

WŁASNOŚCI PETROFIZYCZNE NIEKTÓRYCH SKAŁ MONOKLINY PRZEDSUDECKIEJ

UKD 552.5:53:552.54:552.513/:551.736+551.761.1(438—14 monoklina przedsudecka)

Informacje, jakich dostarczają badania własności fizycznych skał, mogą służyć zarówno do interpretacji obserwowanych zjawisk geologicznych, jak i dla potrzeb modelowania w geofizycznych metodach poszukiwawczych. Niektóre z tych własności, jak: gęstość, porowatość i parametry magnetyczne są szeroko wykorzystywane w wielu badaniach geofizycznych i geologicznych (6), inne natomiast niosąc z sobą podobnie cenne informacje, znalazły dotychczas znacznie węższe zastosowanie (11). Do tych ostatnich należą m.in. takie własności fizyczne skał (określane laboratoryjnie), jak: przewodnictwo cieplne i temperaturowe, a także własności elektryczne oraz sprężyste.

Większe zainteresowanie pierwszą grupą własności petrofizycznych wynika głównie stąd, iż są one częściej wykorzystywane w geofizycznych badaniach prospekcyjnych, gdy pozostałe stosowane są sporadycznie, tylko dla wybranych problemów i zagadnień. Z tego też względu szeroko rozumiana kompleksowość badań petrofizycznych jest praktykowana dość rzadko i dotyczy raczej pojedynczych warstw oraz skał niż geologicznych przekrojów i regionów. Natomiast ilość informacji, jakie niosą badania kompleksowe, jest niewspółmiernie większa od pojedynczych pomiarów petrofizycznych, a związki korelacyjne między poszczególnymi własnościami pozwalają na wyciąganie szerszych i ogólniejszych wniosków.

W artykule niniejszym omówiono badania petrofizyczne skał pochodzących z otworu Sieciejów P-5 z monokliny przedsudeckiej. Obejmują one 4 rodzaje skał, takich, jak: piaskowce pstrego piaskowca, piaskowce czerwonego spągowca oraz cechsztyńskie anhydryty i dolomity.

Próbki tych skał pobrane do pomiarów nie były poddawane badaniom petrograficznym; dlatego w okazach takich skał jak dolomity i anhydryty mogą mieć miejsce przypadki niejednorodności i przerostów z innymi skałami, co może mieć wpływ na pewną zmienność ich własności fizycznych. Badane skały pochodzą z różnych głębokości, i tak: piaskowce pstrego piaskowca — 350–450 m, anhydryty i dolomity — 700–1024 m oraz piaskowce czerwonego spągowca — 1050–1100 m.

Na próbkach wykonano następujące badania: gęstości, porowatości, oporności elektrycznej, przewodności cieplnej i temperaturowej, właściwej pojemności cieplnej oraz prędkości fali podłużnej. Spośród wymienionych własności petrofizycznych parametry cieplne należą do najrzadziej mierzonych i wykorzystywanych w Polsce. Przedstawione

wyniki tych badań stanowią efekt opracowanej i wdrożonej w 1979 r. w Przedsiębiorstwie Badań Geofizycznych metodyki i techniki pomiarów przewodności cieplnej próbek skał za pomocą aparatury $\lambda - M 2$.

APARATURA POMIAROWA

Aparatura użyta do badań pochodzi głównie od producentów krajowych. Do oznaczania tradycyjnych już własności petrofizycznych, jak gęstość i porowatość, użyto gęstościomierzy typu GS wytwarzanych w PBG, aparatów próżniowych typu Rappa produkcji NRD oraz wag analitycznych i innego sprzętu pomocniczego pochodzenia krajowego. Pomiary oporności elektrycznej wykonano za pomocą zestawu pomiarowego działającego na zasadzie mostkowej (konstrukcji PBG), natomiast pomiary prędkości fali podłużnej aparaturą akustyczną typu ISU-1 (z ZSRR).

