ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1988

Seria: GÓRNICTWO z. 172 Nr kol. 960

Zygmunt DRWIĘGA

Politechnika Śląska

ANALIZA PRZEWODNOŚCI CIEPLNEJ SKAŁ KARBONU LUBELSKIEGO ZAGŁĘBIA WĘGLOWEGO

Streszczenie. W artykule przedstawiono rolę przewodności cieplnej skał w kompleksie właściwości cieplnych. Syntetycznie omówiono różnorodne czynniki wpływające na wielkość współczynnika przewodzenia ciepła skał karbonu LZW. Zaakcentowano w nim wpływ takich czynników, jak: gęstość przestrzenna, porowatość, przepuszczalność, elektryczny opór właściwy, wilgoć naturalna, kierunek przepływu strumienia ciepła, mineralizacja wody wgłębnej, niektóre elementy budowy petrograficznej skał (procentowy udział kwarcu, spoiwa ilastego w piaskowcach, witrynitu w węglach kamiennych). Wpływ tych czynników uwzględniono w wyprowadzonych zależnościach korelacyjnych.

Badania własne przewodności cieplnej skał karbonu LZW odniesiono do osiągnięć światowych w tym zakresie. Przeprowadzona analiza wpływu tych czynników na wielkość przewodności cieplnej skał stworzyła podstawy w poprawnym i właściwym określeniu ziemskiego strumienia ciepła, który z kolei wykorzystano w rozwiązaniu różnorodnych problemów geologiczno-złożowych.

1. WSTĘP

Skały w zależności od pochodzenia, warunków zalegania w skorupie ziemskiej obdarzone są szerokim wachlarzem różnych właściwości fizycznych, wśród których ważną rolę przypisać należy właściwościom cieplnym. Proces przepływu ciepła, który jest zjawiskiem nieodwracalnym, określony jest kompleksem właściwości cieplnych, do których zalicza się:

- współczynnik przewodzenia ciepła λ,
- współczynnik wyrównywania temperatury a*,
- właściwą pojemność cieplną c.

Wśród tych właściwości pierwszoplanową rolę odgrywa przewodność cieplna.

2. ZAKRES I METODYKA ZASTOSOWANYCH BADAŃ LABORATORYJNYCH

Badania właściwości cieplnych skał Lubelskiego Zagłębia Węglowego przeprowadzono w latach siedemdziesiątych w zmodernizowanej aparaturze CHR-1

*W literaturze niekiedy określany jest jako współczynnik przewodności temperaturowej.

z miernikami pomiarowymi na termistorach, skonstruowanej w Zakładzie Geologii Złóż Instytutu Geologii Stosowanej Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Aparatura ta przystosowana jest do badań przewodności cieplnej skał i jednostkowego współczynnika zagęszczenia ciepła w strumieniu** w ustalonych warunkach cieplnych pod ciśnieniem i w stanie nawilgocenia próbki skalnej.

Wielkość współczynnika przewodzenia ciepła wyznaczono według wzoru:

$$\lambda = \frac{(\dot{Q}_p - \dot{Q}_a)\,\delta}{A\Delta\vartheta - \alpha\,\frac{Q_p - Q_a}{Q_a}}, \quad \frac{W}{mK} \tag{1}$$

gdzie:

$\dot{Q}_p$ - całkowita moc energii cieplnej przepływającej przez próbkę, W,

$\dot{Q}_a$ - moc energii cieplnej pobieranej przez komorę pomiarową, ilość ta jest równa 0,802 W,

δ - grubość próbki skalnej, m,

A - pole powierzchni próbki, m^2,

$\Delta\vartheta$ - różnica temperatur na przeciwległych powierzchniach izotemperowych, °C,

α - stała aparatu, która wynosi $9{,}18 \cdot 10^{-4}$.

Do badań laboratoryjnych pobrano ponad 400 próbek skalnych z rdzeni wiertniczych. Próbki pobrano z wszystkich dostępnych poziomów litostratygraficznych omawianego obszaru. W badaniach przewodności cieplnej różnych odmian litologicznych skał starano się uwzględnić takie czynniki, jak: gęstość przestrzenna, porowatość, temperatura pomiaru, ciśnienie geostatyczne, nasiąkliwość, mineralizacja wody wgłębnej, kierunek przepływu ciepła, niektóre elementy budowy petrograficznej skał, skład granulometryczny i inne.

3. PRZEWODNOŚĆ CIEPLNA SKAŁ

Skały przewodzą ciepło w zależności od ich cech naturalnych, a mianowicie: struktury, tekstury, składu mineralnego, stopnia upakowania ziarn (porowatości), stopnia wypełnienia por wodą, a także temperatury, ciśnienia i anizotropii cieplnej. Zmienność tych cech wywołuje różnice w przepływie energii cieplnej i opisana jest prawem Fouriera, dotyczącym przewodzenia ciepła przy różnicy temperatur (przy założeniu braku wewnętrznych źródeł):

$$\dot{Q} = \lambda\tau\,\frac{\Delta\vartheta}{\delta} \tag{2}$$

**Współczynnik ten określany jest w literaturze jako jednostkowa gęstość strumienia ciepła. Odnosi się do danej skały i charakteryzuje jej stan termodynamiczny przy określonych jej właściwościach fizykotermicznych [4].

gdzie:

$\dot{Q}$ - moc przepływającej energii cieplnej, W,

λ - współczynnik przewodzenia ciepła skały, $\frac{W}{mK}$,

τ - czas przepływu energii cieplnej, s,

$\Delta\vartheta$ - różnica temperatur na przeciwległych powierzchniach izotemperaturowych próbki skalnej, °C,

δ - grubość próbki skalnej, m.

Wartość współczynnika przewodzenia ciepła jest wielkością charakterystyczną dla danej skały, w danym jej stanie nasycenia wodą, w danym stanie termicznym. Współczynnik ten jest związany z właściwą pojemnością cieplną, współczynnikiem wyrównywania temperatury i gęstością przestrzenną następującą zależnością:

$$\lambda = ca\rho \tag{3}$$

Przenoszenie energii cieplnej w skałach zależy od stopnia ich zwięzłości i przebiega inaczej:

- w skałach zwięzłych o niskiej porowatości,
- w skałach porowatych i spękanych,
- w skałach luźnych.

W skałach zwięzłych przekazywanie ciepła odbywa się przez przewodzenie, w skałach porowatych, spękanych i o słabym stopniu upakowania ziaren ciepło przekazywane jest przez przewodzenie, unoszenie (konwekcję) i promieniowanie***.

W skałach luźnych energia cieplna jest przekazywana przez przewodzenie i przenoszenie, w mniejszym stopniu przez promieniowanie.

Z powyższego wynika, że tylko w skałach zwięzłych wymiana ciepła zachodzi na drodze przewodzenia ciepła. Dwie pozostałe kategorie skał charakteryzują się zbiorem różnych form i mechanizmów przenoszenia ciepła.

Generalnie biorąc, proces przepływu ciepła w skałach jest procesem złożonym, na który składają się:

- konduktywna przewodność cieplna λ_k,
- konwektywna przewodność cieplna λ_{kw},
- promieniowanie λ_e,

i opisany jest następującą zależnością:

$$\lambda = \lambda_k + \lambda_{kw} + \lambda_e \tag{4}$$

***Przenoszenia ciepła w wyniku procesu promieniowania skał jest w warunkach nas otaczających znikome, dominujące jest w wyższych temperaturach m.in. w czasie pożarów pokładów węgla w kopalniach wgłębnych, w obszarach objętych działalnością wulkaniczną itp.

3.1. Czynniki determinujące przewodność cieplną skał

Na podstawie badań własnych i osiągnięć światowych w tym zakresie przedstawiono skrótowo te czynniki, które w zasadniczy sposób determinują wielkość współczynnika przewodzenia skał. Ze względu na to ograniczono objętość opracowania, omówienie wpływu parametrów termodynamicznych (temperatury i ciśnienia) pominięto. Obszerniej to zagadnienie przedstawiono w oddzielnym opracowaniu [7].

W opracowaniu ograniczono się do przedstawienia wpływu niektórych właściwości fizycznych, filtracyjno-zbiornikowych oraz niektórych elementów budowy petrograficznej skał.

