

Agnieszka Gontaszewska
Instytut Budownictwa, Uniwersytet Zielonogórski,

**BADANIA LABORATORYJNE
PRZEWODNICTWA CIEPLNEGO PIASKU KWARCOWEGO**

**LABORATORY TESTS
OF QUARTZ SAND THERMAL CONDUCTIVITY**

Słowa kluczowe: przewodnictwo cieplne, grunty, geotermia

Streszczenie: Przewodnictwo cieplne jest najważniejszym parametrem w problematyce czerpania ciepła z gruntów, czyli tzw. płytkiej geotermii. Brak jest jednak szerokich badań w tym zakresie. W pracy przedstawiono opis pomiarów przewodnictwa cieplnego w kwarcowych piaskach z Osiecznicy. Omówiono metodykę badań i aparaturę pomiarową. Otrzymane wyniki porównano z wynikami cytowanymi w literaturze i przeprowadzono dyskusję.

Key words: thermal conductivity, grounds, geothermy

Summary: Thermal conductivity is the most important parameter in calculation of earth heat absorbing. There is an absence of wide investigations in this range. This paper presents description of thermal conductivity measurements in quartz sands from Osiecznica. Methodology and measurement equipment were precisely discussed. Obtained results were compared with results from literature.

WSTĘP

Współczynnik przewodzenia ciepła gruntów λ jest parametrem niezbędnym w obliczeniach związanych z energią geotermalną czerpaną z płytkich źródeł (100 m – 200m p.p.t.). Współczynnik ten jest także niezbędny przy modelowaniu przepływu ciepła przez grunty, np. przy obliczaniu głębokości ich przemarzania.

Pomiary przewodnictwa cieplnego gruntów są dość rzadkimi badaniami i w literaturze tematu znaleźć można jedynie skąpe dane na ten temat. Z reguły badania takie dotyczą jedynie 1 – 2 rodzajów gruntu. Autorce udało się znaleźć jedynie kilka publikacji zawierających wyniki pomiarów współczynnika przewodzenia ciepła w gruntach (Abu-Hamdeh, 2000, 2001; Abu-Hamdeh & Reeder, 2000; Abu-Hamdeh et al., 2001; Farouki, 1985; Nusier & Abu-Hamdeh, 2003; Robin et al., 1997; Usowicz et al., 1996; Vasseur et al., 1995).

W pracy jednego z amerykańskich naukowców zajmujących się własnościami termofizycznymi gruntów (Ochsner et al., 2001) znaleźć można podsumowanie

wszystkich badań w tym zakresie od 1909 roku. Autor artykułu wylicza 11 prac badawczych, w których mierzono współczynnik przewodzenia ciepła, z reguły na kilku rodzajach gruntu. Chociaż autorowi artykułu zapewne nie udało się dotrzeć do wszystkich prac (szczególnie pochodzących z byłego ZSRR), widoczne jest, jak rzadko podejmuje się ten temat badań.

W literaturze polskiej brak było szczegółowych danych na temat pomiarów przewodnictwa cieplnego gruntów, lukę tą wypełniły częściowo badania zrealizowane przez autorkę w latach 2003-2005, a ich wyniki można znaleźć w jej publikacjach (Gontaszewska 2006a, 2006b, 2007).

Niniejsza praca pokazuje wyniki otrzymane w trakcie badań nad piaskiem kwarcowym, a więc gruntem w pewnym stopniu „modelowym”. Według danych literaturowych piasek ten powinien posiadać współczynnik przewodnictwa cieplnego w granicach 0,3 – 5,0 [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]. Znana jest także zależność pomiędzy wilgotnością piasku a jego przewodnictwem cieplnym, jest ono bowiem najwyższe w stanie saturacji. Tabela 1 podaje wartości współczynników przewodzenia ciepła dla piasków wg różnych autorów.