Do pomiarów przewodności cieplnej wykorzystano aparaturę $\lambda - M 2$ (wyprodukowaną przez Politechnikę Szczecińską). Aparatura ta, nieco zmodyfikowana we własnym zakresie, była kalibrowana za pomocą wzorców kwarcowych opracowanych i zaprojektowanych w Oddziale Petrofizyki i Modelowania PBG. Wzorcy te wykonano z kwarców angielskich i brazylijskich przez specjalistyczne zakłady w Polsce.

METODYKA I WYNIKI BADAŃ

Każdy z wymienionych typów skał poddano badaniom po 20 próbek z wyjątkiem dolomitów, których liczba próbek wynosiła 9. Z tej początkowej liczby w trakcie badań niektóre próbki uległy zniszczeniu (np. wskutek rozpadnięcia się w procesie nasycania), co jednak nie zmniejszyło w istotny sposób badanego materiału. Wszystkie próbki posiadały kształt dysków o średnicy 30 mm i wysokości 15 mm. Kształt próbek dostosowany był do wymagań aparatury $\lambda - M 2$ służącej do pomiarów przewodnictwa cieplnego i z powodzeniem mógł być także przyjęty do pozostałych badań.

Większość z badanych próbek wycięto w 2 kierunkach, tak, aby oś dysku (walca) przebiegała równolegle i prostopadle do osi rdzenia wiertniczego, a więc i do osi otworu wiertniczego. Oś walca w tym przypadku stanowiła kierunek badania próbki, co dotyczy takich spośród mierzonych własności petrofizycznych, jak: przewodność cieplna, prędkość fali podłużnej oraz oporność elektryczna. Wybór

wymienionych kierunków. badań był niejako zastępczy, zastosowany wobec braku widocznego warstwowania i laminacji badanych skał, a miał na celu poczynienie spostrzeżeń dotyczących anizotropii badanych własności.

Każdą z próbek poddano kolejnym badaniom, najpierw w stanie suchym, a następnie w stanie pełnego nasycenia wodą. Nasycanie próbek dla wszystkich rodzajów badań wykonywano w aparacie próżniowym Rappa. Dla niektórych badań, jak: przewodnictwo cieplne, prędkość fali podłużnej i oporność elektryczna, za stan suchy zdecydowano się przyjąć stan swobodnego wysuszenia próbek w temperaturze pokojowej w okresie kilku miesięcy. Przyjęcie takiego sposobu suszenia podyktowane było spostrzeżeniem, że wiele próbek, np. piaskowców pstręgo piaskowca po wysuszeniu w suszarce w temperaturze 105–110°C, a następnie po ich nasyceniu wodą, rozpadało się całkowicie lub częściowo, traciło swoją pierwotną formę, a co za tym idzie traciło przydatność do dalszych badań wymagających często określonej geometrii kształtu i powierzchni czynnej próbki. Chodziło także o to, aby możliwie wszystkie z wybranych typów skał mogły być poddane identycznym badaniom i aby zestaw ustalonych pomiarów petrofizycznych mógł być wykonany na każdej kolejnej próbce.

Powyższe założenie miało na celu uzyskanie możliwie pełnej obserwacji związków korelacyjnych między poszczególnymi własnościami fizycznymi dla badanych typów litologicznych skał. Na osobnych próbkach wykonano tylko takie badania, jak przewodność temperaturowa i właściwa pojemność cieplna. Przy określaniu gęstości pozornej i porowatości suszenie próbek odbywało się w suszarce próżniowej w temp. 105–110°C.

Wykorzystana w badaniach metodyka oznaczania gęstości i porowatości (6, 13) opiera się na zastosowaniu gęstościomierza typu GS służącego do określania gęstości objętościowej skał δ . Gęstość pozorną σ_p i porowatość otwartą P_o wylicza się następująco z wzorów:

$$\sigma_p = \frac{m_o \cdot \delta}{m_1} \quad [\text{g/cm}^3]$$

$$P_o = \frac{m_1 - m_o}{m_1} \cdot \frac{\delta}{\sigma_c} \cdot 100 \quad [\%]$$

gdzie:

m_o – masa próbki suchej (g), a m_1 – nasyconej (g),
 σ_c – gęstość cieczy nasycającej (g/cm³).