3.1.1. Porowatość, gęstość przestrzenna skał

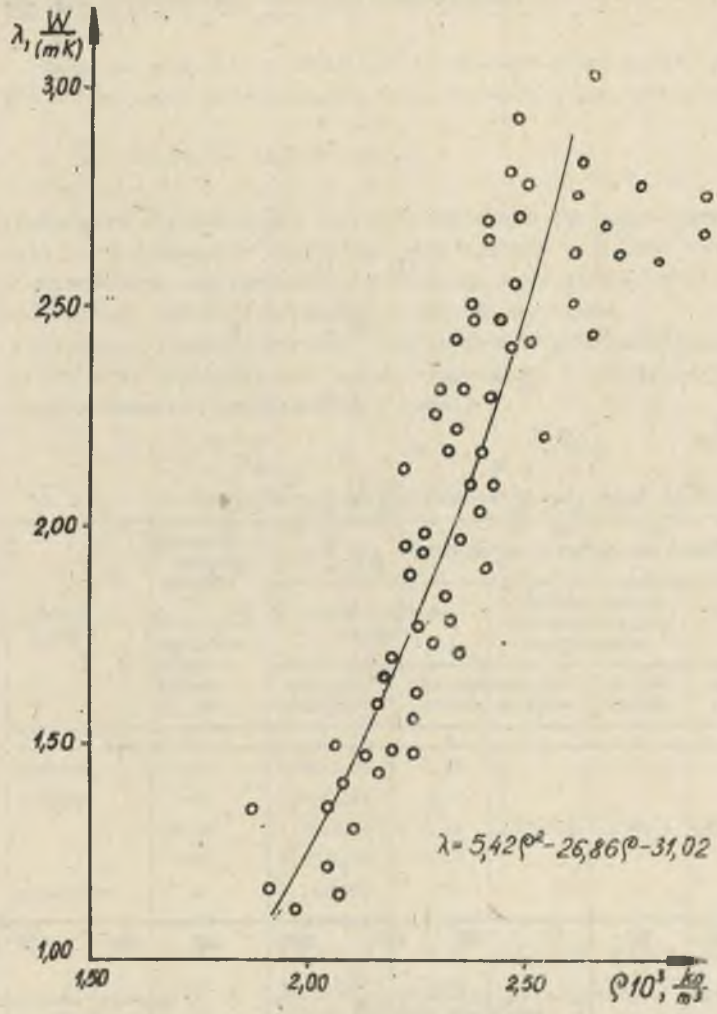
Przewodność cieplna skał nasyconych cieczami złożowymi zależy od przewodności cieplnej samego szkieletu skały i od cieczy wypełniającej tę skałę, a także od porowatości i gęstości przestrzennej. A więc przewodność cieplna skał jest funkcją wielu zmiennych zależnych od ilości i rozkładu por oraz przewodności cieplnej cieczy wypełniającej skałę. Jak dowiodły badania wykonane przez J. Ananda, W.H. Somertona (1973) i innych, współczynnik przewodzenia ciepła pozostaje w ścisłym związku z własnościami fizycznymi skał osadowych (gęstością przestrzenną, porowatością, przepuszczelnością). Wyżej wymienieni badacze w drodze wielozmiennej analizy regresyjnej uzyskali następujące równanie uwzględniające wpływ tych wielkości:

$$\lambda = 0{,}349\rho - 3{,}20\, k_p + 0{,}530\, k_{prz}^{0{,}10} + 0.130\, P_v - 0{,}0131 \qquad (5)$$

gdzie:

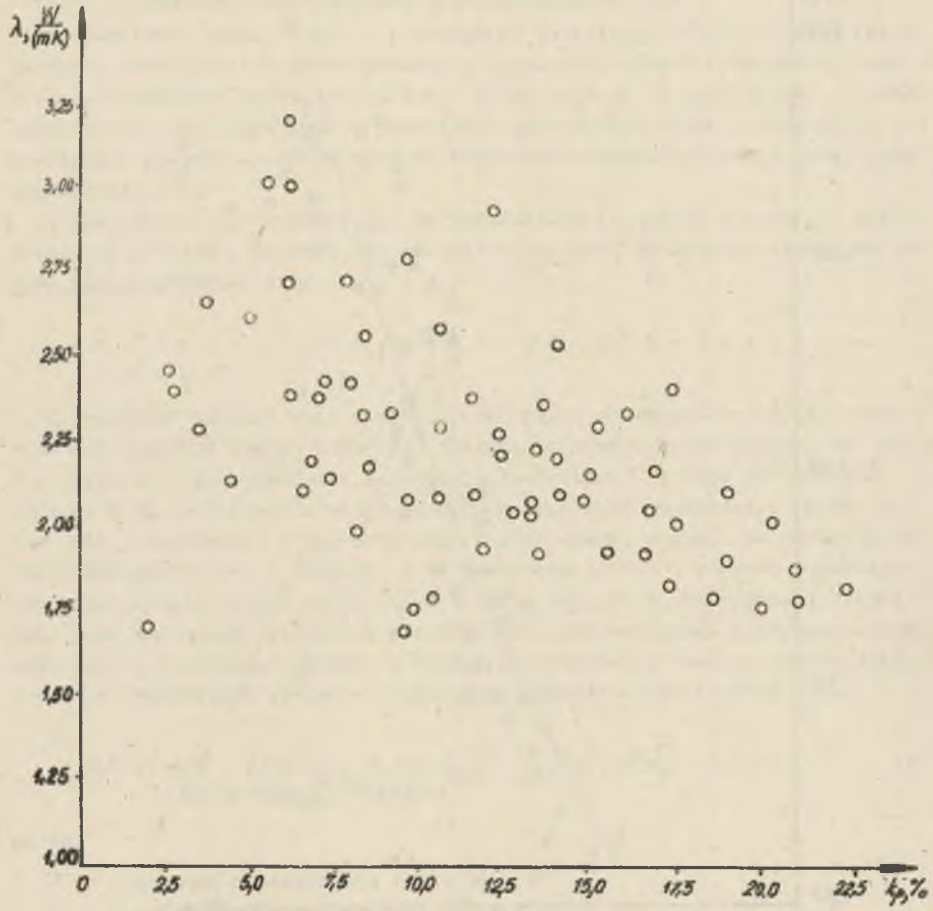
ρ - gęstość przestrzenna skał, $\frac{kg}{m^3} \cdot 10^3$,
k_p - współczynnik porowatości skał, %,
k_{prz} - współczynnik przepuszczalności skał, μm^2,
P_v - parametr porowatości.

Podobną zależność między porowatością, gęstością przestrzenną i współczynnikiem przewodzenia ciepła uzyskano dla skał LZW (rys. 1). Na rys. 2 przedstawiono zależność współczynnika przewodzenia ciepła od porowatości dla piaskowców karbonu. Z rysunku tego wynika, że ze wzrostem porowatości piaskowców karbonu przewodność cieplna maleje, przy czym odchylenie obserwowanych wartości od obliczonych z porowatości średnio waha się od 1,95-10,28%. Przyczyną rozrzutu są zmiany w składzie mineralnym, stopniu zawilgocenia, które znacznie wpływają na wielkość współczynnika przewodzenia ciepła. Zależność funkcyjna współczynnika przewodzenia ciepła od porowatości piaskowców karbonu (rys. 2) aproksymowano funkcją:



Rys. 1. Zależność współczynnika przewodzenia ciepła λ od gęstości przestrzennej (ciężaru objętościowego) piaskowców karbonu LZW

Fig. 1. Relation between coefficient of thermal conductivity λ and volume density (volume weight) for Carboniferous sandstones from the Lublin Coal Basin



Rys. 2. Zależność współczynnika przewodzenia ciepła λ od porowatości piaskowców karbonu LZW

Fig. 2. Relation between coefficient of thermal conductivity λ and porosity for Carboniferous sandstones from the Lublin Coal Basin

$$\lambda = 0{,}007\ k_p^2 + 0{,}02\ k_p + 2{,}70 \qquad (6)$$

Jak stwierdziło wielu badaczy, w tym G. Viloria, S.M. Ali Farouq (1968), W.M. Tichomirow (1968), W. Gordienko (1971) i inni, przewodność cieplna skał rośnie ze wzrostem gęstości przestrzennej, a więc z głębokością. Na podstawie analizy statystycznej W.M. Tichomirow (1968) wykazał, że przewodność cieplna skał osadowych zależy liniowo od gęstości przestrzennej.

