

doc. dr Wiesław Gogół
mgr inż. Elżbieta Gogół
mgr inż. Ewa Artecka
Instytut Techniki Ciepłej

BADANIA PRZEWODNOŚCI CIEPLNEJ GRUNTÓW WILGOTNYCH

1. Wstęp

Określanie właściwości cieplnych gruntów, a przede wszystkim przewodności cieplnej, jest niezbędne przy obliczaniu rozkładów temperatur i strat cieplnych występujących w wielu złożonych zagadnieniach wymiany ciepła, wśród których należałoby wymienić zamrażanie gruntów pod chłodniami, zamrażanie gruntów stosowane przy budowie szybów, procesy termicznego naruszania struktury budowli ziemnych (tamy, wały przeciwpowodziowe) na skutek działania czynników atmosferycznych oraz straty ciepłe rurociągów i przewodów energetycznych układanych w ziemi.

Korzystanie z danych literaturowych w tym przypadku jest znacznie utrudnione; podawane wartości przewodności cieplnej gruntów - niekiedy bardzo rozbieżne dla tego samego rodzaju materiału - są fragmentaryczne i niekompletne [1, 10, 12], zarówno ze względu na małą liczbę badań, jak również braki w zdefiniowaniu rodzaju gruntu lub sprecyzowaniu warunków pomiaru (temperatury, gęstości, wilgotności). Tylko w nielicznych przypadkach przeprowadzono bardziej całościowe badania przewodności cieplnej [2,4].

Właściwości cieplne gruntów zmieniają się znacznie przy pozornie niewielkich zmianach czynników mających wpływ na proces przewodzenia ciepła w tych materiałach, co wynika z dość skomplikowanego mechanizmu tego procesu. Proces przewodzenia ciepła w gruncie, charakteryzujący się wartością przewodności cieplnej, uwarunkowany jest przewodzeniem ciepła w ziarnach

minerałów występujących w gruncie, przewodzeniem przez powietrze lub wodę wypełniające pory, ewentualną konwekcją swobodną wewnątrz porów, wymianą ciepła przez promieniowanie między ściankami ograniczającymi pory oraz przede wszystkim termicznym oporem kontaktowym na styku ziaren, zależnym między innymi od obecności wody, wreszcie dyfuzją masy (wody lub pary wodnej) przy istnieniu gradientów temperatury. W gruntach wilgotnych znajdujących się w temperaturach niższych od 0°C proces przewodzenia ciepła komplikuje się jeszcze bardziej na skutek przejścia fazowego części wody w lód i wyparcia pewnej ilości powietrza w porach przez wodę.

Z powyższych uwag wynika, że przy rozwiązywaniu konkretnych zagadnień wymiany ciepła konieczne jest doświadczalne wyznaczanie przewodności cieplnej gruntu; niezbędne są zatem prace pozwalające ustalić metodykę wykonywania tego rodzaju eksperymentów.

Przewodność cieplna określonego gruntu (rodzaj minerałów, kształt i wielkość ziaren) będzie zależała od ciężaru objętościowego, wpływającego na termiczny opór kontaktowy między ziarnami i porowatość oraz od wilgotności i temperatury.

W pracy przedstawiono wyniki badań przewodności cieplnej dwóch rodzajów gruntów wilgotnych - lessu zwierzyńskiego i gliny z wału wiślanego^{*)} - przeprowadzonych w Pracowni Przewodzenia Ciepła Instytutu Techniki Ciepłej PW, w zakresie temperatur dodatnich i ujemnych (-15°C ÷ $+25^{\circ}\text{C}$), przy ciężarach objętościowych od 1200 do 2000 kg/m^3 oraz wilgotnościach od stanu powietrzno-suchego do około 20%.

Badane grunty charakteryzowały się następującym składem:

- less zwierzyński: frakcja piaskowa (2 ÷ 0,05 mm) - 20%,
frakcja pyłowa (0,05 ÷ 0,002 mm) - 69,5%, frakcja iłowa (<0,002 mm) - 10%;
- glina z wału wiślanego: frakcja piaskowa - 43%, frakcja pyłowa - 46%, frakcja iłowa - 11%.

^{*)} Część badań wymienionych dwóch rodzajów gruntów przeprowadzono dla Akademii Rolniczej w Krakowie.

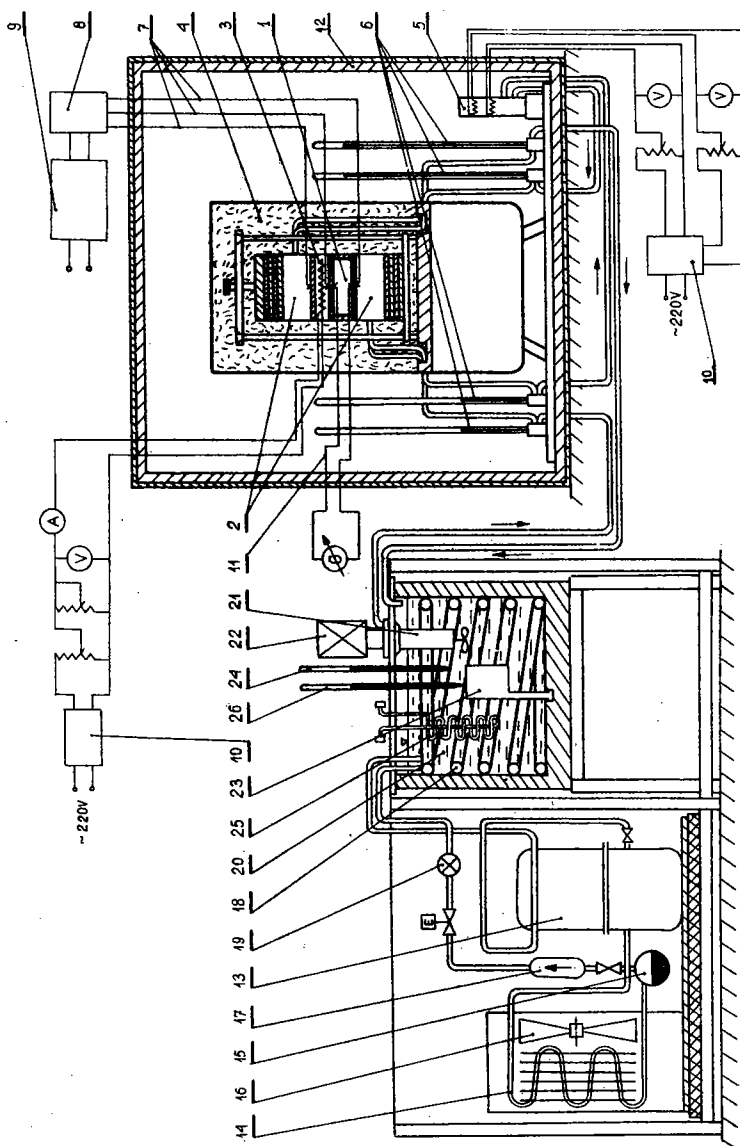
2. Metodyka badań i opis stanowisk pomiarowych

Przewodność cieplna lessu i gliny wyznaczana była trzema metodami. Jako podstawowa została zastosowana metoda stanu ustalonego przy użyciu zminiaturyzowanego aparatu płytowego; niewielkie wymiary aparatu oraz badanej próbki pozwoliły na przeprowadzanie pomiarów w temperaturach dodatnich i ujemnych. Dodatkowo w temperaturach dodatnich metodą stanu ustalonego badano przewodność cieplną gruntów w aparacie Bocka; dla porównania otrzymanych wyników zastosowano metodę stanu uporządkowanego, polegającą na kompleksowym wyznaczaniu przewodności cieplnej, dyfuzyjności cieplnej i ciepła właściwego.

