

Mgr inż. Roman Domański
Instytut Techniki Ciepłej

POMIARY PRZEWODNOŚCI CIEPLNEJ GRUNTÓW ZAMROŻONYCH

1. Wstęp

W dziedzinie budownictwa lądowo-wodnego dość istotne znaczenie ma problem sezonowego przemarzania gruntów. Na skutek zewnętrznych zmian temperatury złoże, z którego zbudowana jest np. zapora, ulega przemarzaniu, co powoduje rozluźnienie struktury tego złoża, a w dalszej kolejności szybsze niszczenie danej budowli.

Do oceny głębokości i szybkości przemarzania danego złoża niezbędna jest znajomość jego dyfuzyjności cieplnej. Przy znanym cieple właściwym i gęstości danego gruntu, do wyznaczenia dyfuzyjności cieplnej niezbędna jest znajomość jego przewodności cieplnej.

Celem pracy było doświadczalne wyznaczenie przewodności cieplnej z kilku próbek gruntów przy średniej temperaturze próbki w zakresie od -10°C do -20°C , dla różnych gęstości próbek i różnej zawartości wody.

2. Metoda i wyniki pomiaru przewodności cieplnej

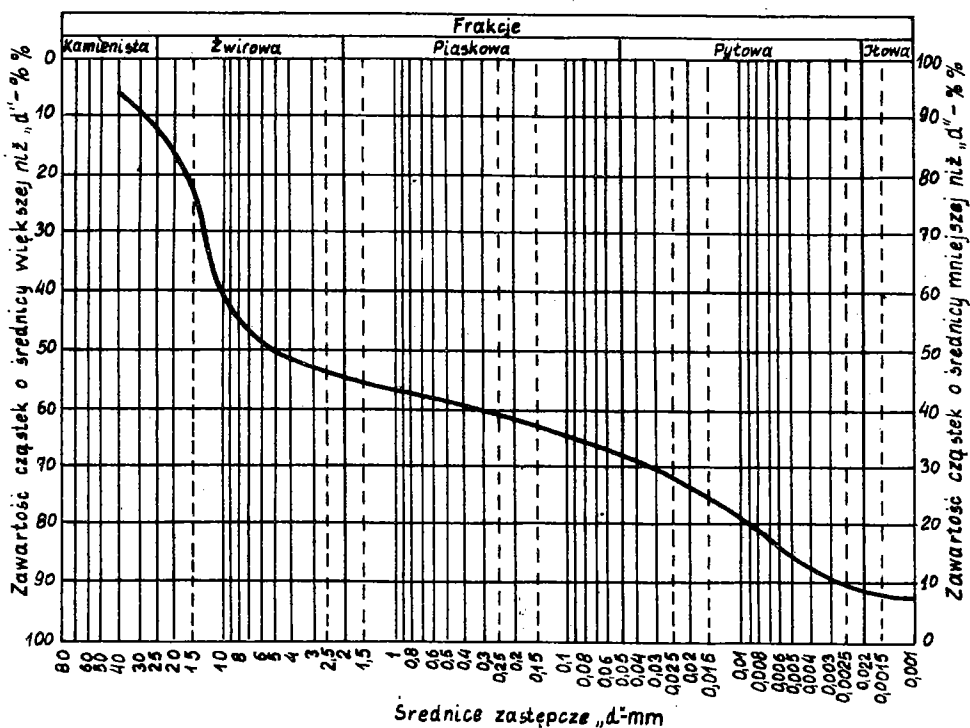
2.1. Wstępna charakterystyka złoża badanego

Przedmiotem badań były grunty granitowe grubokruchowe z dodatkiem frakcji gruntów gliniastych z dorzecza Dunajca oraz grunt z korpusu zapory w Wiśle-Czarne.

Próbka nr 1 (dorzecze Dunajca) miała ziarna o wymiarach maksymalnych $60 \times 30 \times 20$ mm i minimalnych $2 \times 1,5 \times 1$ mm. Prób-

ka nr 2 także z dorzecza Dunajca była złożem składającym się z pyłu, drobnych ziaren o wielkościach $0,5 \times 0,5 \times 1$ mm i bardzo niewielkiej ilości ziaren dużych o wymiarach rzędu $50 \times 20 \times 20$ mm. Próbką nr 3 była sporządzona z mieszaniny suchego złoża próbek 1 i 2 w stosunku wagowym 1:1.

Następne trzy próbki (oznaczone 4, 5, 6) sporządzono ze złoża stosowanego na budowę korpusu zapory w Wiśle-Czarne. Przykładowo na rys.1 przedstawiono wykres uziarnienia tego gruntu po odrzuceniu frakcji o średnicach większych od 40 mm.