Uzyskana dla skał karbonu LZW zależność współczynnika przewodzenia ciepła od gęstości przestrzennej (rys. 1) wyraża się równaniem:

$$\lambda = 5{,}42\rho^2 + 26{,}86\rho - 31{,}02 \qquad (7)$$

Odchylenie obserwowanych wartości współczynnika przewodzenia ciepła od krzywych aproksymowanych wynosi dla skał karbonu - 12,78%. Tak znaczne różnice w wartościach obserwowanych od średnich są w głównej mierze wpływem wilgoci naturalnej, składu mineralnego i innych czynników.

Skrajne i średnie wartości współczynnika przewodzenia ciepła skał karbonu LZW przy uwzględnieniu wpływu temperatury i ciśnienia w trzech różnych stanach badania przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Współczynnik przewodzenia ciepła skał karbonu

Rodzaj skały	Temperatura ϑ pomiaru °C / Ciśnienie geostatyczne p, MPa	Współczynnik przewodzenia ciepła λ, $\frac{W}{mK}$					
		w stanie higroskopijnym		w stanie geostatycznego ciśnienia pionowego		w stanie wilgoci naturalnej	
		wartości skrajne	wartość średnia	wartości skrajne	wartość średnia	wartości skrajhe	wartość średnia
1	2	3	4	5	6	7	8
Mułowce,	20	0,95-3,05	1,84				
Iłowce	40	1,60-2,65	2,04				
	60/30	1,46-2,86	2,24	2,01-3,20	2,64	2,30-3,80	2,98
	80	1,37-2,70	2,16				
Piaskowce	20	1,21-2,90	2,09				
	40	1,34-2,89	2,31				
	60/30	1,47-3,20	2,54	1,92-3,42	2,90	2,46-3,92	3,09
	80	1,35-3,09	2,36				
Wapienie	20	1,70-2,84	1,97				
	40	2,02-3,42	2,38	2,67-3,51	3,01	2,98-4,02	3,24
	60/30	2,43-3,99	2,83				
	80	2,38-3,78	2,75				
Węgle	20	0,50	0,50				
Kamienne	40	0,54	0,54	0,57	0,57	0,62	0,62
	60						
	80						
Diabazy	20	1,07	1,07				
	40	-	-	1,19	1,19	1,27	1,27
	60						
	80						

3.1.2. Przepuszczalność i opór właściwy

Wpływ właściwości filtracyjno-zbiornikowych i elektrycznych na wielkość współczynnika przewodzenia ciepła skał karbonu LZW badano dla wybranych piaskowców, wykorzystując w tym zakresie wyniki badań laboratoryjnych rdzeni oraz wyniki sondowania oporności. Posłużono się w tym względzie wielozmienną analizą regresji związku współczynnika przewodzenia ciepła od wyżej wspomnianych i innych wielkości fizycznych. Wśród rozważanych czterech zależności funkcyjnych współczynnika przewodzenia ciepła od wspomnianych wielkości najbardziej przydatne okazały się zależności:

$$\lambda = f(\ln k_{prz}) \quad \text{i} \quad \lambda = f(1/R). \tag{8}$$

Wyniki tej analizy przedstawiono w tabeli 2.

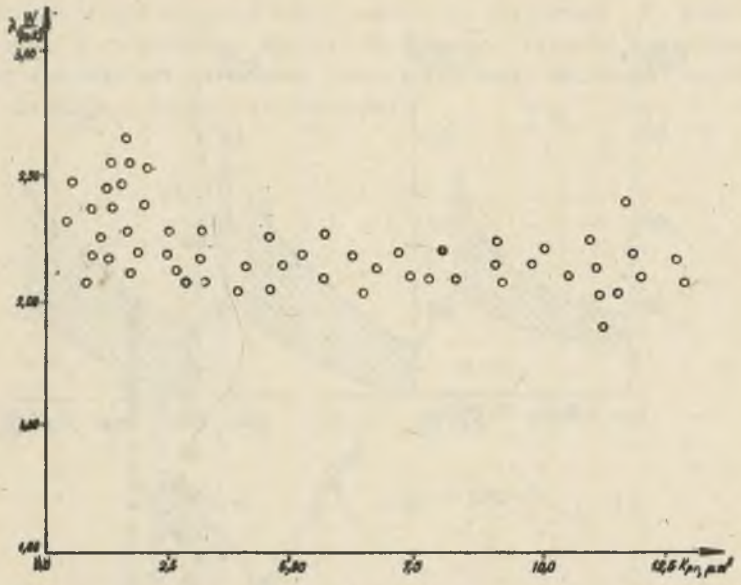
Tabela 2

Charakter zależności	Ilość badanych próbek piaskowcowych	Współczynnik korelacji r	Średnie odchylenie standarcowe	Równanie regresji
$\lambda = f/1/R, \ln k_p, \rho^2, \ln k_{prz}$	70	0,802	0,512	$\lambda = 2{,}105 - 1{,}89\ 1/R + 0{,}303 \ln k_p + 0{,}06 \ln k_{prz}$

Zależności współczynnika przewodzenia ciepła od współczynnika przepuszczalności i elektrycznego oporu właściwego piaskowców karbonu przedstawiono na rys. 3 i 4.

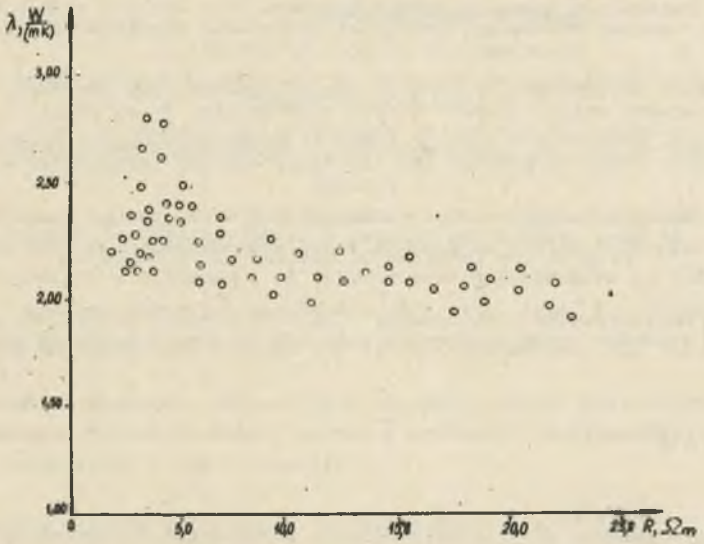
3.1.3. Wilgoć naturalna

Zależność współczynnika przewodzenia ciepła od wilgoci skał jest nieliniowa, przy czym zmienia się ona w zależności od temperatury badania. W temperaturach bliskich 0°C wzrost wilgoci w skałach wywołuje w przybliżeniu liniowe zwiększenie przewodności cieplnej pod wpływem oddziaływania zwiększonej powierzchni por skały i procesu dyfuzji powietrza wilgotnego. Dalszy wzrost wilgoci powoduje wypieranie z części por powietrza wilgotnego poprzez wodę złożową. Proces ten wywołuje nieznaczny przyrost współczynnika przewodzenia ciepła. Maksymalny wpływ wilgoci na wielkość współczynnika przewodzenia ciepła zaznacza się w wyższych temperaturach. Wzmożona dyfuzja powietrza wilgotnego i przewodność cieplna wody wgłębnej powodują maksymalny jej wzrost. Współczynnik przewodzenia ciepła zmierza asymptotycznie do wartości maksymalnej, w związku ze stopniowym nasyceniem por wodą (rys. 5).