2.1. Pomiary w stanie ustalonym zminiaturyzowanym aparatem płytowym

Do pomiarów przewodności cieplnej lessu i gliny zastosowany został, po dokonaniu odpowiedniej modyfikacji umożliwiającej badanie wilgotnych materiałów ziarnistych w temperaturach dodatnich i ujemnych, zminiaturyzowany aparat płytowy wykonany w Instytucie Techniki Ciepłej. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rys.1. Do otrzymywania temperatur ujemnych użyto agregatu chłodniczego XK 1,3L; parownik agregatu umieszczony był w ultratermostacie UT 12, wypełnionym mieszaniną glikolu etylenowego z wodą destylowaną. Regulacja temperatury w ultratermostacie dokonywana była za pomocą konwencjonalnego układu w jaki wyposażony jest ultratermostat. Ciecz chłodząca tłoczona przez pompę ultratermostatu krążyła w układzie zamkniętym przez aparat płytowy, przy czym między chłodnicą dolną i górną aparatu była ogrzewana za pomocą dwóch grzejników elektrycznych w tzw. "podgrzewaczu" o mocy regulowanej autotransformatorami.

Badany grunt umieszczany był w ramce ze szkła pleksi i przykrywany dobrze przylegającą folią teflonową (rys. 2a) lub w zupełnie szczelnym zasobniku składającym się z ramki ze szkła pleksi i dwóch pokryw aluminiowych, z których jedna mogła być odejmowana (rys.2b). W pokrywach aluminiowych wykonano otworki o głębokości 43 mm i średnicy 1 mm, w których u-



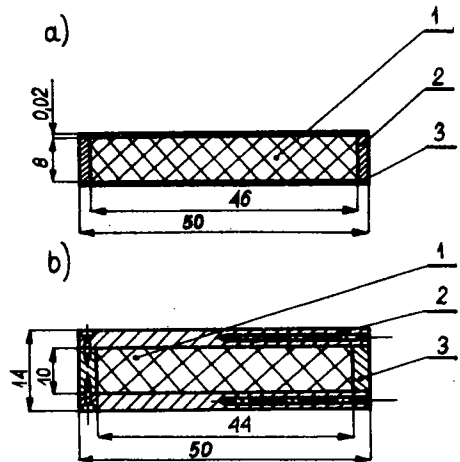
Rys. 1. Schemat stanowiska do pomiaru przewodności cieplnej w stanie ustalonym gruntów wilgotnych w zakresie temperatur dodatnich i ujemnych: 1 - zasobnik w próbka badanego materiału, 2 - chłodnice, 3 - grzejnik, 4 - izolacja cieplna, 5 - podgrzewacz, 6 - termometry, 7 - termoelementy, 8 - przełącznik, 9 - potencjometr, 10 - stabilizator prądu, 11 - termoelement różnicowy, 12 - osłona aparatu, 13 - sprężarka, 14 - skraplacz, 15 - zbiornik ciekłego czynnika, 16 - wentylator, 17 - pochłaniacz wilgoci, 18 - parownik, 19 - termostacyjny zawór dławiaczy, 20 - ultratermostat, 21 - pompa ultratermostatu, 22 - silnik, 23 - grzejnik elektryczny, 24 - termometr kontaktowy, 25 - dodatkowa chłodnica (nagrzewnica), 26 - termometr kontrolny

mieszczane były końce termoelementu różnicowego miedź - konstantan (średnica drutów 0,1 mm) izolowanego teflonem; otwórki, w celu uzyskania dobrego kontaktu termicznego termoelementu z zasobnikiem, wypełniane były częściowo mieszanką oleju silikonowego z pyłem krzemowym. Do pomiaru wskazań termoelementu zastosowano galvanometr lusterkowy o czułości $33 \cdot 10^{-9}$ A/dz i oporze wewnętrznym 27Ω .

Przed umieszczeniem zasobnika w aparacie płytki aluminiowe smarowane były również cienko pastą silikonową w celu zmniejszenia termicznego oporu kontaktowego między zasobnikiem a grzejnikiem i chłodnicą. W

czasie wykonywania pomiaru aparat płytowy znajdował się w szczelnej osłonie (izolowanej styropianem) pozwalającej prawie zupełnie wyeliminować wykraplanie się pary wodnej z powietrza na elementach aparatury przy pracy w temperaturach ujemnych. Przednią część osłony stanowiła łatwo odejmowana i odpowiednio uszczelniana płyta ze szkła pleksi, umożliwiająca dokonywanie odczytów wskazań termometrów oraz obserwację aparatu. Niezależnie od tych zabezpieczeń w osłonie i w przestrzeni pomiarowej aparatu znajdowały się pojemniki z żelazem krzemionkowym.

Z pomiarów wyznaczano pozorną przewodność cieplną λ_{poz} układu złożonego z zasobnika (lub ramki) i próbki badanego gruntu. Istotną przewodność cieplną λ gruntu odczytywano z wykresu cechowania $\lambda = f(\lambda_{poz})$ dla zasobnika (i osobnego wykresu dla ramki). Wykres cechowania otrzymano z obliczeń teoretycznych oraz z pomiarów przewodności cieplnej zasobnika wypełnionego materiałem o znanej przewodności cieplnej lub zmierzanej bezpośrednio w aparacie płytowym, w aparacie Bocka i



Rys.2 a) ramka: 1-badana próbka, 2-ramka ze szkła pleksi, 3-folia teflonowa, b) zasobnik; 1-badana próbka, 2-ramka ze szkła pleksi, 3-pokrywy aluminiowe

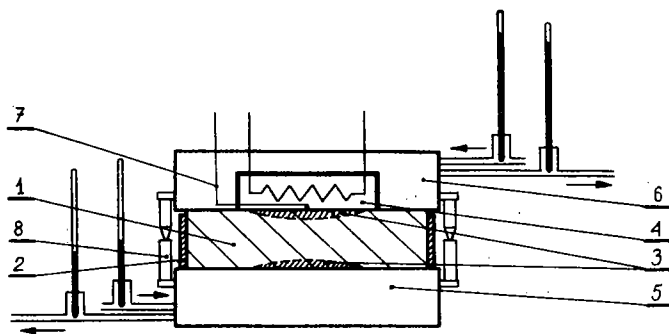
w stanie uporządkowanym; do cechowania zasobnika wykorzystano styropian, szkło pleksi, żywicę fenolową z pyłem miedzianym, żywicę fenolową z opiłkami aluminiowymi oraz lód.

Przy obliczaniu przewodności cieplnej uwzględniano opór cieplny warstw pasty silikonowej i płytek aluminiowych w przypadku pomiarów w zasobniku oraz folii teflonowej przy pomiarach w ramce.