Tab.1. Współczynnik przewodzenia ciepła [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]

typ gruntu/skały	wg Plewy [1994]	wg nomogramów Johansona [Farouki 1985]	wg VDI 4640-1
piasek drobnoziarnisty	1,50 – 1,70	0,5 – 4,0	0,3 – 5,0, w tym: suchy 0,3 – 0,8 nawodniony 1,7–5,0
piasek średnioziarnisty	1,60		
piasek pylasty	1,55		

METODYKA BADAŃ

Każdą próbkę gruntu badano na 4 lub 5 stopniach wilgotności, w tym wilgotności naturalnej oraz w stanie pełnej saturacji ($S_r=1,0$). Wilgotność gruntu mierzono zgodnie z wytycznymi normy PN-88/B-04481 *Grunty budowlane. Badanie próbek gruntu*. Każde badanie przewodnictwa cieplnego próbki polegało na czterech pomiarach przy zróżnicowanych napięciach generowanych przez sondę. Napięcie oraz czas jego działania dopasowywano doświadczalnie do każdej próbki. Generalnie wyższe wartości przykładanego napięcia potrzebne są do pomiarów wyższych wartości współczynnika przewodzenia ciepła. Próbki gruntów niespoistych badano także w stanie suchym, tzn. po 24-godzinnym suszeniu w temperaturze 105°C. Wykonano także analizy granulometryczne dla wszystkich gruntów niespoistych.

Próbki gruntu umieszczane były w szczelnych pojemnikach o średnicy 110 mm i wysokości 250 mm i dogęszczane do średnich wartości stopnia zagęszczenia. Dogęszczanie to odbywało się za pomocą kilkusekundowych uderzeń pojemnikiem o twardą powierzchnię po każdorazowym nałożeniu 1/3 objętości próbki. Przed każdym pomiarem przeprowadzano stabilizację termiczną próbki do temperatury 20°C.

Zasada działania aparatury pomiarowej opiera się na „teorii próbki w stanie

nieustalonym" (Non-Steady-State Probe). Sonda pomiarowa składa się z metalowej igły, która jest idealnie liniowym źródłem ciepła oraz czujnika ciepła, który je mierzy (Rys.1.). Teoria ta opiera się na własnościach liniowego źródła ciepła: w krótkim czasie wzrost temperatury zależy jedynie od ilości dostarczonego ciepła Q oraz przewodnictwa cieplnego medium λ . Zależność ta jest następująca:

$$\Delta T = \frac{Q(\ln t + B)}{4\pi\lambda} \quad (1)$$

gdzie:

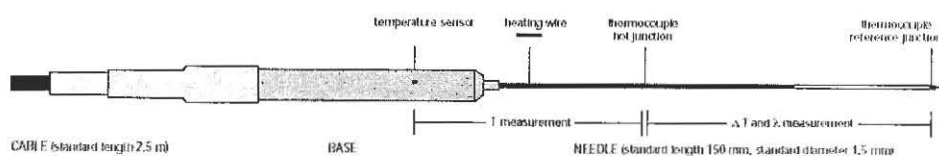
ΔT – wzrost temperatury [K];

Q – dostarczone ciepło [W m^{-1}];

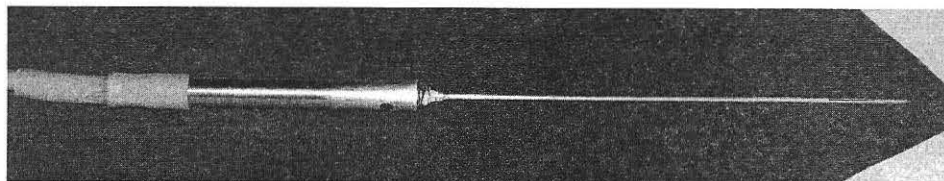
t – czas [s];

B – stała [-];

λ – współczynnik przewodzenia ciepła [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]



Rys.1. Sonda pomiarowa.



Fot. 1. Sonda pomiarowa. Widoczny czujnik temperatury zewnętrznej (okrągły otwór). Igła ma długość 15 cm oraz średnicę 1,5 mm.

Pomiary wykonywane były sondą TP02 firmy Hukseflux zgodną z amerykańską normą ASTM i zgodnie z jej zaleceniami.

W metalowej igle sondy pomiarowej znajdują się dwie bardzo czułe termopary typu 1Cu-CuNi typ K oraz czujnik temperatury zewnętrznej typu Pt 1000 (rys.8.1.). Jako wynik pomiaru otrzymuje się m.in. dane dotyczące napięć [mV] zarejestrowanych na poszczególnych czujnikach, temperatury oraz ewentualnych błędów. Z danych tych należy obliczyć wartość A :