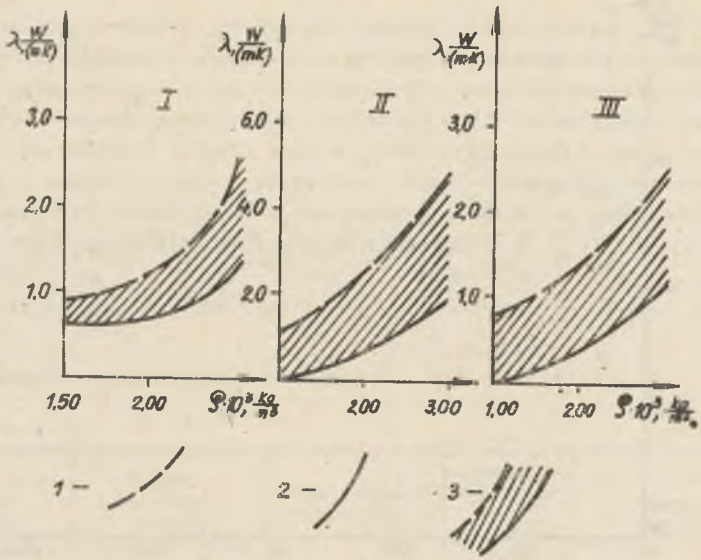
Rys. 3. Zależność współczynnika przewodzenia ciepła λ od współczynnika przepuszczalności piaskowców karbonu LZW

Fig. 3. Relation between coefficient of thermal conductivity λ and coefficient of permeability for Carboniferous sandstones from the Lublin Coal Basin



Rys. 4. Zależność współczynnika przewodzenia ciepła od elektrycznego oporu właściwego R piaskowców karbonu LZW

Fig. 4. Relation between coefficient of thermal conductivity and electric resistivity R for Carboniferous sandstones from the Lublin Coal Basin



Rys. 5. Zakres zmian współczynnika przewodzenia ciepła λ od wilgoci naturalnej W i gęstości przestrzennej ρ skał wg [5]

I - skały węglanowe, II - skały klastyczne o strukturze psamitowej (piaskowce), III - skały klastyczne o strukturze pelitowej i aleurytowej (iłowce, mułowce)

1 - skały całkowicie nasycone medium złożowym, 2 - skały w stanie higroskopijnym, 3 - obszar stanowiący przedział zmienności współczynnika przewodzenia ciepła od wilgoci naturalnej

Fig. 5. Range of variability of the thermal conductivity coefficient λ with natural water content W and bulk density ρ of rocks

I - carbonate rocks, II - clastic rocks of psammitic texture (sandstones), III - clastic rocks of pelitic and aleuritic texture (claystones and siltstones)

1 - rocks fully saturated with a reservoir fluid, 2 - rocks in a hygroscopic state, 3 - an area determining the range of variability of thermal conductivity in the function of natural water content

Zależność współczynnika przewodzenia ciepła od wilgoci naturalnej podana została przez G.A. Czeremieńskiego (1977) dwoma niezależnymi od siebie równaniami:

$$\lambda = A\sqrt{W} \tag{9}$$

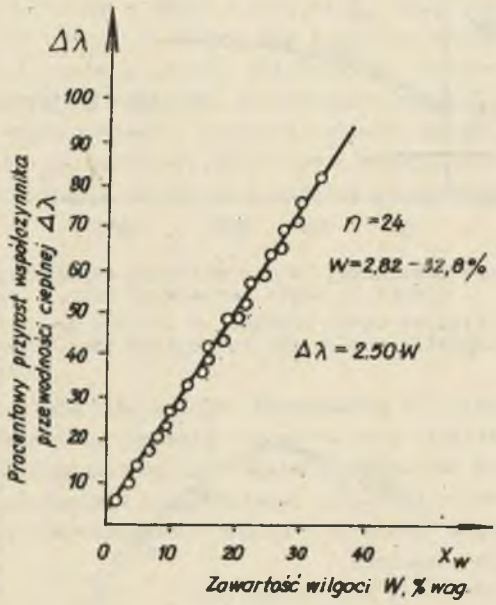
gdzie:

A - stała zależna od gęstości, wilgoci i własności strukturalnych skały,

$\lambda = A \cdot \log W + B$,

A i B - współczynniki.

Zgodnie z przedstawionymi wyżej równaniami (zależność $\lambda = f(W)$ jest nieliniowa). Z rysunku tego wynika, że większymi zmianami przewodności cieplnej w zależności od wilgoci cechują się skały węglanowe, najniższą skały klastyczne o strukturze pelitowej.



Rys. 6. Wpływ wilgoci naturalnej W na wielkość współczynnika przewodzenia ciepła λ skał LZW

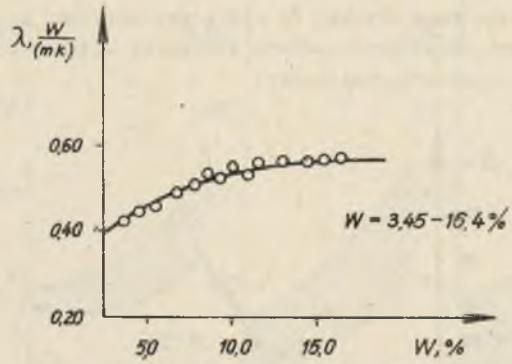
Fig. 6. Effect of natural water content W on the magnitude of thermal conductivity coefficient λ for the Lublin Coal Basin rocks

Przebadany współczynnik przewodzenia ciepła różnorodnych odmian litologicznych skał reprezentowanych przez zasadnicze piętra stratygraficzne omawianego obszaru w zależności od wilgoci skał w przedziale od 2,82-32,82% wykazał liniowy charakter zależności $\lambda = f(W)$ (rys. 6). Wyjątek tu stanowią węgle kamienne z obszaru LZW, dla których uzyskano zależność nieliniową (rys. 7).

Reasumując powyższe, wpływ wilgoci na współczynnik przewodzenia ciepła jest znaczny. Wynika to między innymi z mechanizmu przyjmowania wody przez skały, rodzaju por i innych zjawisk.

3.1.4. Anizotropia cieplna

Badania przewodności cieplnej skał osadowych wykazały, że przewodność cieplna zmienia się w zależności od kierunku badania - równolegle lub prostopadle do uwarstwienia. Pomiary przeprowadzone równolegle i prostopadle do



Rys. 7. Wpływ wilgoci naturalnej W na wielkość współczynnika przewodzenia ciepła λ węgli kamiennych LZW

Fig. 7. Effect of natural water content W on the magnitude of thermal conductivity coefficient λ for the Lublin Coal Basin hard coals

uwarstwienia wskazują, że przewodność cieplna jest większa w kierunku równoległym do uwarstwienia skał aniżeli w kierunku prostopadłym. Średnie wartości współczynnika przewodzenia ciepła dla poszczególnych rodzajów skał karbonu w temperaturze 60°C przy uwzględnieniu kierunku przepływu strumienia ciepła bez wpływu ciśnienia i wilgoci przedstawiono za pomocą współczynnika anizotropii cieplnej.

Wyniki te przedstawiają się następująco:

skały karbonu:

mułowce $\lambda_{śr} = 1,52 \div 1,72 \frac{W}{mK}$,

A = 1,06

iłowce $\lambda_{śr} = 1,64 \div 1,93 \frac{W}{mK}$,

A = 1,09

piaskowce $\lambda_{śr} = 1,82 \div 2,14 \frac{W}{mK}$,

A = 1,08

wapienie $\lambda_{śr} = 2,52 \div 2,68 \frac{W}{mK}$

A = 1,03

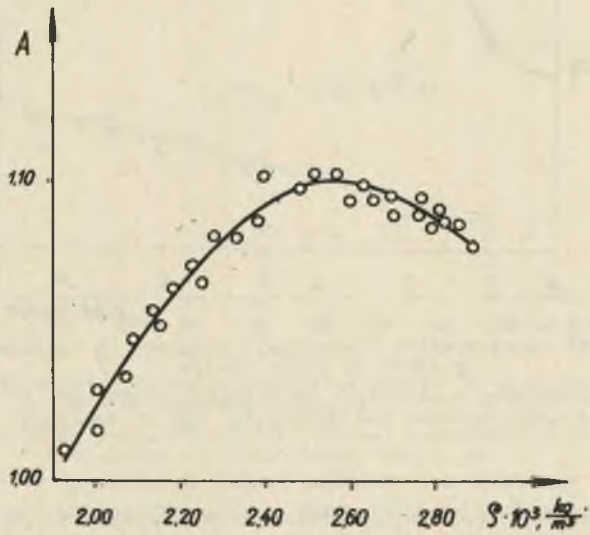
węgle kamienne $\lambda_{śr} = 0,50 \div 0,70 \frac{W}{mK}$,

A = 1,18

gdzie:

$A = \sqrt{\frac{\lambda_{\parallel}}{\lambda_{\perp}}}$ - współczynnik anizotropii cieplnej.