Czas wykonywania pojedynczego pomiaru wynosił około 8 godzin; próbka znajdowała się w stanie równowagi termicznej około 3 godzin.

2.2. Pomiary w stanie ustalonym aparatem Bocka

Próbka badanego gruntu mierzona była w aparacie Bocka^{*)} w ramce ze szkła pleksi o wymiarach 240 × 240 × 35 mm z dnem wykonanym z folii polistyrenowej o grubości 0,07 mm. Dolna płyta aparatu przed umieszczeniem na niej ramki pokrywana była cienką warstwą pasty silikonowej z pyłem krzemowym w celu zmniejszenia termicznego oporu kontaktowego między płytą i folią. Próbka gruntu usypywana była o 1 ÷ 2 mm powyżej górnej



Rys.3. Schemat części układu pomiarowego aparatu Bocka: 1 - próbka badana, 2 - ramka ze szkła pleksi, 3 - obszary pobierania próbek gruntu do oznaczania różnic wilgotności w próbce, 4 - grzejnik, 5 - chłodnica, 6 - osłona grzejnika, 7 - termostos, 8 - śruby mikrometryczne do pomiaru grubości próbki

^{*)} Opis aparatu Bocka jako typowego aparatu płytowego do pomiaru przewodności cieplnej został pominięty.

krawędzi ramki tak aby w czasie pomiaru górna płyta aparatu opierała się wyłącznie o grunt badany. Stosunkowo duże wymiary próbki umożliwiały zbadanie zmian wilgotności powstałych w czasie pomiaru w badanym gruncie przez pobranie próbek materiału z obszarów położonych bezpośrednio przy płycie grzejnej i zimnej aparatu (rys.3). Różnice temperatur między powierzchniami próbki wynosiły około 10°C . Czas pomiaru przewodności cieplnej w aparacie Bocka wynosił około 6 godzin.

2.3. Pomiary w stanie uporządkowanym

Pomiary w stanie uporządkowanym polegały na wyznaczeniu dyfuzyjności cieplnej a badanej próbki gruntu w α -kalorymetrze (ochładzanie w wodzie) i ciepła właściwego c w λ -kalorymetrze (ochładzanie w powietrzu w warunkach konwekcji swobodnej); przewodność cieplna obliczana była przy znanej gęstości ρ z zależności $\lambda = a c \rho$ [3].

Próbki gruntu przeznaczone do badań umieszczane były w miedzianych kalorymetrach o wymiarach zewnętrznych $\varnothing 34 \times 70$ mm. Grubość ścianek kalorymetrów wynosiła 0,5 mm. Wszystkie powierzchnie kalorymetrów były chromowane, a powierzchnie zewnętrzne polerowane. Współczynnik przejmowania ciepła α na powierzchni kalorymetrów wyznaczono za pomocą α - kalorymetru o identycznym kształcie, wymiarach zewnętrznych i emisyjności powierzchni. Zmiany temperatury kalorymetru w czasie mierzono termoelementem różnicowym miedź - konstantan o średnicy drutów 0,1 mm. Jedna spoina termoelementu osłonięta izolacją z rurki teflonowej o średnicy 0,9 mm umieszczana była na głębokości około $2/3$ wysokości kalorymetru w jego osi. Druga spoina znajdowała się w ośrodku, w którym ochładzany był kalorymetr.

Pomiar dyfuzyjności cieplnej polegał na wyznaczaniu tempa chłodzenia m (względnych zmian temperatury próbki w czasie) kalorymetru z gruntem badanym w termostacie wodnym, zaopatrzonym w mieszadło o regulowanej ilości obrotów przy zachowaniu warunku $Bi \rightarrow \infty$ na powierzchni kalorymetru; uzyskanie warunku $Bi \rightarrow \infty$ a tym samym i $\alpha \rightarrow \infty$ następowało drogą kolejnych pomiarów tempa chłodzenia przy wzrastających stopniowo obrotach mieszadła i określeniu wartości asymptotycznej m_{∞} .

Z zależności

$$a = K m_{\infty},$$

gdzie: m_{∞} - tempo chłodzenia przy $Bi \rightarrow \infty$,

K - współczynnik kształtu ciała,

obliczano dyfuzyjność cieplną badanego gruntu.

Współczynnik kształtu ciała obliczano teoretycznie z wymiarów kalorymetru. Czas pomiaru w a - kalorymetrze wynosił około 4 min. Początkowa różnica temperatur między próbką a ośrodkiem wynosiła kilka $^{\circ}\text{C}$.

Pomiar ciepła właściwego przeprowadzany był w termostacie powietrznym (λ - kalorymetrze) o pojemności cieplnej $16,4 \frac{\text{kcal}}{^{\circ}\text{C}}$ i powierzchni wewnętrznej $3,22 \text{ m}^2$, wykonanym z alupolu (grubość ścianek 9 mm) i izolowanym styropianem; polegał on na wyznaczaniu w warunkach konwekcji swobodnej tempa chłodzenia kalorymetru napełnionego badanym gruntem oraz określaniu współczynnika przejmowania ciepła α na powierzchni kalorymetru przy użyciu α - kalorymetru wykonanego z miedzi o znanej pojemności cieplnej. Początkowa różnica temperatur między kalorymetrem a ośrodkiem wynosiła kilka $^{\circ}\text{C}$. Czasy ochładzania kalorymetru z gruntem badanym oraz α - kalorymetru wynosiły od 2 do 4 godzin. Schematy układów pomiarowych a - kalorymetru i λ - kalorymetru oraz metody obliczeń przedstawione są w pracy [3].

Przy ochładzaniu kalorymetrów w termostacie powietrznym w warunkach konwekcji swobodnej uwzględniano zmierność w czasie współczynnika α na powierzchniach kalorymetrów. Wskazania termoelementu różnicowego odczytywano na galwanometrze lusterkowym o czułości $33 \cdot 10^{-9}$ A/działkę, oporze wewnętrznym 27Ω i okresie wahań 2 s.

2.4. Określanie ciężaru objętościowego i wilgotności gruntu

Wyznaczanie zależności przewodności cieplnej gruntów od temperatury, ciężaru objętościowego i wilgotności wymagało dokładnego określenia tych wielkości dla każdej z badanych próbek.

Ciężar objętościowy ρ badanych materiałów wyznaczany był przez obliczanie objętości używanych w pomiarach zasobników, ramek lub kalorymetrów i ważenie ich przed i po pomiarze razem z badanym gruntem. Do ważenia małych próbek stosowano wagę analityczną WA-33 o dokładności 0,05 mg. Przy opracowywaniu wyników pomiarów posługiwano się ciężarem objętościowym gruntu wilgotnego ρ_w .