Rys.1. Wykres uziarnienia gruntu z korpusu zapory w Wiśle-Czarne (po odrzuceniu frakcji $d > 40$ mm)

Dokładne omówienie sposobu przygotowania próbek zostanie podane w dalszej części pracy.

2.2. Zasada pomiaru i zastosowany układ pomiarowy

Duże wymiary znacznej ilości ziaren gruntu a w szczególności fakt, że badany grunt zawierał ziarna o średnicy zastępczej

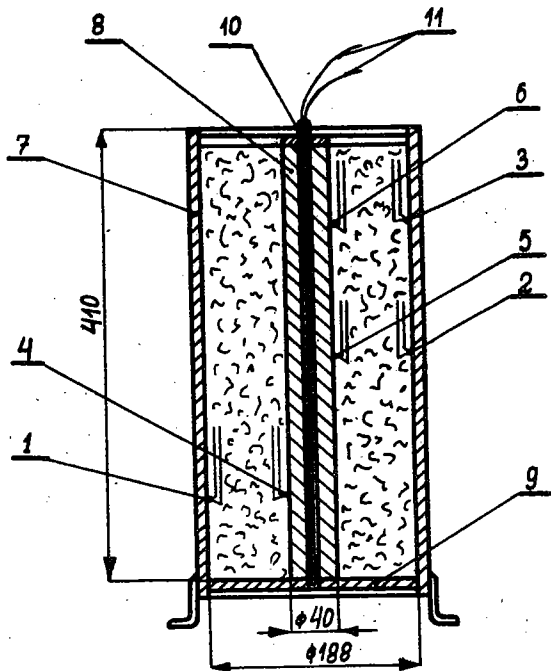
czej powyżej 40 mm zmuszały do przyjęcia objętości próbki rzędu kilkudziesięciu dm³. Powodowało to, że masa złoża, które należało poddać badaniu wynosiła ponad 20 kg. Głównie z tego powodu odrzucono metody stanu nieustalonego, które wymagają długich serii pomiarowych i związanego z tym wielokrotnego przenoszenia próbki. Przyjęto, że pomiary zostaną wykonane w stanie ustalonym w układzie cylindrycznym w komorze chłodni.

Układ pomiarowy przedstawiony na rys.2, stanowiła rura stalowa, wewnątrz której osiowo umieszczony był pręt miedziany o średnicy 40 mm. W osi pręta umocowano w osłonie ceramicznej grzejnik w postaci nici kanthalowej.

Ścianka rury stalowej o grubości 9 mm i pręt miedziany zapewniały izotermiczność wewnętrznej i zewnętrznej powierzchni walcowej próbki.

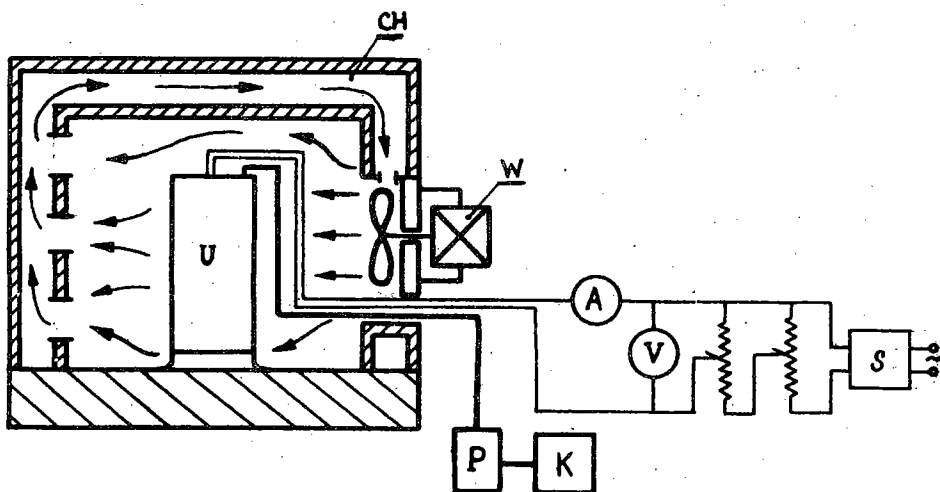
Do pomiaru i kontroli rozkładu temperatury na powierzchni wewnętrznej rury stalowej i powierzchni zewnętrznej pręta miedzianego zastosowano trzy pary termoelementów, których rozmieszczenie pokazano

na rys.2. Takie rozłożenie termoelementów dawało jednocześnie informację o osiowym rozkładzie temperatury i pozwalało na ocenę strat ciepła przez powierzchnie czołowe próbki. Opisany układ pomiarowy umieszczono w komorze chłodniczej o wymiarach 600 mm × 700 mm × 650 mm.