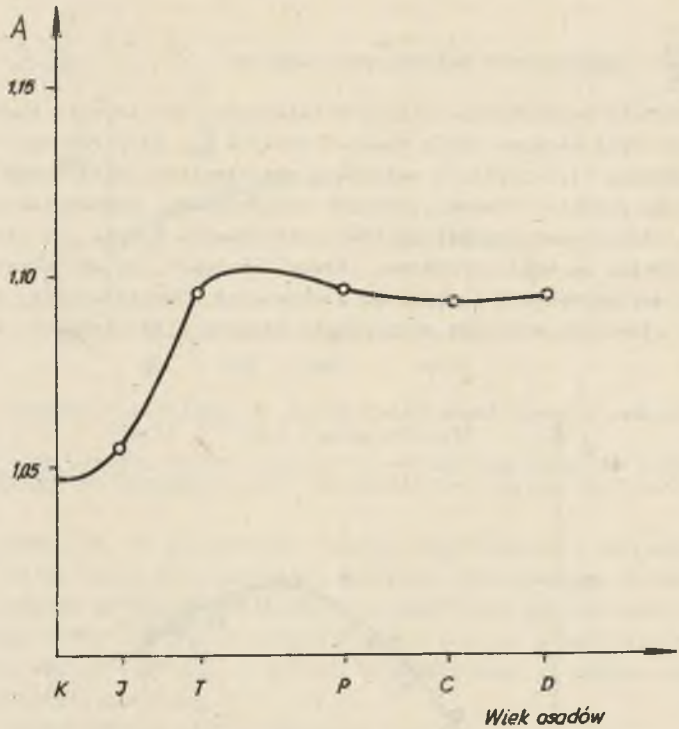
Współczynnik przewodzenia ciepła w zależności od kierunku badania zmienia się dla skał karbonu LZW o około 0,50-2,68 $\frac{W}{mK}$; przy różnicy 0,16-0,32 $\frac{W}{mK}$ otrzymujemy 11,9-32,0%. W związku z tym kompleksy skalne LZW przy modelu przegrody płaskiej stanowią ośrodek anizotropowy. Przewarstwione są one skałami o zróżnicowanym współczynniku przewodzenia ciepła, od niskoprzewodzących, jakimi są węgle kamienne, iłowce i mułowce, do wysokoprzewodzących skał węglanowych. Z powyższego zestawienia również wynika, że skały węglanowe ujawniają mniejszą anizotropię cieplną niż piaskowce, mułowce i iłowce.



Rys. 8. Zależność współczynnika anizotropii cieplnej A piaskowców jury, triasu, karbonu i dewonu Lubelszczyzny od ich gęstości przestrzennej

Fig. 8. Relation between coefficient of thermal anisotropy A and bulk density for the Jurassic, Triassic, Carboniferous and Devonian sandstones from the Lublin region

Na podstawie wykonanych badań E. Hurtig (1967) stwierdził, że wielkość współczynnika anizotropii cieplnej zależy od kształtu i budowy ziaren mineralnych, a także rodzaju medium wypełniającego przestrzeń porową skał. Dla piaskowców jury, triasu, karbonu i dewonu obszaru lubelskiego zależność tego współczynnika od ich gęstości przestrzennej ma charakter krzywoliniowy. Jak wynika z rys. 8, najwyższą wartość tego współczynnika zaobserwowano przy gęstości przestrzenjej 2,50 . $10^3 \frac{kg}{m^3}$; z dalszym wzrostem gęstości cha-



Rys. 9. Zależność współczynnika anizotropii cieplnej A piaskowców, zlepieńców od wieku osadów

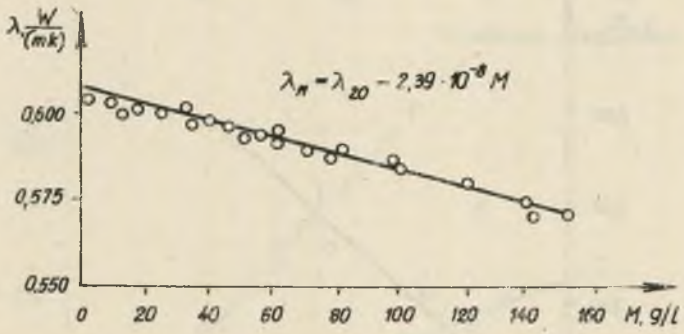
Fig. 9. Relation between coefficient of thermal anisotropy A of sandstones and conglomerates and geological age of sediments

rakter jej jest wyrównany z nieznaczną tendencją malejącą. Z zależności tej wynika również pośrednia współzależność tego współczynnika z wiekiem geologicznym osadów, gdyż gęstość przestrzenna piaskowców wzrasta z głębokością, a więc wiekiem geologicznym osadów, w wyniku zachodzących z różną intensywnością procesów diagenezy i katagenezy.

W celu pełnego scharakteryzowania powyższego zjawiska dokonano określeń wartości tego współczynnika dla utworów piaszczysto-zlepieńcowatych kredy dolnej (albu), permu, piaskowców jury środkowej, triasu, karbonu i dewonu z obszaru LZW i rowu lubelskiego. Określenia wartości współczynnika anizotropii cieplnej zestawiono z wiekiem geologicznym tychże osadów (rys. 9). Uzyskana zależność przebiegiem swoim przypomina zależność poprzednią. Maksymalne wartości współczynnika anizotropii cieplnej stwierdzono w piaskowcach triasu i permu, przy czym w piaskowcowych utworach karbonu i dewonu zachowują one charakter nieco wyrównany.

3.1.5. Mineralizacja wód wgłębnych

Wody wgłębne przemieszczając się w różnych kierunkach rozprzestrzeniają i przenoszą znaczne ilości energii cieplnej w kompleksach skalnych. Określenie ilości przenoszonej energii cieplnej przez wody wgłębne możliwe było tylko przez uwzględnienie ich właściwości cieplnych. Obecność soli w wodach wgłębnych Lubelszczyzny, obniża współczynnik przewodzenia ciepła. Tylko nieliczne sole zawarte w wodach wgłębnych, takie jak Na_2SO_4, Na_2CO_3, Na_2PO_4, Na_2SiO_3, podwyższają współczynnik przewodzenia ciepła (Z.W. Sterlenko, 1975). Najwyższymi wartościami współczynnika przewodzenia ciepła charakteryzują się wody słabo zmineralizowane (0,606-0,610 $\frac{W}{mK}$). Przy wzroście mineralizacji wód wgłębnych do 150 g/l współczynnik przewodzenia ciepła maleje do wartości 0,576 $\frac{W}{mK}$ (rys. 10).



Rys. 10. Zależność współczynnika przewodzenia ciepła λ od mineralizacji wód wgłębnych M

Fig. 10. Relation between coefficient of thermal conductivity λ and mineralization of underground waters M

Zależność funkcyjna między współczynnikiem przewodzenia ciepła przy temperaturze 25°C od ich mineralizacji ma postać:

$$\lambda_M = \lambda_{25} - 2,39 \cdot 10^{-4} M \qquad (10)$$

gdzie:

λ_M - współczynnik przewodzenia ciepła zmineralizowanej wody wgłębnej, $\frac{W}{mK}$,

λ_{25} - współczynnik przewodzenia ciepła wody destylowanej przy temperaturze 25°C, $\frac{W}{mK}$,

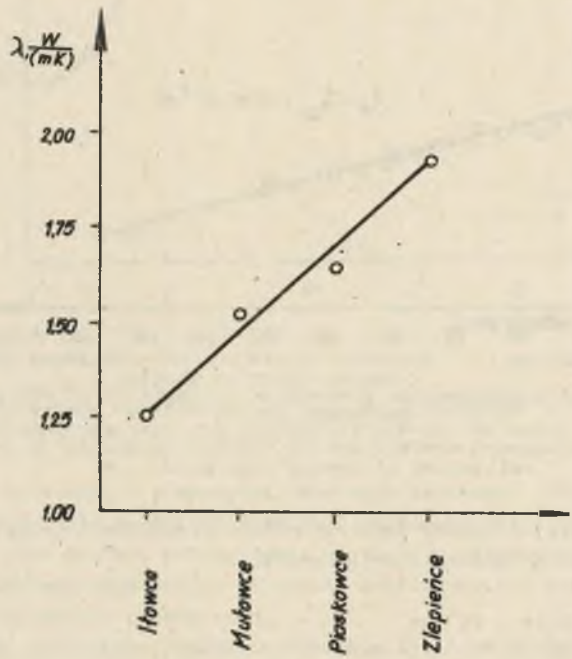
M - mineralizacja wody wgłębnej, g/l.