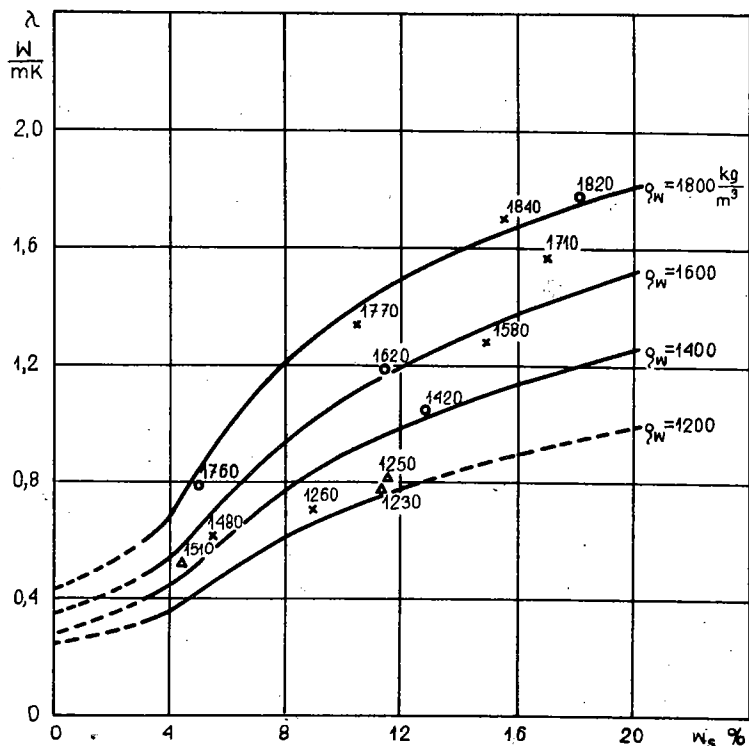
Wilgotność próbek gruntu określana była wstępnie przez zmieszanie pewnej (zważonej) ilości gruntu suchego z odpowiednią dla żądanej wilgotności ilością wody destylowanej. W czasie przygotowywania próbek i napełniania kalorymetrów lub zasobników wilgotność gruntu nieznacznie zmieniała się. Ostatecznie wilgotność badanej próbki określana była z ciężaru gruntu wilgotnego G_w (wyznaczonego przed i po pomiarze przewodności cieplnej) oraz z ciężaru G_s gruntu wysuszonego w suszarce w temperaturze 110°C w ciągu kilkunastu godzin aż do uzyskania stałego ciężaru. Wyznaczano wilgotność względną odniesioną do ciężaru gruntu suchego

$$w_s = \frac{G_w - T_s}{G_s} 100\% .$$

W badaniach przeprowadzanych w stanie ustalonym jako temperaturę pomiaru przyjmowano średnią arytmetyczną z temperatur gorącej i zimnej powierzchni próbki. W stanie uporządkowanym temperaturę pomiaru przyjmowano równą temperaturze ośrodka.

3. Wyniki pomiarów

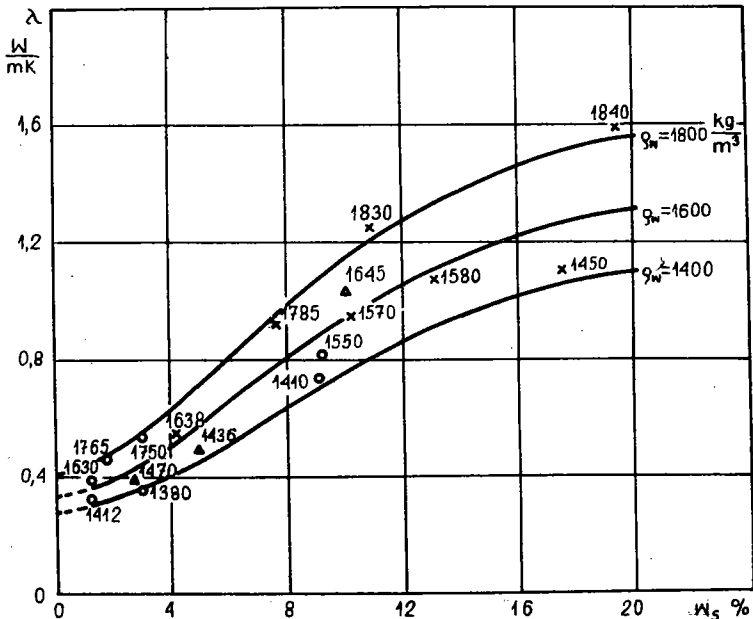
Wyniki przeprowadzonych pomiarów przewodności cieplnej gliny i lessu przedstawiono na wykresach. Na rys. 4 i 5 pokazano zależność przewodności cieplnej gliny i lessu od wilgotności w_s przy różnych ciężarach objętościowych ρ_w w temperaturach dodatnich; widoczny jest wyraźny wzrost przewodności cieplnej ze wzrostem wilgotności i ciężaru objętościowego. Podobny charakter mają krzywe $\lambda = f(w_s, \rho_w)$ otrzymane dla gli-



Rys.4. Zależność przewodności cieplnej λ gliny w temperaturach dodatnich (+20°C) od wilgotności w_s przy różnych ciężarach objętościowych ρ_w ; o - pomiary zminiaturyzowanym aparatem płytowym; x - pomiary aparatem Bocka, Δ - pomiary metodą stanu uporządkowanego; - - - - - wartości ekstrapolowane

ny i lessu w temperaturach ujemnych (rys.6 i 7); dla odpowiednich ciężarów objętościowych wartości przewodności cieplnej gruntów zamrożonych przy wilgotnościach wynoszących kilka % są mniejsze od wartości przewodności cieplnej gruntów w temperaturach dodatnich, natomiast przy dużych wilgotnościach znacznie je przewyższają. Na wykresach (rys.4,5,6,7) pokazano dla przykładu niektóre punkty pomiarowe, przy których podano wartości ciężaru objętościowego uzyskane z pomiarów; krzywe $\lambda = f(w_s, \rho_w)$ dla ciężarów objętościowych 1200, 1400, 1600, 1800 lub 2000 $\frac{kg}{m^3}$ otrzymano przez interpolację wyników wszystkich przeprowadzonych pomiarów. Na rys. 8 i 9 przedstawiono zależność przewodności cieplnej gliny i lessu od temperatury

dla różnych wilgotności i ciężarów objętościowych. Jak wynika z wykresów zmienność przewodności cieplnej z temperaturą dla



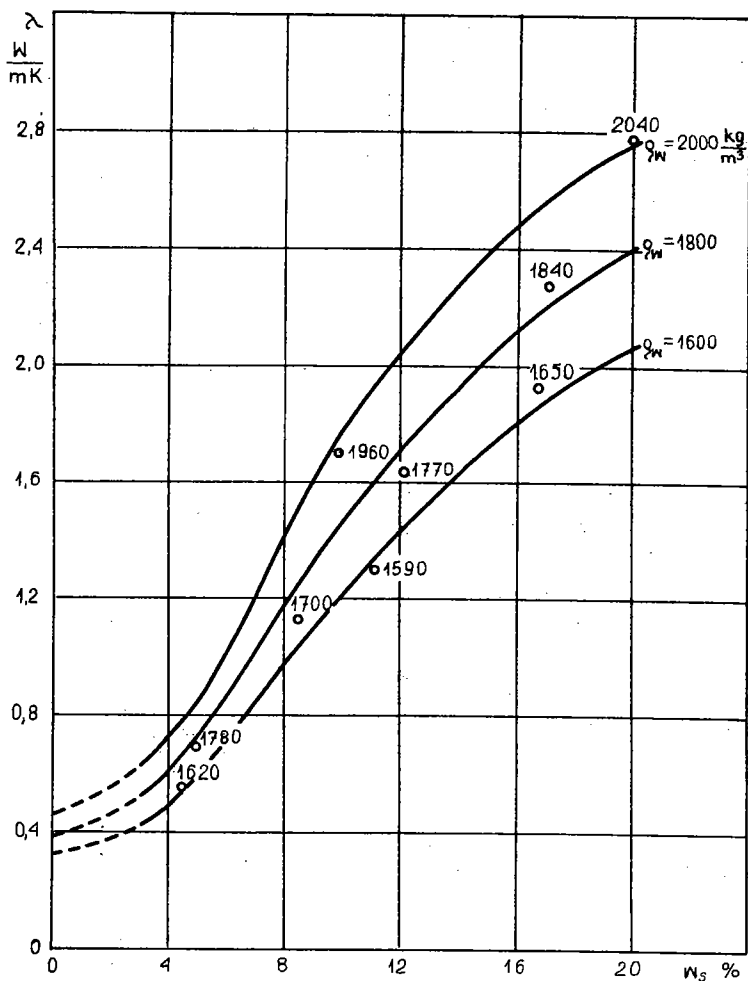
Rys.5. Zależność przewodności cieplnej λ leśsu w temperaturach dodatnich ($+20^{\circ}\text{C}$) od wilgotności w_S przy różnych ciężarach objętościowych ρ_w ; o - pomiary zminiaturyzowanym aparatem płytowym, x - pomiary aparatem Bocka, Δ - pomiary metodą stanu uporządkowanego; ----- wartości ekstrapolowane