Przewodność cieplną λ określano według opracowanej metodyki (1, 4, 5) w zastosowaniu do aparatury λ – M 2. Wyliczono ją z wzoru:

$$\lambda = \frac{U \cdot J \cdot d}{S \cdot \Delta t} \quad [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$$

gdzie:

U – napięcie (V), J – prąd (A), d – wysokość próbki (m), S – powierzchnia czynna próbki (m²),
 Δt – różnica temperatur powierzchni pomiarowych (°C).

Wartości λ odnoszą się do średniej temperatury próbek wynoszącej 30°C. Pomiary wykonywano na próbkach w kształcie walca o ϕ 30 mm i d = 15 mm. Aparaturę kalibrowano za pomocą wzorów kwarcowych (1, 4, 12).

Właściwą pojemność cieplną c określano kalorymetrem (2, 5), wartość tej własności wyliczano z wzoru:

$$c = \frac{M(t_3 - t_1) + Q_t}{m(t_2 - t_3)} \quad \left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$$

gdzie:

M – równoważnik wodny kalorymetru,
 t_1 – temperatura początkowa w kalorymetrze,
 t_2 – temperatura początkowa badanego ciała,
 t_3 – temperatura końcowa po wyrównaniu się w kalorymetrze,
 m – masa badanej próbki,
 Q_t – poprawka na pobrane ciepło przez termometr.

Metodykę określania przewodności temperaturowej a oparto na wykorzystaniu zależności (5, 8) ujętej wzorem:

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \sigma_p} \quad \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$$

gdzie:

λ – przewodność cieplna [W/(m · K)],
 c – właściwa pojemność cieplna [J/(g · K)],
 σ_p – gęstość pozorną [g/cm³].

Prędkość fali podłużnej V_p określano aparaturą ISU-1, wartość tego parametru (5, 8) wyliczano z wzoru:

$$V_p = \frac{l}{t - \Delta t} \quad [\text{m/s}]$$

gdzie:

l – długość próbki (m),
 t – rejestrowany czas przebiegu sygnału (s),
 Δt – opóźnienie sygnału w aparaturze.

Własności elektryczne, jak stałą dielektryczną i oporność elektryczną (9) mierzono za pomocą mostka na próbkach suchych i nasyconych, a wyniki wyliczono z wzorów:

1) próbki suche:

$$\rho = \frac{S}{\omega \cdot \text{tg} \delta \cdot c \cdot h} \quad [\text{omm}]$$

2) nasycone:

$$\rho = \frac{V \cdot S \cdot R_{wz}}{\Delta V \cdot 10^{-3} \cdot h} \quad [\text{omm}]$$

gdzie:

S – powierzchnia czynna próbki (m²),
 h – wysokość próbki (m),
 $\text{tg} \delta$ – współczynnik upływności (strat dielektrycznych),
 c – pojemność elektryczna próbki skalnej (F),
 ω – $2\pi f$,
 f – częstotliwość prądu pomiarowego mostka pojemnościowego (Hz),
 V – napięcie na elektrodach (V),
 ΔV – odczytywana różnica potencjałów (V),
 R_{wz} – oporność wzorcowa (om).

Pomiary niektórych parametrów (jak przewodność cieplna i prędkość fali podłużnej) wymagają stosowania substancji sprzęgających, służących do ulepszenia styku powierzchni czynnych próbek z powierzchnią płytek pomiarowych. Jako taką substancję w pomiarach przewodnictwa cieplnego (1, 4, 12) zastosowano cienką warstwę gliceryny, znakomicie poprawiającej jakość i powtarzalność wyników pomiarowych, natomiast w przypadku pomiarów prędkości fali podłużnej stosowano niewielką ilość towotu. Wpływ gliceryny na wartość mierzonego przewodnictwa cieplnego uwzględniono eksperymentalnie. Można go również wyliczyć z wzoru podanego przez Ratcliffa (12):

$$\frac{1}{k_a} = \frac{c}{t} + \frac{1}{k}$$

gdzie:

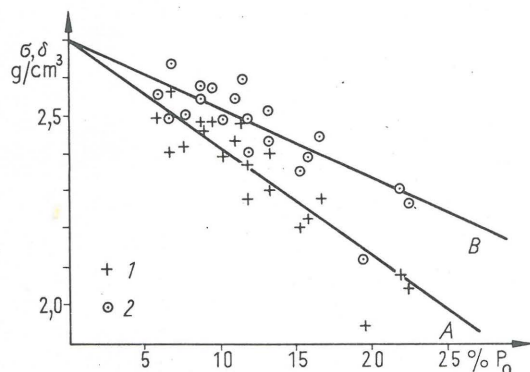
k_a – przewodność cieplna pozorna, k – przewodność cieplna rzeczywista, t – grubość badanej próbki, c – grubość 2 warstw gliceryny podzielonych przez jej przewodność cieplną.

Stosowanie w niektórych pomiarach substancji sprzęgających polepsza znakomicie wyniki, ale może również mieć ujemny wpływ na kolejne pomiary wykonywane na tych samych próbkach. Na ogół jest on niewielki lub zupełnie nieistotny, jednak w celu jego wyeliminowania pomiary z użyciem substancji sprzęgających należy wykonywać na końcu cyklu pomiarowego.

Innym rozwiązaniem jest stosowanie osobnych próbek, ale wywiera to ujemne konsekwencje metodyczne, a także powiększa pracochłonność. Pod pojęciem polepszenia wyników należy rozumieć uzyskanie dobrej ich powtarzalności, co zapewnia jednakowe warunki pomiarowe poszczególnym próbkom, natomiast w przypadku przewodności cieplnej polega m.in. na ujednoliceniu oporności cieplnej kontaktów na powierzchniach pomiarowych, a w pomiarach prędkości rozchodzenia się fali podobnych kontaktów akustycznych. Powierzchnie czynne badanych próbek były wygładzone poprzez szlifowanie, a doskonalszym jeszcze rozwiązaniem, istotnym zwłaszcza dla badań przewodnictwa cieplnego, jest ich wypolerowanie.

Analizując wyniki badań prezentowanego kompleksu pomiarowego stwierdzić należy, iż badania własności petrofizycznych wykonane na próbkach reprezentujących 2 prostopadłe do siebie kierunki (tj. równoległe do osi rdzenia wiertniczego i do niej prostopadłe) wykazały, że własności te nie są zależne od tych kierunków. Dotyczy to wszystkich badanych typów skał. Wyniki wykazują zgodność średnich wartości w obu kierunkach, a różnice występujące w poszczególnych próbkach mieszczą się w granicach błędu pomiarowego. Tak więc można stwierdzić, że badane utwory (a więc zarówno piaskowce pstrego piaskowca i czerwonego spągowca, jak i dolomity oraz anhydryty) nie wykazują anizotropii badanych własności, odniesionej do przyjętego systemu kierunków.

W anhydrytach i dolomitach, których porowatość jest bardzo mała (średnio od 0,37 do 2,12%) różnica między gęstością pozorną σ_p i objętościową δ wynosi 0,01 g/cm³. W przypadku natomiast obu typów badanych piaskowców



Ryc. 1. Zależność gęstości pozornej (σ_p) i gęstości objętościowej (δ) od porowatości otwartej (P_o) dla piaskowców pstrego piaskowca 1, A – punkty i krzywa dla próbek suchych, 2, B – dla nasyconych

Fig. 1. Dependence of apparent density (σ_p) and volume density (δ) on open porosity (P_o) for Bundsandstein sandstones. 1, A – points and curve for air-dry samples, 2, B – for saturated samples

posiadających znaczną porowatość wynoszącą od 1,39 do 22,44% wzrost gęstości objętościowej w stosunku do ich gęstości pozornej wynosi średnio od 0,07 do 0,12 g/cm³ (maksymalnie 0,22 g/cm³).