Na rys. 10 przedstawiono zależność współczynnika przewodzenia ciepła wód wgłębnych Lubelszczyzny od ich stopnia zmineralizowania. Z rysunku tego wynika, że współczynnik przewodzenia ciepła maleje liniowo w zależności od

mineralizacji wód wgłębnych. Wyprowadzony współczynnik korelacji (r_λ, r_M) wynosi - 0,93. Tak więc przy wzroście mineralizacji wód wgłębnych od 0 do 150 g/l ich współczynnik przewodzenia ciepła jest obniżony we wspomnianym przedziale o 6%.

3.1.6. Skład granulometryczny

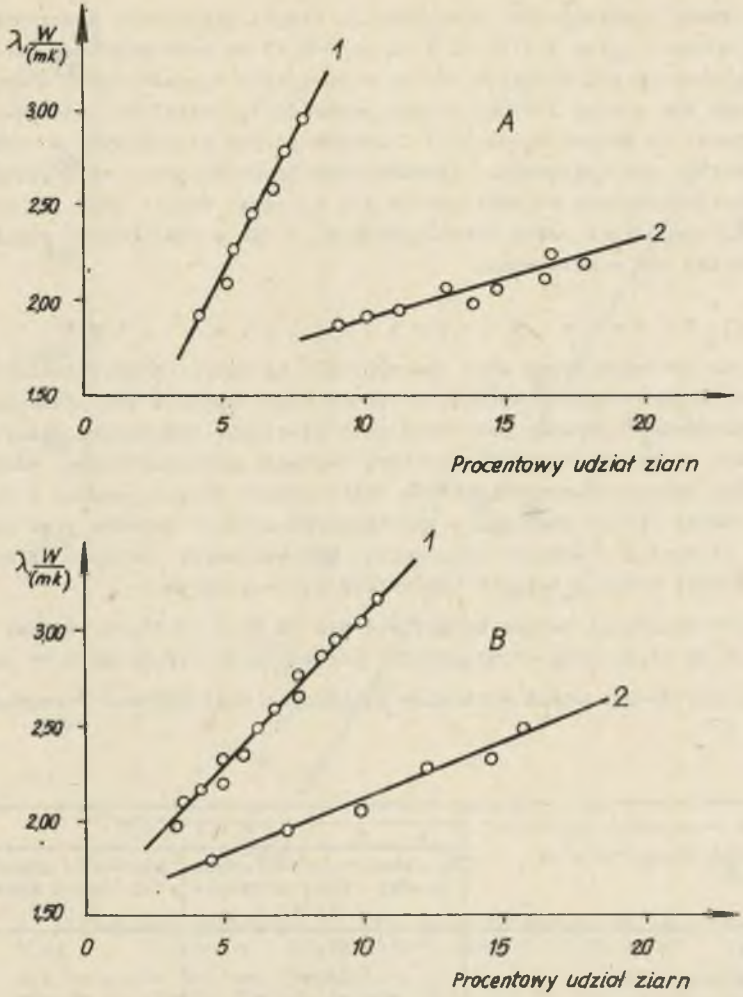
Oprócz wspomnianych już czynników, niemały wpływ na własności cieplne skał wywiera ich uziarnienie, wykształcenie oraz przestrzenne rozmieszczenie ziaren. W szeregu skał, reprezentowanych przez zlepieńce - piaskowce - mułowce - iłowce stwierdzono wyraźną zależność współczynnika przewodzenia ciepła od ich składu granulometrycznego. Na rys. 11 we wspomnianym szeregu



ys. 11. Uogólniona zależność współczynnika przewodzenia ciepła skał osadowych od ich składu granulometrycznego wg [8]

ig. 11. Generalized dependence of thermal conductivity coefficient λ of sedimentary rocks on their granulometric composition

kał osadowych zaobserwowano regularny spadek współczynnika przewodzenia iepła ze zmniejszeniem się w nich wymiaru ziaren mineralnych. Powyższa rawidłowość wywołana jest przez zmniejszone przenoszenie ciepła w przetrzeni międzyziarnowej kosztem osłabienia konwektywnego przenoszenia ciepła przez wody wgłębne oraz wzrostem oporności cieplnej w mikroporowatych trukturach skał drobnoziarnistych.



Rys. 12. Zależność współczynnika przewodzenia ciepła λ piaskowców, mułowców LZW od ich składu granulometrycznego wg [7]

1 - piaskowce, 2 - mułowce, A - średnica ziaren od 0,01-0,05 mm, B - średnica ziaren od 0,05-0,10 mm

Fig. 12. Relation between coefficient of thermal conductivity λ and granulometric composition for sandstones and siltstones from the Lublin Coal Basin

1 - sandstones, 2 - siltstones, A - 0,01-0,05 mm grain size, B - 0,05-0,10 mm grain size

Zależność współczynnika przewodzenia ciepła piaskowców i mułowców karbonu o średnicy ziaren 0,01-0,05 i od 0,05-0,10 mm przedstawiono na rys. 12. Ze zwiększeniem się drobnych ziaren mineralnych w piaskowcach i mułowcach obserwuje się w nich liniowy wzrost przewodności cieplnej. Zjawisko to tłumaczy fakt, że wzrost zawartości drobnych ziaren mineralnych w skale sprzyja zwięzłemu ich upakowaniu, prowadzącemu do zwiększenia sumarycznej powierzchni cząsteczek kontaktujących się ze sobą. Wzrost ten, jak wynika z rys. 12, zachodzi z różną intensywnością, i tak w piaskowcach przebiega on gwałtowniej niż w mułowcach.

3.1.7. Budowa petrograficzna skał

Budowa petrograficzna skał klastycznych ma swoje odzwierciedlenie w charakterze przewodności cieplnej. Wielkość współczynnika jest funkcją składową przewodności cieplnej poszczególnych minerałów budujących skały. W rozważaniach uwzględniono tylko niektóre czynniki petrograficzne. Wśród wielu czynników petrograficznych wybrano tylko udział kwarcu, spoiwa i wyodrębniony rodzaj spoiwa ilastego w klastycznych osadach karbonu oraz procentowy udział witrynitu w węglach kamiennych. Dla wybranych poziomów karbonu ilościowy średni skład mineralny kształtuje się następująco:

- procentowy udział kwarcu kształtuje się od 22,3 do 87,3%, udział spoiwa od 7,6 do 41,2% przy współczynniku przewodzenia ciepła od 0,95 do 3,05 $\frac{W}{mK}$.