obu materiałów w zakresie temperatur dodatnich i ujemnych jest nieznacząca.

Przy pomiarach w stanie ustalonym, ze względu na konieczność występowania różnicy temperatur kilku $^{\circ}\text{C}$ na powierzchniach próbki, możliwe było przeprowadzenie pomiarów najbliższej 0°C , przy średnich temperaturach pomiarów wynoszących $(+3) \div (+4)^{\circ}\text{C}$ i $(-3) \div (-4)^{\circ}\text{C}$. Na podstawie ekstrapolacji wyników pomiarów do temperatury 0°C (linia przerywana) dla wilgotności 10% i 20% można przypuszczać, że w punktach odpowiadających 0°C istnieje nieciągłość lub w pobliżu 0°C występuje bardzo silna zależność przewodności cieplnej od temperatury.

W przeprowadzonych badaniach przewodność cieplna gruntów wilgotnych w średniej temperaturze pomiaru 0°C wyznaczana by-

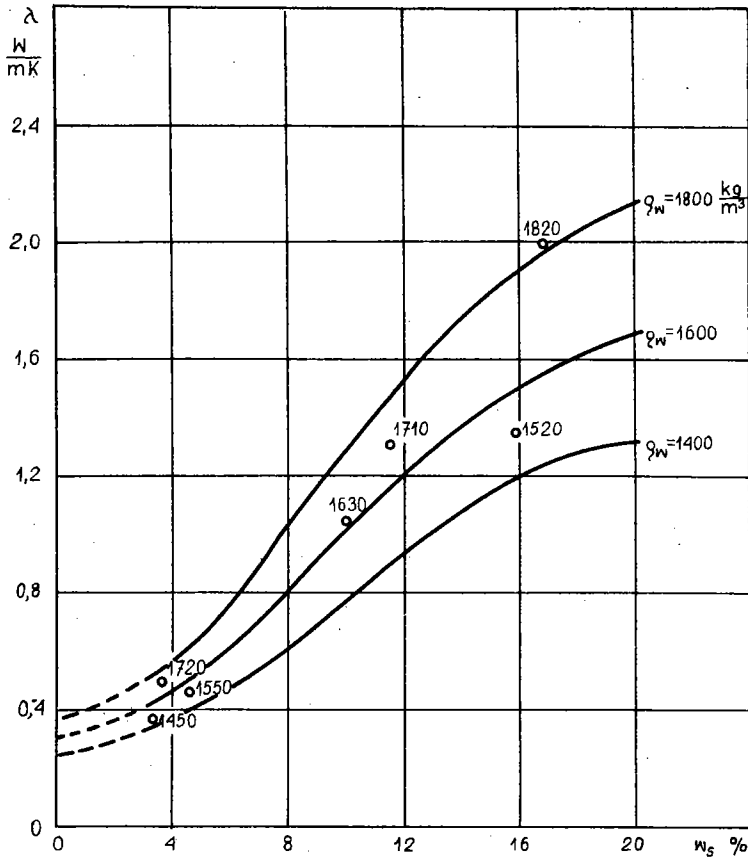
ła tylko wrywkowo; istnienie granicy zmiany fazy w próbce może powodować trudności ustalenia równowagi termodynamicznej a



Rys.6. Zależność przewodności cieplnej λ gliny w temperaturach ujemnych (-5°C), od wilgotności w_s przy różnych ciężarach objętościowych ρ_w ; ---- wartości ekstrapolowane

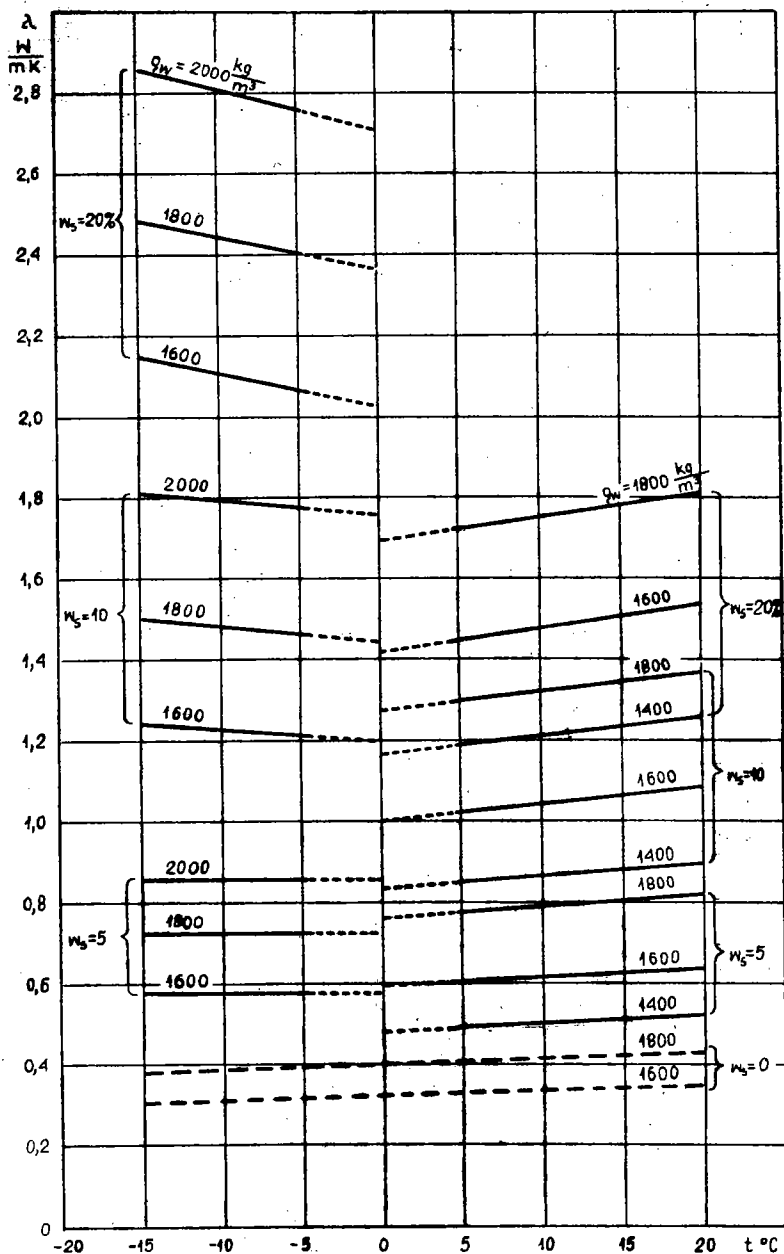
przy ewentualnie silniejszej zależności λ od temperatury w pobliżu 0°C i konieczności utrzymania różnicy temperatur kilku $^{\circ}\text{C}$ na powierzchniach próbki (np. $+2,5^{\circ}\text{C}$ i $-2,5^{\circ}\text{C}$) otrzymuje się niezbyt dokładny wynik uśredniony. Dla wilgotności około 5% różnice przewodności cieplnej w $+0^{\circ}\text{C}$ i -0°C są niewielkie a dla gruntu suchego $w_s = 0$ występować nie powinny.