$$A = \frac{V_{t_1} - V_{t_2}}{S} \cdot \frac{4\pi}{Q} \quad (2)$$

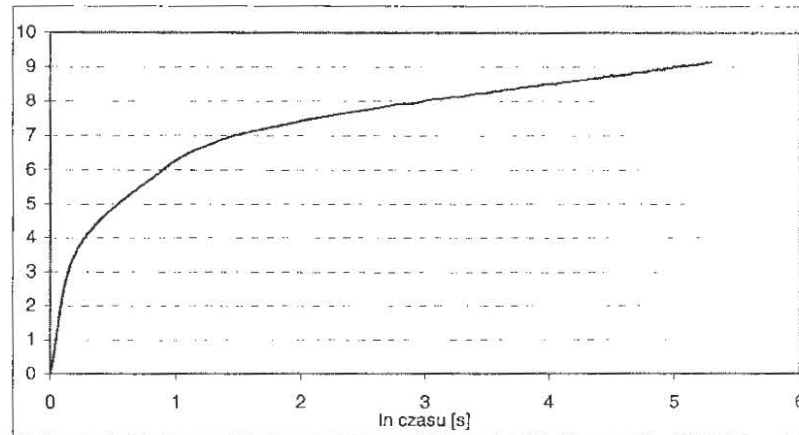
gdzie:

V_{t1} – napięcie na termoparze w części „grzejącej” igły sondy [mV];

V_{t2} – napięcie na termoparze na końcu igły sondy [mV];

S – czułość sondy [mV K^{-1}];

Q – dostarczone ciepło [W m^{-1}]



Rys.2. Przykład krzywej interpretującej wyniki badań. $\lambda=2,05 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$

Rys. 2. pokazuje krzywą zmienności wartości A w czasie. Aby znaleźć wartość λ należy znaleźć idealnie prostoliniowy odcinek tej krzywej i zapisać jej wzór jako $y = ax + b$, gdzie $1/a$ odpowiada współczynnikowi przewodzenia ciepła λ .

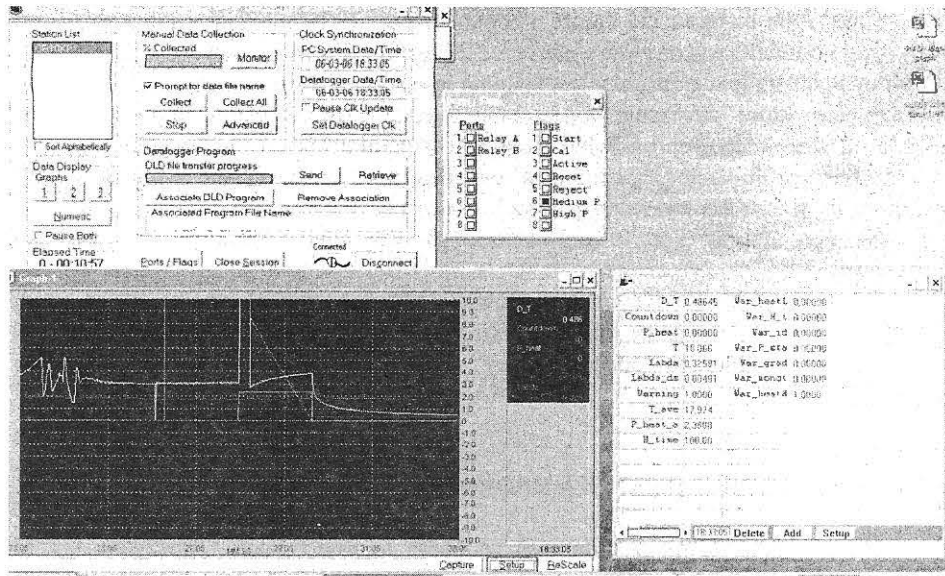
Procedura pomiarowa pozwala na indywidualne dostosowanie czasu pomiaru oraz ilości dostarczanego ciepła do każdej próbki. Wartości te należy dobrać tak, aby krzywa (rys.2.) była jak najbardziej „idealna”.

Możliwy jest następujący wybór ilości dostarczanego do gruntu ciepła:

- ciepło niskie (ok. $0,71 \text{ W m}^{-1}$);
- ciepło średnie (ok. $2,37 \text{ W m}^{-1}$);
- ciepło wysokie (ok. $3,88 \text{ W m}^{-1}$).