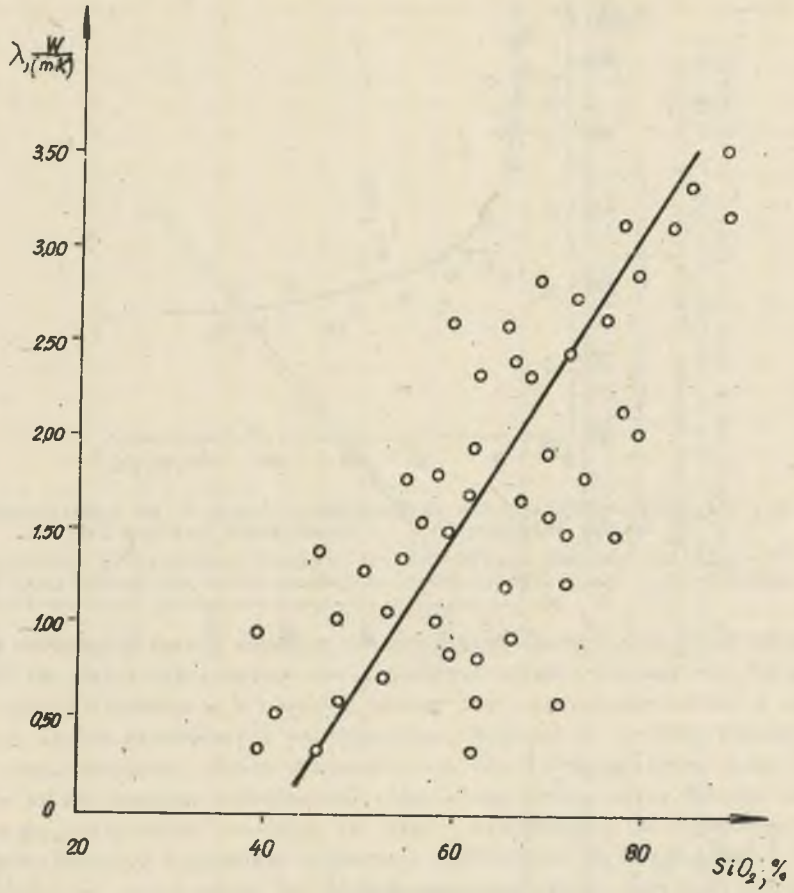
Ilościowy średni skład mineralny niektórych skał karbonu przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3

Składniki mineralne	Karbon	
	piaskowce, zlepieńce, średni skład mineralny, %	mułowce, iłowce, średni skład mineralny, %
Kwarc	66,7	51,7
Skalenie	6,4	4,1
Łyszczyki	2,9	2,7
Inne składniki	2,1	4,9
Spoiwo	21,6	36,7

Współzależność między procentowym udziałem kwarcu SiO_2 i współczynnikiem przewodzenia ciepła przedstawiają następujące funkcje dla klastycznych skał karbonu:

$$\lambda = -61,5 \frac{1}{SiO_2}, \quad r_{\lambda SiO_2} = 0,483 \quad \text{przy} \quad n = 52 \tag{11}$$



Rys. 13. Zależność współczynnika przewodzenia ciepła λ od ilościowego udziału kwarcu w klastycznych osadach karbonu LZW

Fig. 13. Relation between coefficient of thermal conductivity λ and quartz content in clastic Carboniferous sediments in the Lublin Coal Basin

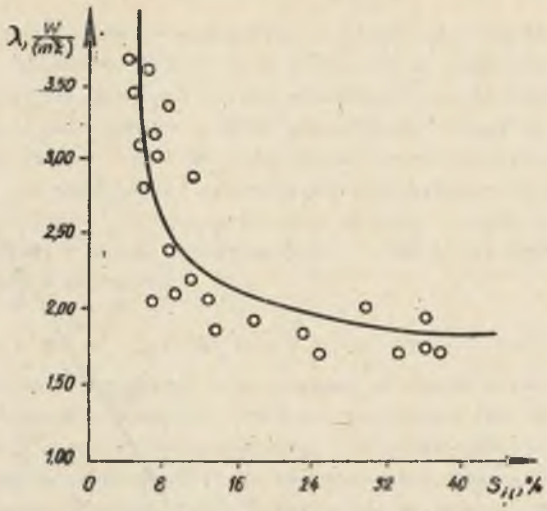
$$\lambda = 3,45 - 0,062s, \quad r_{\lambda,s} = 0,341 \quad \text{przy} \quad n = 52 \tag{12}$$

gdzie:

r - współczynnik korelacji.

Uzyskane dla poszczególnych funkcji stosunkowo niskie wartości współczynnika korelacji świadczą między innymi o dużym wpływie na współczynnik przewodzenia ciepła skał innych minerałów (rys. 13).

Brak wyraźnego związku korelacyjnego między współczynnikiem przewodzenia ciepła i ilością spoiwa S w klastycznych osadach karbonu należy tłumaczyć różnorodnością rodzajów spoiwa wywołującego w znacznym stopniu zmienność



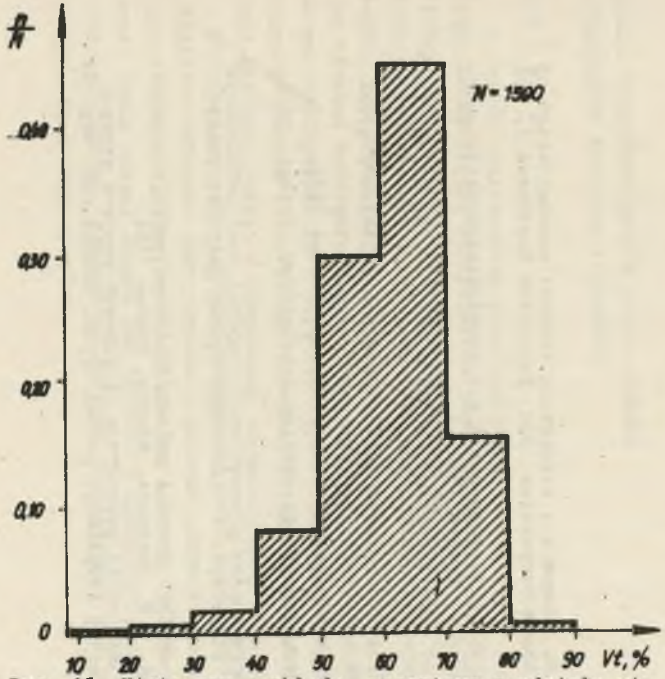
Rys. 14. Zależność współczynnika przewodzenia ciepła λ od ilościowego udziału spoiwa ilastego S_{il} w piaskowcach karbonu LZW

Fig. 14. Relation between coefficient of thermal conductivity and clay cement content S_{il} for Carboniferous sandstones from the Lublin Coal Basin

przewodności cieplnej skał, przy czym dla typowych odmian piaskowców wyróżniających się spoiwem ilastym uzyskano nieco wyraźniejszą zależność korelacyjną, z której wynika, że ilość spoiwa ilastego w piaskowcach karbonu wpływa w sposób znaczący na wielkość współczynnika przewodzenia ciepła (rys.14).

W ramach uwzględnienia niektórych elementów budowy petrograficznej skał badano również wpływ witrynizacji węgli kamiennych z obszaru LZW na wielkość współczynnika przewodzenia ciepła. Na podstawie badań mikroskopowych węgli z obszaru LZW na preparatach ziarnowych wykonanych z uśrednionych rdzeni wiertniczych (średnica ziaren < 0,75 mm) stwierdzono, że podstawowe składniki mikroskopowe węgli kamiennych LZW reprezentowane są przez grupę witrynitu, egzynitu, inertynitu i substancję mineralną [12].

Z wymienionych tych grup przeważająca jest grupa witrynitu składająca się głównie z trzech maceratów: kolinitu, podrzędnie telinitu i w sporadycznych przypadkach witrodetrynitu. Skrajne wartości składników witrynitowych w węglach kamiennych lubelskiej formacji węglowej (westfal A-B) kształtują się od 10,0 do 90,5%, średnia wartość wynosi 67% (rys. 15). Uwzględniając tak szeroki przedział zmienności procentowego udziału witrynitu w węglach LZW, zbadano wpływ procentowego udziału witrynitu w węglach na wielkość współczynnika przewodzenia ciepła. Dla wybranych sześciu próbek węgli procentowy udział witrynitu w węglach kształtuje się od 42,5 do 79,7% przy współczynniku przewodzenia ciepła od 0,34 do 0,72 $\frac{W}{mK}$. Uzyskana zależność $\lambda = f(V_t)$ ma charakter liniowy, co dowodzi, że proces prowadzący do polepszenia jakości węgli wywołuje wzrost ich przewodności cieplnej (rys. 16).