Zależność przewodności cieplnej gliny i lessu od temperatury dla $w_s = 0$ została obliczona na podstawie danych literatu-

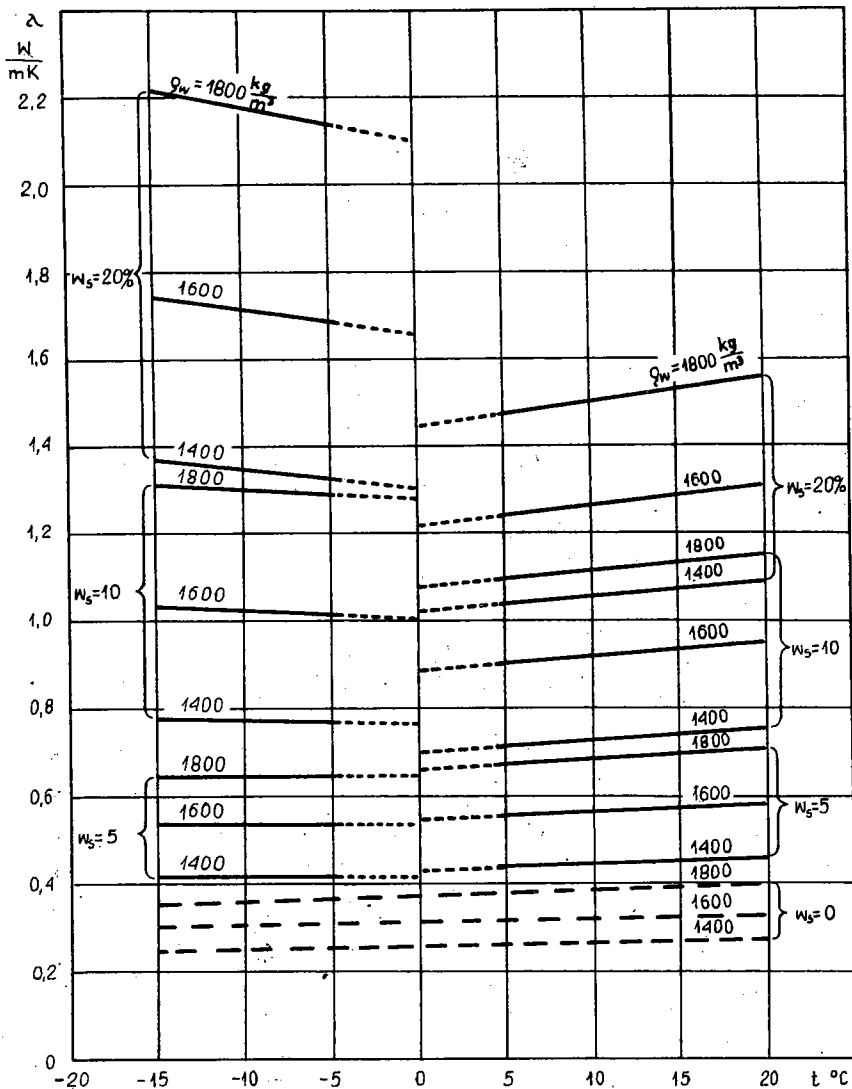


Rys. 7. Zależność przewodności cieplnej λ lessu w temperaturach ujemnych (-5°C) od wilgotności w_s przy różnych ciężarach objętościowych ρ_w ; ----- wartości ekstrapolowane

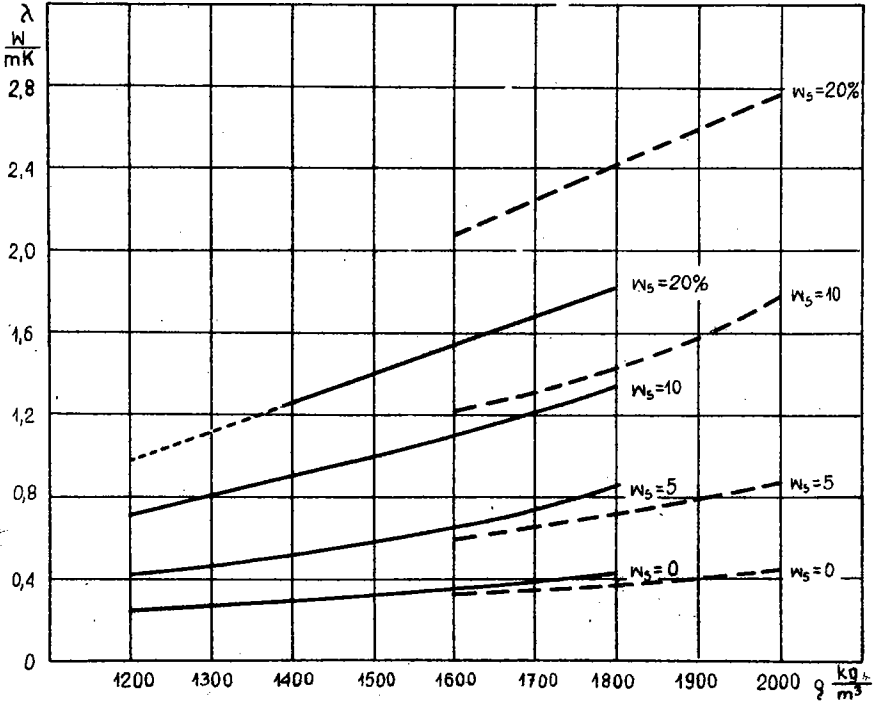
rowych [1,7,11]. Na rys.10 i 11 przedstawiono zależność przewodności cieplnej gliny i lessu od ciężaru objętościowego dla różnych wilgotności w zakresie temperatur dodatnich i ujemnych. Przeprowadzone badania przewodności cieplnej gliny i lessu wykazały większe wartości λ dla gliny w porównaniu z lessem w temperaturach dodatnich i ujemnych oraz silną zależność λ dla obu materiałów od wilgotności i ciężaru objętościowego; wyraźny jest również wzrost przewodności cieplnej grun-