Rys.2. Schemat układu pomiarowego: 1, 2, 3, 4, 5, 6 - końcówki termoelementów, 7 - obudowa stalowa, 8 - pręt miedziany, 9 - przekładka izolacyjna, 10 - nić kanthalowa w osłonie ceramicznej, 11 - przewody zasilania grzejnika

W celu odizolowania złoza od blachy stalowej stanowiącej dolną powierzchnię układu pomiarowego użyto przekładki z polichlorku winylu o grubości 5 mm. Schemat stanowiska pomiarowego pokazano na rys.3.



Rys.3. Schemat stanowiska pomiarowego: U - układ pomiarowy wypełniony badanym gruntem, CH - chłodnia, W - wentylator z silnikiem, P - przełącznik termoelementów, K - kompensator, A - amperomierz, V - woltomierz, S - stabilizator napięcia

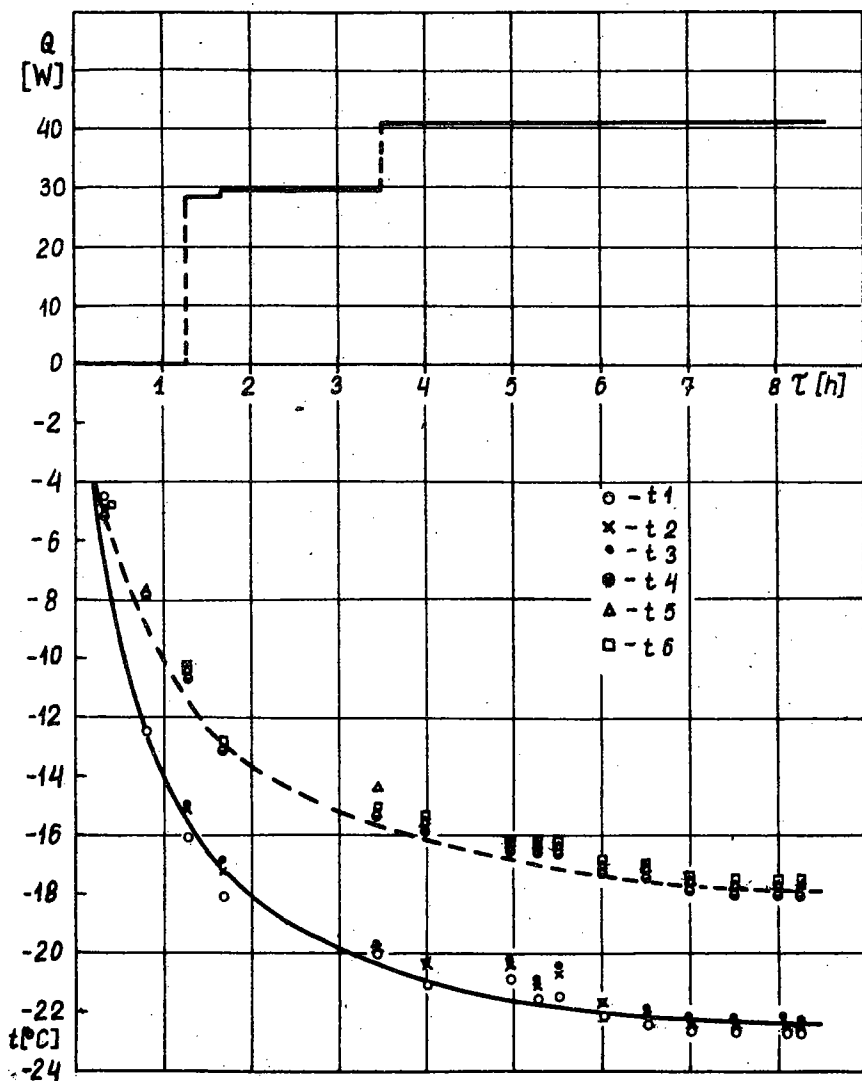
Dla przypadku ustalonego przewodzenia ciepła przez ściankę walcową o długości L , przy założeniu, że przepływ ciepła odbywa się tylko w kierunku promieniowym ilość ciepła przewodzona w jednostce czasu jest określona zależnością

$$\dot{Q} = \frac{2\pi\lambda L(T_{w1} - T_{w2})}{\ln \frac{r_z}{r_w}} \quad (1)$$

Związek ten przy znanym r_z , r_w , T_{w1} , T_{w2} oraz znanym \dot{Q} (poprzez pomiar mocy grzejnika) pozwala na wyznaczenie średniej wartości współczynnika przewodzenia ciepła w danym zakresie temperatur według wzoru

$$\lambda = \frac{\dot{Q}}{(T_{w1} - T_{w2})2\pi L} \ln \frac{r_z}{r_w} \quad (2)$$

W celu obliczenia przewodności cieplnej do wzoru (2) podstawiono wartość średnią z różnicy temperatur wszystkich trzech par termoelementów.