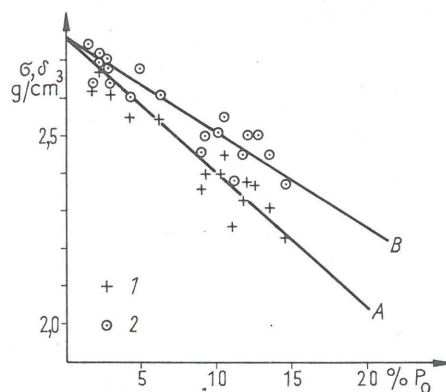
Ze względu na wykorzystywanie gęstości objętościowej δ w geofizyce prospekcyjnej i wiertniczej warto na te różnice zwrócić uwagę.

Zależność gęstości pozornej σ_p i objętościowej δ od porowatości otwartej P_o dla pstrego piaskowca, ilustruje ryc. 1, a dla piaskowców czerwonego spągowca ryc. 2. Krzywe „A” na obu rycinach reprezentują zależność dla gęstości pozornej σ_p , a krzywe „B” dla objętościowej δ . Obie krzywe A i B przecinają się w punkcie, gdzie porowatość otwarta równa jest 0%, a więc w punkcie, w którym $\delta = \sigma_p$. Punkt ten wyznacza na osi rzędnych wartość, jaka dla tego typu skał jak badane tu piaskowce (w których porowatość otwarta P_o praktycznie równa się porowatości całkowitej P) odpowiada gęstości właściwej σ_w lub jest jej bardzo bliska.

Wyznaczenie tego punktu może stanowić graficzny sposób na określanie przybliżonej wartości gęstości właściwej σ_w tego typu skał. Dla piaskowców pstrego piaskowca wynosi ona 2,70 g/cm³, a dla piaskowców czerwonego spągowca 2,76 g/cm³. Porównanie wyników pomiarów wykonanych na próbkach suchych i nasyconych dla przewodności cieplnej λ , oporności elektrycznej ρ i prędkości fali podłużnej V_p wykazuje, że wartości te znacznie się różnią od siebie. Największe różnice mierzonych wartości obserwowane są w wynikach pomiarów oporności elektrycznej, które w nasyconych próbkach piaskowca czerwonego spągowca posiadają wartość o 6 rzędów niższą od próbek suchych. W innych typach skał różnice te są nieco mniejsze.

W przypadku prędkości fali podłużnej obserwuje się jej wzrost w próbkach nasyconych, średnio o 5–20%, przy czym w części próbek brak jest różnic w porównaniu z próbkami suchymi. Największym wzrostem prędkości akustycznych po nasyceniu charakteryzuje się piaskowiec pstrego piaskowca posiadający jednocześnie największą porowatość otwartą spośród badanych typów skał.

W zakresie przewodności cieplnej badane typy skał są przykładem zarówno bardzo niskich jej wartości, jak



Ryc. 2. Zależność gęstości pozornej (σ_p) i gęstości objętościowej (δ) od porowatości otwartej (P_o) dla piaskowców czerwonego spągowca

1, A – punkty i krzywa dla próbek suchych, 2, B – dla nasyconych

Fig. 2. Dependence of apparent density (σ_p) and volume density (δ) on open porosity (P_o) for Rotliegendes sandstones

1, A – points and curve for air-dry samples, 2, B – for saturated samples

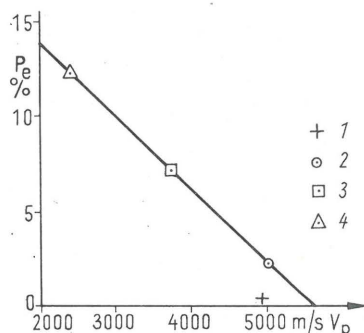
i wartości wysokich. Najniższymi wartościami λ wyróżniają się piaskowce pstrego piaskowca, których przewodnictwo cieplne należy do najniższych spośród pospolicie występujących skał. Szczególnie małą przewodność skała ta posiada w stanie suchym, wynoszącą od 1,1 do 2,14 W/(m · K), w stanie nasyconym wzrasta średnio o ok. 50%, a w pojedynczych przypadkach przekracza nawet 100%. Większymi wartościami przewodności cieplnej w porównaniu z piaskowcami pstrego piaskowca charakteryzują się piaskowce czerwonego spągowca, średnia ich w stanie suchym wynosi 1,69 W/(m · K), a w nasyconym 3,27 W/(m · K).