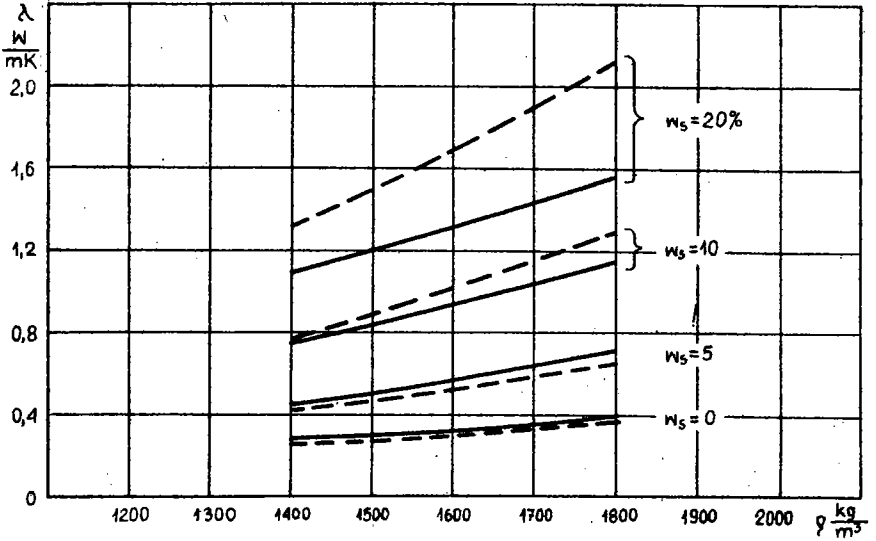
Rys.8. Zależność przewodności cieplnej λ gliny od temperatury przy różnych ciężarach objętościowych ρ_w i wilgotnościach w_s ;
 ----- wartości obliczone wg danych literaturowych [1, 7, 11];
 ---- wartości ekstrapolowane



Rys.9. Zależność przewodności cieplnej λ lessu od temperatury przy różnych ciężarach objętościowych ρ_w i wilgotnościach w_s ; --- wartości obliczone wg danych literaturowych [1, 7, 11]; --- wartości ekstrapolowane



Rys.10. Zależność przewodności cieplnej λ gliny od ciężaru objętościowego ρ_w dla temperatur dodatnich (linia ciągła) i ujemnych (linia przerywana) przy różnych wilgotnościach w_s



Rys.11. Zależność przewodności cieplnej λ lessu od ciężaru objętościowego ρ_w dla temperatur dodatnich (linia ciągła) i ujemnych (linia przerywana) przy różnych wilgotnościach w_s

tów zamrożonych w porównaniu z niezamrożonymi przy wilgotnościach większych od 5%.

Dokładność wyników pomiarów, mimo zastosowania trzech metod pomiarowych, nie mogła być duża ze względu na trudności w przygotowaniu próbki o żądanym ciężarze objętościowym. O ile temperatura średnia pomiaru mogła być z góry założona, a żądana wilgotność ustalona w granicach $2 \pm 3\%$, o tyle ciężar objętościowy próbki określany orientacyjnie w zależności od sposobu przygotowywania próbki badanego gruntu mógł być dokładnie wyznaczany dopiero po napełnieniu zasobnika lub kalorymetru, a w przypadku pomiarów w aparacie Bocka po zakończeniu pomiaru przewodności cieplnej (przygotowywanie próbki w aparacie). Wykreślenie zależności $\lambda = f(w_g)$ dla określonego ciężaru objętościowego wymagało zatem interpolacji wyników i dlatego są one obarczone znacznie większym błędem niż wyniki pojedynczego pomiaru. Przewodność cieplną gliny i lessu dla określonego ciężaru objętościowego (np. $\rho_w = 1600 \text{ kg/m}^3$) obliczono z błędem $\pm 10\%$, średnią wilgotność próbki z błędem $\pm 3\%$, ciężar objętościowy z błędem około $\pm 2\%$ i średnią temperaturę pomiaru z błędem $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

4. Uwagi końcowe

Przeprowadzone badania pozwoliły ustalić zależność $\lambda = f(t, \rho_w, w_g)$ dla obu badanych gruntów w temperaturach dodatnich i ujemnych. Proces dyfuzji wody występujący prawdopodobnie dość silnie w gruntach wilgotnych przy pomiarach w stanie ustalonym nie był przedmiotem rozważań. Wyrzykowo zbadano jedynie rozkład wilgotności powstający w próbkach w czasie pomiaru przewodności cieplnej w aparacie Bocka; w tym przypadku wilgotność gruntu pod płytą górną aparatu (o wyższej temperaturze) była mniejsza od wartości średniej w_g dla całej próbki. Największą wilgotność gruntu obserwowano w pobliżu dolnej (chłodniejszej) płyty aparatu. Do określenia wilgotności przy obu płytach po zakończeniu pomiaru przewodności cieplnej trwającego około 6 godz. pobierane były próbki gruntu z obszarów zakreskowanych na rys.3. Największe rozbieżności w

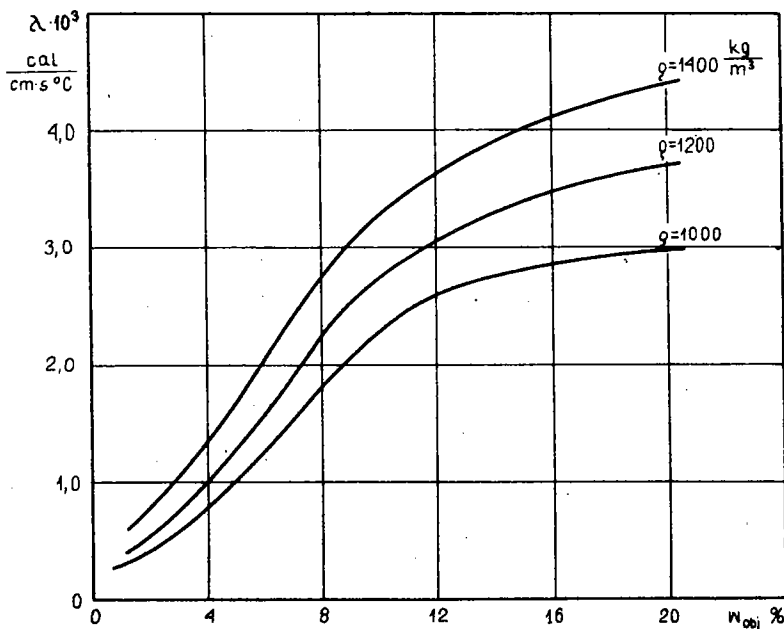
wilgotnościach wynosiły 18,6% (obszar przy płycie gorącej) i 21,0% (obszar przy płycie zimnej) przy wilgotności średniej całej próbki 19,5%; średnio różnice wilgotności dla badanych obszarów nie przekraczały 1%. Powyższe wyniki potwierdzałyby częściowo sugestię Cammerera o niepewności i niedokładności pomiarów przeprowadzanych w stanie ustalonym [1], jakkolwiek nie obserwowano istotnych różnic w wartościach przewodności cieplnej w porównaniu z pomiarami przeprowadzonymi w stanie nieustalonym. Wynikałby stąd wniosek, że przy zachowaniu odpowiednio małych gradientów temperatury w badanej próbce gruntu wilgotnego wpływ dyfuzji masy na wartość przewodności cieplnej nie odgrywa decydującej roli i nie jest większy od wpływu innych czynników powodujących powstawanie błędów pomiarów.