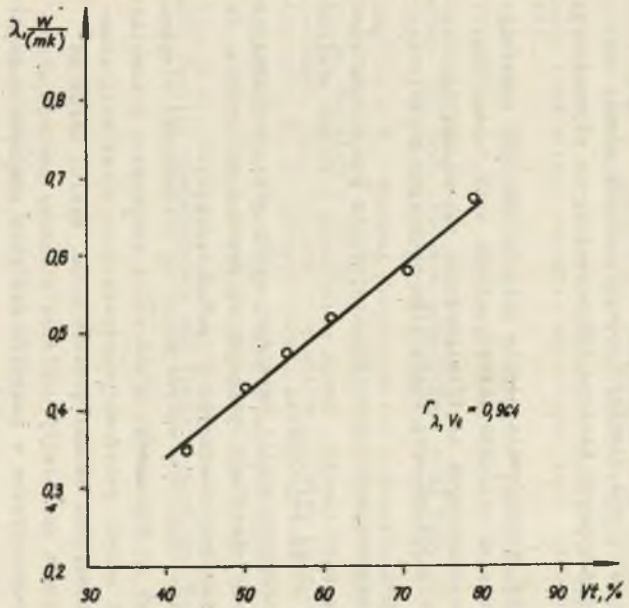


Rys. 15. Histogram rozkładu procentowego udziału witrynitu w węglach kamiennych z obszaru LZW wg [7]

n - liczebność obserwacji w danym przedziale, N - liczebność obserwacji w danym zbiorze

Fig. 15. Histogram of percentage content of vitrinite in hard coals from the Lublin Coal Basin

n - number of observations in the given interval, N - number of observations in the given set



Rys. 16. Zależność współczynnika przewodzenia ciepła λ od procentowego udziału witrynitu V_t, w węglach kamiennych z obszaru LZW

Fig. 16. Relation between coefficient of thermal conductivity λ and percentage content of vitrinite V_t in hard coals from the Lublin Coal Basin

WNIOSKI I UWAGI KOŃCOWE

Przeprowadzone badania własności cieplnych poszczególnych odmian skalnych w kompleksach stratygraficznych karbonu LZW pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

1. Badanią współczynnika przewodzenia ciepła skał karbonu LZW wykazały, że zmiany jego determinowane są własnościami fizycznymi skał, elementami budowy petrograficznej poszczególnych skał, nasyceniem ich wodami zmineralizowanymi, temperaturą, ciśnieniem oraz kierunkiem przepływu strumienia ciepła (anizotropią cieplną).

2. Uzyskana zależność współczynnika przewodzenia ciepła piaskowców karbonu od współczynnika przepuszczalności, oporu właściwego i innych wielkości pozwala na przybliżoną ocenę tej cechy.

3. Przedstawione w opracowaniu wyniki omawianej cechy przy uwzględnieniu wilgoci naturalnej i mineralizacji wód wgłębnych na przewodność cieplną są w zasadzie zgodne z wynikiem innych autorów w tym zakresie.

4. Przeprowadzona analiza czynników wpływających na przewodność cieplną skał LZW stworzyła podstawy do poprawnego wyznaczenia temperatur w kompleksach litostratygraficznych metodą geotermodynamiczną oraz określenia ziemskiego strumienia ciepła klasyczną metodą geotermiczną. Wyniki określeń tych parametrów geotermicznych umożliwiły uściślenie budowy geologicznej oraz stworzyły podstawy prognostyczne w poszukiwaniu złóż surowców energetycznych w omawianym obszarze.

LITERATURA

[1] Anand J., Somerton W.H., Gomoa E.: Predicting thermal contuctivites of formation from other known properties. Soc. Petroleum Engineers J. vol. 13 p. 267-273 1973.

[2] Babajew W.F., Budymka W.F., Siergiejewa T.A.: Tiepłofiziczeskije swojstwa gornych porod. Niedra, Moskwa 1987.

[3] Birch F.: Energetics of core formation. Physica vol. 70. No 24, p. 6217 -6221 1965.

[4] Chmura K.: Własności fizykotermiczne skał niektórych polskich zagłębi górniczych. Wyd. Śląsk, Katowice 1970.

[5] Czeremieńskij G.A.: Prikładnaja geotermia. Niedra, Moskwa 1977.

[6] Drwięga Z.: Ziemski strumień ciepła obszaru lubelskiego. Przegl. Górn. nr 3 1979.

[7] Drwięga Z.: Związki korelacyjne przewodności cieplnej skał Lubelszczyzny z ich własnościami fizycznymi i elementami budowy petrograficznej. Nafta nr 1-2 1983.

[8] Fiziczeskije swojstwa gornych porod i poleznych iskopajemych (Sprawocznik geofizyka) pod red. N.B. Dortmana. Niedra, Moskwa 1984.

[9] Gordienko W.W. i in.: Mietodika izuczenija tiepłowych swojstw gornych porod i rasczot wieliczinу tiepłowogo potoka Kryma. Geofiz. sb. wyp. 24 s. 61-72 1978.

[10] Hurtig E.: Zum problem der anisotropie petrophysicalisher parametr in geologischen Korpern. Geophys. und geol. nr 12.

[11] Kappelmeyer G., Haenel R.: Geotermics with special reference to application. Gebruder Borntrager, Berlin-Stuttgart 1974.

[12] Migaszewski Z.: Charakterystyka petrograficzna węgli kamiennych z obszaru Lubelskiego Zagłębia Węglowego. Biul. IG 330 s. 5-59 Warszawa 1981.

[13] Plewa St.: Regionalny obraz parametrów geotermicznych obszaru Polski. Wyd. Geofiz. i Geol. Naft., Kraków 1966.

[14] Prediction of thermal conductivity in rocks from other physical parameters and from standard geophysical well logs. R. Goss R., Combs J., Timur A. 16 Annual Logging Symposium - Houston p. 1-19 1975.

[15] Somerton W.H.: Thermal properties of hydrocarbon bearing rocks at high temperatures and pressures. College of Engineering University of California. Berkley p. 51 1973.

[16] Sterlenko Z.W.: Tiepłofiziczeskije swojstwa płastowych wod, nieftiej i nasyczennych imi gornych porod. Leningrad 1975.

[17] Tichomirow W.M.: Tiepłoprowodnost gornych porod i jej swiaz z płotnostiu, włażnostiu i temperaturoj. Niefti. Chozj. nr 4, s. 23-28 1968.

[18] Viloria G., Farouq Ali S.M.: Rock thermal conductivity an its variation with density temperatures and fluid saturation. Produces Monthly nr 3 1968.

Recenzent: doc. dr hab. inż. Wacław Zuberek

Wpłynęło do redakcji w kwietniu 1988 r.

АНАЛИЗ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПОРОД КАРБОНА ЛЮБЕЛЬСКОГО БАССЕЙНА УГОЛЬНОГО

Р е з ю м е

В статьи представлена роль теплопроводности пород в комплексе тепловых свойств. Синтетично обсуждаются разнородные факторы влияющие на величину коэффициента теплопроводности пород карбона Любельского угольного бассейна. Подчерктуто влияние таких факторов как: плотность, пористость, проницаемость, удельное электрическое сопротивление, пластовая влажность, направление течения теплового потока, минерализация пластовой воды, некоторые элементы петрографического строения пород (процентное содержание кварца, глинистого цемента в песчаниках карбона, витринита в каменных углях). Влияние этих факторов учтено в выведенных корреляционных зависимостях.

Собственные исследования теплопроводности пород карбона Любельского угольного бассейна были увязаны к мировым достижениям в этой области. Выполнен анализ влияния этих факторов на величину коэффициента теплопроводности пород создал основы для верного и правильного определения глубинного теплового потока, которую по очереди использовали для решения различных геолого-пластовых проблем.

ANALYSIS OF THERMAL CONDUCTIVITY ROCKS CARBONIFEROUS LUBLIN BASIN COAL

S u m m a r y

The article presents function of thermal conductivity of rocks in the complex of thermal properties. Various factors influencing the value of thermal conductivity of rocks carboniferous Lublin Coal Basin. The influence of such factors as those enumerated below is stressed: density, porosity, permeability, electricresistivity, moisture formation, heat flow direction, formation water salinity, some elements of petrographic structure (proportion of quartz, clay binder in the sandstones of carboniferous and of vitrinite in coal). The impact of these factor was considered in correlation dependencies.

Our examing of thermal conductivity of Lublin Coal Basin rocks carboniferous is related to world achievements in this field. The analysis of the effect of these factors on greatiess of thermal conductivity of rocks gave the basic for correct determination of the terrestrial heat flow, which is used while solving various geological and reservoir problem.