Rys.4. Zmiany temperatury i mocy w funkcji czasu dla próbki nr 1; t1, t2, t3, t4, t5, t6 - wskazania termoelementów 1, 2, 3, 4, 5, 6 zgodnie z rys.2

Straty ciepła przez powierzchnie czołowe próbki i grzejnika wyznaczono w sposób następujący. Obliczono współczynnik przejmowania ciepła na powierzchniach czołowych i współczynniki przenikania ciepła dla powierzchni dolnej i górnej próbki oraz dla powierzchni czołowych grzejnika; uwzględniając logarytmiczny rozkład temperatury wewnątrz złoża oraz temperatury powierzchni grzejnika (ze wskazań skrajnych termoelementów) przy znanej temperaturze otoczenia obliczono ilość ciepła traconego w jednostce czasu. Dla przeprowadzonych pomiarów straty te wynosiły $15 \pm 20\%$ ciepła doprowadzonego do grzejnika, co uwzględniono przy wyznaczaniu przewodności cieplnej.

Osiąganie stanu ustalonego przez układ pomiarowy pokazano na rys.4, przedstawiającym zmiany wskazań termoelementów i mocy grzejnika w czasie dla próbki nr 1. Średnia logarytmiczna temperatura próbki wynosiła $t_{\text{śrm}} = -19,5^{\circ}\text{C}$ ($253,7\text{ K}$), a moc cieplna po uwzględnieniu strat $35,1\text{ W}$. Do obliczeń wzięto średnią różnicę temperatur z pomiarów przeprowadzonych po siódmej godzinie pomiaru. Moc zmieniano skokowo w czasie pierwszych trzech i pół godzin, po czym wartość jej pozostawała stała do końca pomiaru (rys.4).

Dla czasów większych od siedmiu godzin nie zaobserwowano żadnych wahań napięcia zasilającego. Średnia temperatura otoczenia (tzn. wewnątrz chłodzi) wynosiła $-37,2^{\circ}\text{C}$ ($236,0\text{ K}$), cykliczność włączania co 30 min, a czas pracy chłodzi średnio około 8 min.

2.3. Wyniki pomiarów i opis próbek

Próbkę nr 1 stanowiło złożo opisane w punkcie 2.1 w ilości $21,05\text{ kg}$, do którego dodano $4,75\text{ kg}$ wody. Układ pomiarowy napełniono złożem bez ubijania a następnie zalewano wodą aż do całkowitego wypełnienia.

Próbkę nr 2 stanowiło złożo opisane w punkcie 2.1. Złożo to na skutek drgań chłodzi ulegało ubiciu tak, że przed przystąpieniem do pomiarów należało kilkakrotnie uzupełnić ilość gruntu w układzie.

Próbka nr 2 zawierała $20,20\text{ kg}$ złoża oraz $4,00\text{ kg}$ wody. Wodę dolewano podobnie jak poprzednio do całkowitego wypełnienia układu pomiarowego.

Tablica 1

Lp.	Próbka nr	$t_{\text{śrm}}$ [°C]	λ [$\frac{W}{mK}$]	$\lambda_{\text{śr}}$ [$\frac{W}{mK}$]	Błąd max [%]
1	1	- 19,5	4,54	4,59	± 2,85
2	1	- 13,4	4,61		
3	1	- 10,7	4,49		
4	1	- 12,0	4,72		
5	2	- 14,8	3,85	3,845	± 3,25
6	2	- 10,0	3,86		
7	2	- 10,4	3,95		
8	2	- 7,95	3,72		
9	3	- 12,6	4,38	4,34	± 1,38
10	3	- 10,1	4,30		
11	3	- 10,5	4,40		
12	3	- 11,2	4,28		
13	4	- 16,1	0,553	0,540	± 2,42
14	4	- 19,5	0,527		
15	5	- 10,5	1,318	1,254	± 5,08
16	5	- 13,5	1,19		
17	6	- 16,5	3,326	3,474	± 4,38
18	6	- 15,0	3,63		

Próbka nr 3 zawierała 21,8 kg suchej mieszanki złoża z próbek 1 i 2 w stosunku wagowym 1 : 1 oraz 3,2 kg wody.