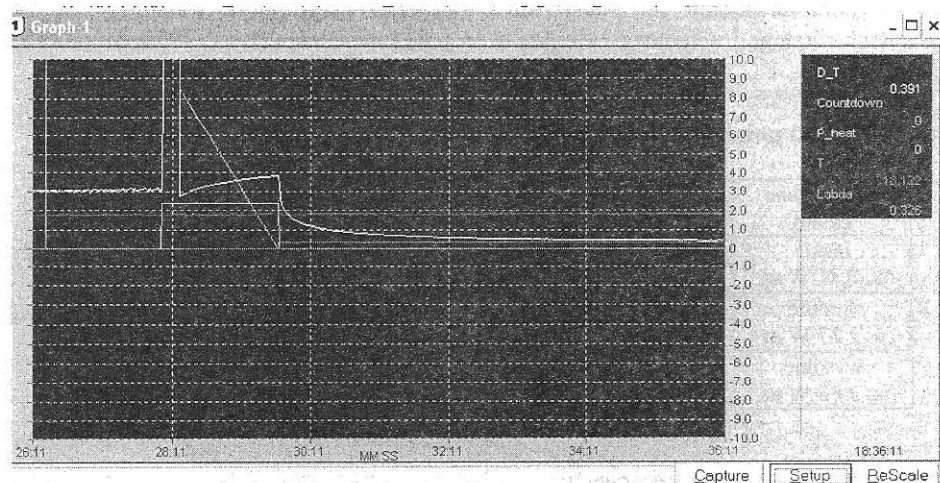
Wartości te nie są identyczne dla każdego pomiaru i mogą różnić się o ok. $0,1 \text{ W m}^{-1}$, gdyż wytwarzana przez sondę ilość ciepła zależna jest od napięcia zasilającego sondę. Napięcie w sieci podlega pewnym wahaniom, co uwidaczniało się w wartościach wytworzonego ciepła. Nieco inne były także wartości napięcia zasilania podczas badań terenowych, gdy aparatura pomiarowa nie była zasilana z sieci lecz z samochodowego akumulatora. Wahania te nie mają jednak wpływu na ostateczny wynik pomiarów, gdyż wartość wytworzonego ciepła jest za każdym razem uwzględniana podczas obliczeń (parametr Q we wzorze 2.).

Możliwa jest także modyfikacja czasu badań. Najczęściej pomiary są prowadzone przez 100 lub 200 sekund, choć możliwe jest także zaprogramowanie 1000s. Zalecany jest jak najkrótszy możliwy czas, standardowo stosowano czas 200s.



Fot.2. Okna programu PC208W 3.3 zarządzającego aparaturą pomiarową.

W lewym górnym rogu okno główne, poniżej wykres przedstawiający wartości temperatur na poszczególnych czujnikach, po prawej u góry okno służące do wybierania ilości dostarczanego ciepła, po lewej na dole okno przedstawiające wyniki pomiaru i ewentualne błędy.



Fot.3. Okno programu przedstawiające wykres wartości temperatur na poszczególnych czujnikach.

Linia biała (D_T) – różnica temperatur pomiędzy czujnikami, l. zielona (Countdown) – czas pozostały do końca pomiaru, linia n.(P_heat) – ilość dostarczanego ciepła; l. czerwona (T) – temperatura gruntu, linia r.(Labda) – pomierzony współczynnik przewodzenia ciepła. Na osi x – czas, jaki upłynął od startu programu

Czas 200s oznacza, że całość pomiaru trwała 400s, gdyż przed rozpoczęciem właściwego pomiaru wykonywany jest przez 200s pomiar temperatury wewnątrz próbki, który pomaga ustalić, czy próbka jest stabilna termicznie. Następnie do igły podłączane jest napięcie, które powoduje wytwarzanie ciepła. Ilość wytworzonego ciepła jest zależna od wcześniejszych ustawień przyrządu. Aparatura rejestruje co 1,25 s odczyty na wszystkich czujnikach i zapisuje je w formie arkusza danych. Dane z arkusza należy podstawić do wzoru 2. i wykreślić krzywą jak na rys.2.

Na Fot. 2 oraz Fot. 3. pokazano okna programu zarządzającego aparaturą pomiarową.

Uzyskane arkusze danych importowano do programu Microsoft Excel, który wykreślał krzywą, a następnie szukał wzoru prostych stycznych do krzywej. Z pośród kilku wzorów wybierano odpowiadający najbardziej prostoliniowemu odcinkowi krzywej.

OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA BADANEGO GRUNTU

Grunt wykorzystany w badaniach pochodzi z miejscowości Osiecznica. Jest to piasek kwarcowy o charakterystycznej białej barwie. Wg normy PN-86/B-02480 „Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów” jest to piasek średni. Osiecznica znajduje się na terenie Borów Dolnośląskich, ok. 12 km na północny zachód od Bolesławca. Badany piasek zaliczany jest do serii kwarcytowo – piaszczystej pochodzącej z oligocenu i miocenu (Kozłowski, 1986). Piaski tej serii zubożone są w składniki mniej odporne, występuje w nich jedynie materiał kwarcowy i krzemionkowy. Są one pozostałościami po pokrywach zwietrzelinowych, które utworzyły się w warunkach ciepłego i wilgotnego klimatu w eocenie i miocenie (Dyjur, 1979; Stupnicka, 1997).

Tab. 2. Wyniki pomiarów w $W m^{-1} K^{-1}$

dostarczane ciepło	$w_n=0\%$	$w_n=6,68\%$	$w_n=10,95\%$	$w_n=15,35\%$	$w_n=21,19\%$
niskie	0,27				
ok. $0,71 W m^{-1}$	0,30				
średnie	0,29	1,33	1,48	1,98	2,08
ok. $2,37 W m^{-1}$	0,29	1,56	1,61	2,22	2,12
wysokie		1,55	1,69	2,09	2,09
ok. $3,88 W m^{-1}$		1,58	1,83	2,18	2,15

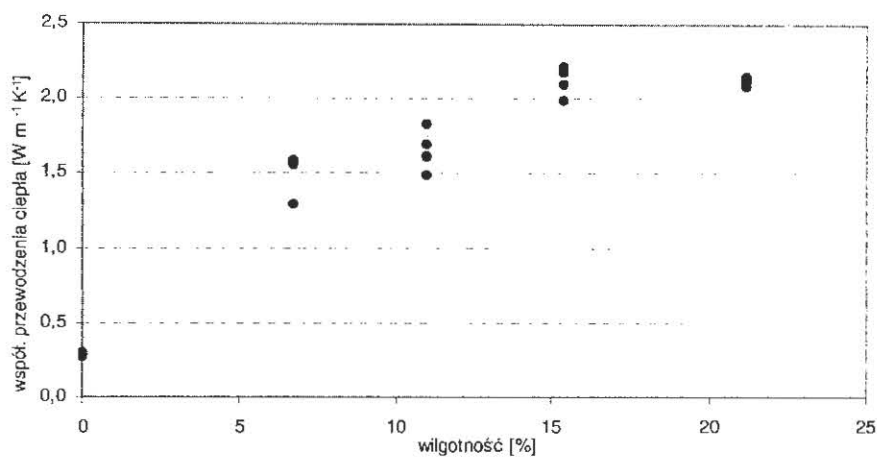
WYNIKI POMIARÓW I WNIOSKI

Piasek kwarcowy przebadano dla pięciu różnych wilgotności, w tym dla stanu powietrznosuchego oraz stanu saturacji według metodyki opisanej powyżej. Dla każdej wilgotności wykonano cztery pomiary, w tym dwa dla ciepła średniego i dwa dla ciepła wysokiego. Wyjątkiem był grunt suchy, gdzie pomiary wykonano odpowiednio dla

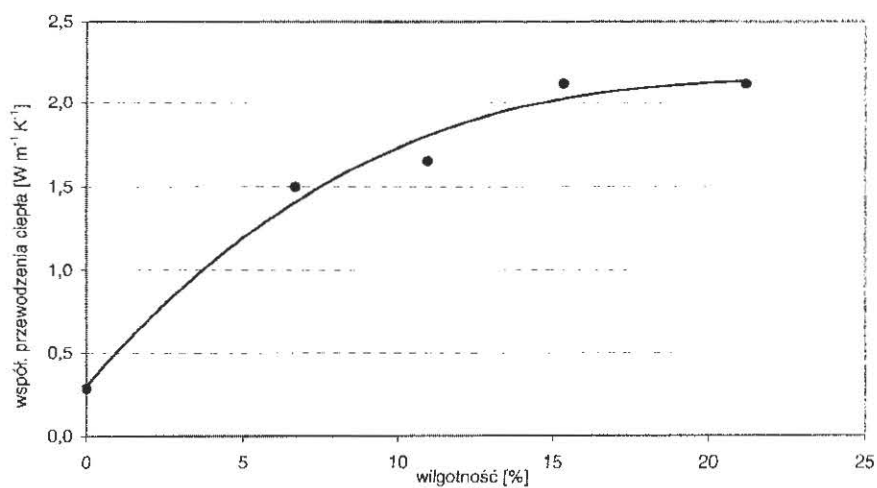
ciepła niskiego i średniego.