Porównanie otrzymanych wyników możliwe jest tylko z nielicznymi danymi literaturowymi [2,4]; w większości przypadków - jak wspomniano we wstępie - dane literaturowe dotyczące przewodności cieplnej gruntów są niekompletne.

Otrzymane z pomiarów wartości przewodności cieplnej oraz charakter krzywych $\lambda = f(w_s, \rho_w)$ dla gliny i lessu w temperaturach dodatnich są podobne do podawanych przez Czudnowskiego dla różnych rodzajów gruntów gliniastych i piaszczystych [2]. Na rys.12 przedstawiono dla przykładu wykres $\lambda = f(\rho_w, w_{obj})$ podany przez Czudnowskiego dla gruntów gliniasto - piaszczystych.

Wyniki przeprowadzonych badań zgadzają się dość dobrze z wynikami badań Kerstena dla 14 rodzajów gruntów [4]; przebieg zależności przewodności cieplnej od temperatury, wilgotności i ciężaru objętościowego jest bardzo zbliżony. Przewodność cieplna badanych gruntów wilgotnych w zakresie temperatur dodatnich wzrasta wraz z temperaturą o około 3% na 10°C, przy wzroście wg [4] około 5% od temperatury 40°F do 70°F; również zależność przewodności cieplnej badanych gruntów od wilgotności w zakresie temperatur dodatnich i ujemnych jest podobna do uzyskanej przez Kerstena [4]. Otrzymane wartości przewodności cieplnej gruntów zamrożonych i niezamrożonych o małej wilgotności są zbliżone; dla wilgotności do około 8% grunty zamrożone (rys.8 i 9) mają przewodność mniejszą od gruntów niezamrożonych (wniosek ten potwierdzają dane podawane przez

Kerstena [4], a także przez Czudnowskiego [2]); dla wilgotności dużych (np. $w_s = 20\%$) przewodność cieplna gruntu zamrożonego jest wyraźnie większa od przewodności cieplnej gruntu niezamrożonego. Przewodność cieplna gruntów wilgotnych w zakresie temperatur ujemnych dla małych wilgotności praktycznie nie zmienia się z temperaturą, natomiast w miarę wzrostu wilgotności zależność od temperatury jest silniejsza i dla wilgotności $w_s = 20\%$ wynosi około 3% na 10°C , co potwierdzałyby wyniki Kerstena. Przy stałym ciężarze objętościowym przewodność cieplna λ przy $w_s = 10\%$ jest średnio $2,5 \div 3$ razy większa w porównaniu z λ przy $w_s = 1\%$, a w badaniach Kerstena przeszło dwukrotnie większa przy odpowiednich wilgotnościach. Przy stałej wilgotności gruntu obserwowano wyraźny wpływ ciężaru objętościowego na wartość przewodności cieplnej, która zarów-



Rys.12. Przewodność cieplna gruntu gliniasto-piaszczystego (darniowo-bielicowego) według Czudnowskiego [2]

no dla gruntów zamrożonych jak i niezamrożonych wzrasta średnio o około 15% przy wzroście ρ_w o 100 kg/m^3 ; odpowiedni wzrost podawany przez Kerstena wynosi $2,5\%$ na $1 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$ [4].

Przeprowadzone badania pozwoliły sprawdzić przydatność zastosowanych trzech metod pomiarowych do wyznaczenia przewodności cieplnej gruntów wilgotnych, ustalić zależność $\lambda = f(w_s, \rho_w, t)$ dla gliny i lessu oraz zwrócić uwagę na szereg trudności eksperymentalnych, wynikających ze złożonej struktury badanych materiałów oraz skomplikowanych procesów fizycznych zachodzących w próbkach w czasie trwania pomiaru.

Niezbędne wydaje się kontynuowanie prac badawczych pozwalających ustalić w szerokim zakresie metodykę pomiarów właściwości cieplnych gruntów wilgotnych oraz określić wpływ temperatury, wilgotności i ciężaru objętościowego na przewodność i dyfuzyjność cieplną różnych rodzajów gruntów.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Cammerer J.S.: Der Wärme - und Kälteschutz in der Industrie. Springer - Verlag. Berlin 1962.
- [2] Czudnowski A.F.: Tiepłofiziczeskije charakteristiki dispersnych materialow. GIFML. Moskwa 1962.
- [3] Gogół W.: "Teoria stanu uporządkowanego i możliwości jej zastosowania". Mechanika Teoretyczna i Stosowana. z.1. Warszawa 1966.
- [4] Kersten M.S.: "Thermal Conductivity of Soil". Proceedings of the Second International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering. Vol.III. Rotterdam 1948.
- [5] Kersten M.S.: "Specific Heat Tests on Soils". Proceedings of the Second International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Vol.III. Rotterdam 1948.
- [6] Kersten M.S.: "Apparatus for Measuring Thermal Conductivity of Soil". Proceedings of the Second International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Vol.III. Rotterdam 1948.
- [7] Kondratjew G.M.: O wlijanii wlażnosti na tiepłoprowodnost niekoto-rych tiepłozolatorow i gruntow. Issledowanija w oblasti tiepłowych izmiernii. LITMO. Moskwa 1954.
- [8] Piętkowski R.: Metody obliczenia postępu przenikania termicznego w gruntach. TNEB. Warszawa 1961.
- [9] Piętkowski R., Czarnota-Bojarski R.: Mechanika Gruntów. Arkady. Warszawa 1964.
- [10] Rażnjevič: Tablice cieplne z wykresami. N T. Warszawa 1966.
- [11] Stefański A.: Przewodność cieplna materiałów budowlanych. PWN. 1965.
- [12] Trupak N.G.: Zamorożiwanije gornych porod pri prochodkie stwołow. UGLETECHIZDAT. Moskwa 1954.

ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВЛАЖНЫХ ПОЧВ

К р а т к о е с о д е р ж а н и е

В работе представлено результаты исследования теплопроводности определённого сорта глины и лёсса при температурах от -15°C до $+25^{\circ}\text{C}$, с влажностью до 20% и разных объёмных весах.

Теплопроводность в положительных температурах измерено в аппарате Бока, методом регулярного теплового режима и в миниатюрном плитовом аппарате, теплопроводность замороженных почв измерено в плитовом аппарате.

Полученные результаты дают возможность определить для исследованных почв зависимость теплопроводности от влажности, температуры и объёмного веса.

THERMAL CONDUCTIVITY INVESTIGATIONS OF MOIST SOILS

S u m m a r y

The results have been presented in this paper of thermal conductivity investigations of specific type of clay and loess within the range of temperatures from -15 to $+25^{\circ}\text{C}$ at moisture content values of up to 20% and at various weight by volume values.

The thermal conductivity at temperatures above 0°C has been determined in the Bock apparatus and with the application of the thermal regular regime method as well as in a miniaturized hot plate apparatus; the thermal conductivity in frozen soils has been determined in the miniaturized hot plate apparatus.

The results obtained have permitted a determination of thermal conductivity values as a function of moisture, temperature and weight by volume of specimens tested.