanie pomierzonych wartości współczynnika przewodzenia ciepła gruntu o różnych wilgotnościach, zestawionych w tabeli 1 i przedstawionych na rysunku 3, z danymi zamieszczonymi w literaturze [1, 6] wykazało, że są to wartości bardzo zbliżone.



Rys. 3. Zależność przewodności cieplnej modelowego gruntu od jego wilgotności; zaznaczono 95% przedziały ufności

Z tabeli 1 i rys. 3 wynika, że największy rozrzut mierzonych wartości współczynnika przewodzenia ciepła gruntu występował w przypadku pomiarów gruntu o największej wilgotności (21,4%). Jest to prawdopodobnie spowodowane tym, że tak duża wilgotności gruntu, zbliżona jest do stanu nasyconego wodą, zwanego połową pojemnością wody. Wtedy to grunt przestaje być jednorodny, co powoduje zakłócenia w przewodzeniu ciepła; rozkład wartości wilgotności staje się w pobliżu stanu nasycenia nieregularny i pojawiają się uprzywilejowane drogi wymiany ciepła.

Podsumowując, z badań wynika, że znając podstawowe cechy fizycznych gruntu, tj. składu granulometrycznego, gęstości i wilgotności gruntu, można przy pomocy zaproponowanej metody, z zadawalającą dokładnością, wyznaczać wartość współczynnika przewodnictwa ciepła gruntu. Badania potwierdziły zatem przydatność opracowanej metody pomiarowej. W wyniku tych badań powstała koncepcja budowy czujników pomiarowych oraz układu pomiarowego umożliwiającego pomiar współczynnika przewodzenia ciepła gruntu bezpośrednio w terenie, przy niewielkim tylko naruszeniu struktury gruntu.

Wartość współczynnika przewodzenia ciepła gruntu zależy od wilgotności gruntu. Zatem znając wartość współczynnika przewodzenia ciepła gruntu można, stosując opracowaną metodę, określić jego wilgotność.

W zakończeniu pragniemy zwrócić uwagę na trudności eksperymentalne występujące przy prowadzeniu tych badań. Wynikają one ze złożonej struktury gruntów i skomplikowanych procesów fizycznych zachodzących w nich w czasie trwania takich pomiarów. Wydaje się, że celowe jest prowadzenie dalszych badań nad opracowaniem szczegółowej metodyki tych pomiarów, zwłaszcza w odniesieniu do pomiaru właściwości cieplnych gruntów mających dużą wilgotność. Badania te powinny dotyczyć wpływu wilgotności, a także temperatury, rodzaju gruntu i jego gęstości na wyniki pomiarów.

## LITERATURA

- [1] Gogół W., Gogół E., Arteczka E.: Badania przewodności cieplnej gruntów wilgotnych. Biuletyn Informacyjny Instytutu Techniki Ciepłej Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1993, nr 40, s. 49.
- [2] Kuźma E.: Czujniki termistorowe typu NTC  $\exp\theta$  do pomiaru temperatury o prawie liniowej charakterystyce temperaturowej. W monografii Termistory – technologia, konstrukcja, właściwości, wydanej przez Instytut Technologii Elektronowej, Warszawa 1999, s. 22.
- [3] Mieszkowski M.: Pomiary cieplne i energetyczne. WNT, Warszawa 1981.
- [4] Staniszewski B.: Wymiana ciepła. Podstawy teoretyczne. PWN, Warszawa 1980.
- [5] Stawicki J., Jabłoński W., Opydo W., Szymaczek M.: Komputerowo wspomaganą analizę rozkładu temperatury w modelu sonda – grunt w elektrycznej metodzie pomiaru wilgotności gruntu. Materiały Sympozjum Środowiskowego PTZE nt.: Zastosowanie elektromagnetyzmu w nowoczesnych technikach i informatyce, Bydgoszcz – Wenecja 2001, s. 167.
- [6] Usowicz B.: Porównanie przewodnictwa cieplnego gleby wyznaczonego z dwóch modeli i zmierzonego termoreflektometryczną sondą pomiarową. Acta Agrophysica, 2003, tom 2, nr 3, s. 651.

### **THE SIMPLIFIED METHOD OF THE MEASUREMENT OF THE GROUND THERMAL CONDUCTIVITY COEFFICIENT**

Results of the study on elaboration of the simple method of the measurement of the ground thermal conductivity coefficient, which may be used directly in the field, were presented in the paper. Measurement system, connected to probes-thermistor sensors, that were situated in examined ground, was designed and built. Two types of sensors: active and passive were used. Active sensor, apart from thermistor for temperature measurements, had additional electric heating element. The study revealed that method proposed allows to determine, with satisfying precision, the value of the ground thermal conductivity coefficient. At the same time, the method partially eliminates measurement errors associated with changes of the structure and density of examined grounds, which occur during measurements with the use of traditional methods. STATISTICA software was used for mathematical analysis of the results.