Na rys. 3. oraz w tab. 2. pokazano wyniki uzyskane w trakcie pomiarów.

Widoczny jest niewielki rozrzut uzyskanych wyników dla tej samej próbki. Wynika on z innego ułożenia igły sondy w gruncie, tzn. igła sondy była wbijana od nowa przez każdym pomiarem. Wszystkie uzyskane wyniki wyinterpretowano z prawidłowych krzywych (rys. 2.)



Rys.3. Wyniki pomiarów dla poszczególnych wilgotności



Rys.3. Uśrednione wyniki pomiarów dla poszczególnych wilgotności wraz z linią trendu

Widoczny jest także wzrost wartości współczynnika przewodzenia ciepła wraz ze wzrostem wilgotności gruntu. Maksymalne wartości współczynnika przewodzenia ciepła występują w stanie pełnego nasycenia porów gruntu wodą (stan saturacji). Z wykresów (rys. 3. i rys.4.) wynika jednak, że średnia zmierzonych wartości jest najwyższa dla wilgotności 15,35 %. Można fakt ten tłumaczyć tym, że badany piasek osiągnął stan saturacji pomiędzy wartościami wilgotności 15,35 oraz 21,19%. Wówczas dla najwyższej badanej wilgotności wartość współczynnika przewodzenia ciepła będzie nieznacznie niższa od maksimum. Przy dalszym zwiększaniu wilgotności współczynnik ten będzie malał, gdyż zostanie zerwana „łączność” pomiędzy ziarnami kwarcu, które mają znacznie wyższe przewodnictwo cieplne niż woda (ok. $8,0 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ dla kwarcu i $0,5911 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ dla wody w 20°C).

Otrzymane wyniki mieszczą się w zakresach podawanych w literaturze oraz normach niemieckich, ale są zdecydowanie niższe od podawanych tam wartości maksymalnych. Tymczasem piasek kwarcowy w stanie saturacji powinien charakteryzować się najwyższymi możliwymi wartościami przewodnictwa cieplnego dla tego gruntu (ok. $5,0 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ wg VDI-Richtlinien, ok. $4,0 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ wg Plewy). Najpowszechniej stosowane nomogramy Johansena (Burn, 1991; Farouki, 1984; Hinkel i in., 2001; Osterkamp, 1987 za Johansenem 1975) pokazują dla wilgotności 20 %, gęstości $1,8 \text{ gcm}^{-3}$ i stanu saturacji współczynnik przewodzenia ciepła ok. $3,2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Johansen oprócz wielu nomogramów podaje też kilka wzorów dla szacowania przewodnictwa cieplnego gruntów. Najczęściej stosowany opiera się na średniej geometrycznej przewodnictwa cieplnego poszczególnych składników gruntu:

$$\lambda_{og} = (\lambda_{sz})^{1-\phi} (\lambda_w)^{\phi'} (\lambda_l)^{\phi''} \quad (3)$$

gdzie:

λ_{og} - współczynnik przewodzenia ciepła gruntu [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$];

λ_{sz} - współczynnik przewodzenia ciepła szkieletu ziarnowego [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$];

λ_w - współczynnik przewodzenia ciepła wody [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$];

λ_l - współczynnik przewodzenia ciepła lodu [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$];

ϕ - porowatość gruntu [-];

ϕ' - ułamek objętości gruntu zajęty przez wodę [-];

ϕ'' - ułamek objętości gruntu zajęty przez lód [-].

W stanie saturacji dla minimalnej porowatości piasku (20%) otrzymuje się z powyższego wzoru wartość $4,75 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, natomiast dla maksymalnej porowatości piasku (48%) $2,29 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ (wartości porowatości za Pazdrą, 1977). Druga z podanych wartości jest zbliżona do wartości uzyskanych w trakcie badań.

Warto jednak nadmienić, że autorka w trakcie swoich pomiarów (ok. 500 dla piasków) nie spotkała się z wartościami współczynnika przewodzenia ciepła wyższymi niż $3,0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, zarówno podczas pomiarów laboratoryjnych, jak i terenowych.