Próbka nr 4 była spulchnionym wilgotnym złożem o charakterze niejednorodnym, dostarczonym przez Zakład Geotechniki. Próbka ta ulegała w czasie pracy chłodni ubijaniu i przed przystąpieniem do pomiarów należało kilkakrotnie dodać pewną ilość złoża. Ostatecznie masa próbki wynosiła 17,04 kg.

Próbka nr 5 użyta do pomiarów miała masę 19,39 kg i była uzupełnioną o 1,45 kg złoża i 0,9 kg wody próbką nr 4.

Próbka nr 6 miała masę 24,56 kg. Otrzymano ją na drodze ubijania próbki nr 5 i uzupełnienia jej 3,07 kg złoża i 2,1 kg wody. Próbka ta podobnie jak próbki 1, 2, 3 była uzupełniona wodą aż do całkowitego nasycenia tak, że na jej powierzchni utworzyła się cienka warstewka wody. Zalewanie próbek nr 4 i 5 wodą w celu uzyskania próbek 5 i 6 powodowało usunięcie powietrza z gruntu i zmniejszenie objętości próbki, co pozwalało na znaczne zwiększenie ilości złoża a więc i całkowitej masy próbki.

Pomiary przeprowadzano przy różnych średnich temperaturach próbek i różnych temperaturach otoczenia (chłodni). Dla próbek nr 1, 2, 3 temperaturę chłodni zmieniano w granicach od $-30,8^{\circ}\text{C}$ + $-38,5^{\circ}\text{C}$, zaś dla próbek 4, 5, 6 od $-33,0^{\circ}\text{C}$ + $-35,0^{\circ}\text{C}$.

Wyniki pomiarów dla poszczególnych próbek i różnych ich średnich logarytmicznych temperatur przedstawiono w tabelicy 1.

Po uwzględnieniu błędów przypadkowych oszacowano, że dla pierwszych trzech próbek całkowity błąd pomiaru nie powinien przekraczać $\pm 6\%$, natomiast dla próbek nr 4, 5, 6, $\pm 10\%$.

3. Podsumowanie

Jak wynika z przeprowadzonych serii pomiarów (wartości średnie przedstawione w tabelicy 1) zmiany temperatury otoczenia w podanych zakresach jak i zmiany średniej logarytmicznej temperatury próbki (uzyskiwane przez zmianę mocy grzejnika) przy stałej średniej temperaturze otoczenia nie mają wpływu na przewodność cieplną. Dla wąskich przedziałów średnich temperatur próbki można przyjąć przewodność cieplną danej próbki za stałą. Jak widać zasadniczy wpływ na zmianę przewodności

cieplnej ma gęstość próbki i zawartość wody. Przy całkowitym nasyceniu wodą (próbka nr 6) przewodność cieplna złoża jest ponad sześć razy większa od przewodności próbki nr 4 o wilgotności wynoszącej 13,5% wagowych. Usunięcie szczelin powietrznych i powiązanie złoża lodem decyduje więc o przewodności gruntu.

Wydaje się, że przeprowadzone pomiary pozwolą na wstępne oszacowanie głębokości przemarzania gruntów i wskazują wyraźnie na decydujący wpływ gęstości i wilgotności złoża na jego przewodność cieplną. W celu ustalenia zależności przewodności cieplnej od zawartości wody i gęstości należałoby przeprowadzić znacznie bardziej obszerne pomiary.

BIBLIOGRAFIA

- [1] S t a n i s z e w s k i B.: Wymiana ciepła, podstawy teoretyczne. PWN. Warszawa 1963.
- [2] G o g ó ł W.: Wymiana ciepła. Tablice i wykresy, wyd. 2, WPW. Warszawa 1972.

ОПЫТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ЗАМОРОЖЕННЫХ ГРУНТОВ

К р а т к о е с о д е р ж а н и е

Представлено результаты измерений коэффициента теплопроводности нескольких образцов грунтов разных плотностей и сырости при температурах $253 \pm 263 \text{ K}$ ($-20 \pm -10^\circ\text{C}$).

Описано также теоретический принцип эксперимента и примененную схему экспериментальной установки.

THERMAL CONDUCTIVITY MEASUREMENTS IN DEEP FROZEN SOIL

S u m m a r y

The results have been presented in this paper of thermal conductivity measurements as performed on several soil test samples within the temperature range of 253 ÷ 263 K (-20 ÷ -10°C), with various density of specimens and water content thereof.

The method of the measurement and the system of measuring equipment applied have also been discussed herein.