LITERATURA

- ABU-HAMDEH N.H. 2000, Effect of tillage treatments on soil thermal conductivity for some Jordanian clay loam and loam soils. *Soil & Tillage Research*, vol. 56, 145-151
- ABU-HAMDEH N.H., 2001 Measurement of the thermal conductivity of sandy loam and clay loam soils using single and dual probes, *Journal of Agricultural and Engineering Research, Soil and Water*, vol. 80(2), 209-216
- ABU-HAMDEH N.H., REEDER R.C., 2000, Soil Thermal Conductivity: Effects of Density, Moisture, Salt Concentration and Organic Matter, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, 1285-1290.
- BURN C.R., 1991, Permafrost and ground ice conditions reported during recent geotechnical investigations in the Mayo District, Yukon Territory. *Permafrost and Periglacial Processes*, vol. 2, 259-268
- DYJOR S., 1979, Rozwój pokryw zwietrzelinowych i serii ilastych w młodszym trzeciorzędzie Polski południowo – zachodniej. *Minerały i surowce ilaste*, Mat. Konf. PAN, Warszawa
- FAROUKI O.T., 1985, Ground thermal properties. [w:] *Thermal design considerations in frozen ground engineering*, ed. T.G. Krzewinski, R.G. Tart, ASCE, New York, 186-203.
- GONTASZEWSKA A., 2005, Estymacja przewodnictwa cieplnego gruntów na podstawie przewodnictwa cieplnego jego poszczególnych faz, *Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Pol. Wrocławskiej* 110, 183-193.
- GONTASZEWSKA A., 2006a: Własności termofizyczne gruntów okolic Zielonej Góry w aspekcie przemarzania, niepublikowana rozprawa doktorska, Instytut Geologii UAM, Poznań
- GONTASZEWSKA A., 2006b, Zróżnicowanie przewodnictwa cieplnego różnych typów genetycznych gruntów niespoistych, *Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej, Budownictwo* 29, Białystok
- GONTASZEWSKA A., 2007, Thermal Conductivity of Quaternary Sediments in West Poland, 16. *Tagung der Ingenieurgeologie*, Bochum
- HINKEL K.M., PAETZOLD F., NELSON F.E., BOCKHEIM J.G., 2001, Patterns of soil temperature and moisture in the active layer and upper permafrost at Barrow, Alaska: 1993 – 1999, *Global and Planetary Change* 29, 293-309.
- KOZŁOWSKI T., 2003, Głębokość przemarzania krajowych gruntów budowlanych w aspekcie PN-81/B-03020 i projektu jej zmian. *Inżynieria i Budownictwo*, 3
- KOZŁOWSKI S., 1986, *Surowce skalne Polski*, Wyd. Geologiczne, Warszawa
- NUSIER O.K., ABU-HAMDEH N.H., 2003, Laboratory techniques to evaluate conductivity for some soils. *Heat and Mass Transfer*, vol. 39, 119-123
- OCHSNER T. E., HORTON R., REN T.: A New Perspective on Soil Thermal Properties, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65 (2001) 1641-1647;
- OSTERKAMP T.E., 1987, Freezing and thawing of soils and permafrost containing unfrozen water or brine. *Water Resources Research*, vol. 23, no.12, 2279-2285
- PLEWA S., 1994, Rozkład parametrów geotermalnych na obszarze Polski, Wyd. CPPGSMiE PAN, Kraków

- ROBIN P., CELLIER P., RICHARD G., 1997, Theoretical and field comparison of two types of soil heat fluxmeter. *Soil Technology*, vol 10, 185 – 206
- STUPNICKA E., 1997, *Geologia regionalna Polski*, Wyd. Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa
- TPSYS02 Thermal Conductivity Measurement System, User Manual, Hukseflux Thermal Sensors, Delft;
- USOWICZ B., KOSSOWSKI J., BARANOWSKI P., 1996, Spatial variability of soil thermal properties in cultivated fields. *Soil & Tillage Research*, vol. 39, 85 – 100
- VASSEUR G., BRIGAUD F., DEMONGODIN L., 1995, Thermal conductivity estimation in sedimentary basins, *Tectonophysics* 244, 167-174
- VDI-Richtlinien 4640-1 Thermische Nutzung des Untergrundes, 1998

Praca naukowa finansowana ze środków Komitetu Badań Naukowych w latach 2004-2006 jako projekt badawczy nr 4 T 12B 036 27.