W przeciwieństwie do omówionych powyżej piaskowców 2 pozostałe typy skał (tj. anhydryty i dolomity) charakteryzują się jedną z najwyższych przewodności cieplnych skał; średnia ich w stanie suchym wynosi 4,96 W/(m · K), a w nasyconym 5,35 W/(m · K). Natomiast dla dolomitów wartości te odpowiednio wynoszą 3,81 i 4,63 W/(m · K).

OBSERWOWANE ZWIĄZKI MIĘDZY RÓŻNYMI WŁASNOŚCIAMI PETROFIZYCZNYMI BADANYCH SKAŁ

Zależność prędkości fali podłużnej V_p od porowatości otwartej P_o dla badanych typów skał przedstawia ryc. 3.

Dla dwu typów skał osadowych (piaskowców pstrego piaskowca i piaskowców czerwonego spągowca) oraz skały węglanowej (dolomitu) otrzymano zależność liniową. Ze wzrostem porowatości maleje prędkość fali podłużnej V_p . Jest to zależność znana (7) i szeroko wykorzystywana w metodzie akustycznej geofizyki wiertniczej do określania porowatości warstw zbiornikowych w otworach wiertniczych. Punkt dla anhydrytu, należący do innej grupy skał, leży poza tą linią. Zależność prędkości fali podłużnej od gęstości ilustruje ryc. 4, sporządzona dla dolomitów, piaskowców czerwonego spągowca i pstrego piaskowca. Pokazana zależność dla badanych typów skał (ryc. 4) potwierdza wcześniejsze badania w tym zakresie (3, 10) wykazując, że jest to zależność wyższego rzędu i że dają się jej podporządkować skały piaszczysto-ilaste i węglanowe. Zależność między gęstością a prędkością rozchodzenia się fali akustycznej dla skał piaszczystych i węglanowych według W.M. Bierieskina (3) ma postać:



Ryc. 3. Zależność prędkości fali podłużnej (V_p) od porowatości otwartej (P_o) sporządzona dla wartości średnich:

1 - anhydrytów, 2 - dolomitów, 3 - piaskowców czerwonego spągowca, 4 - piaskowców pstrego piaskowca

Fig. 3. Dependence of velocity of longitudinal wave (V_p) on open porosity (P_o), traced for mean values for:

1 - anhydrites, 2 - dolomites, 3 - Rotliegendes sandstones, 4 - Bundsandstein sandstones

$$\sigma = 1,89 + 0,172 V_p$$

gdzie:

σ - gęstość,

V_p - prędkość fali podłużnej.

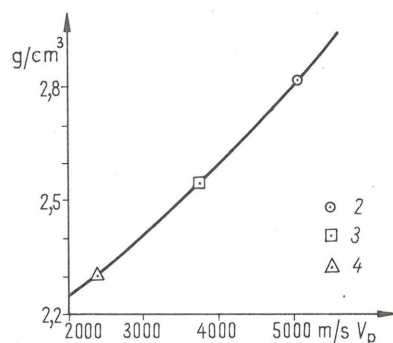
Ta formuła nieco zmodyfikowana do postaci:

$$\delta = 1,87 + 0,172 V_p$$

gdzie:

δ - gęstość objętościowa, spełnia doskonale zależność prędkości fali podłużnej od gęstości objętościowej δ dla obu typów badanych piaskowców i dolomitu (ryc. 4).

Powyższe rezultaty potwierdzają publikowane badania różnych autorów (4, 8), że przewodnictwo cieplne skał jest silnie związane z innymi własnościami petrofizycznymi, z których gęstość zajmuje miejsce podstawowe. Ilustruje to ryc. 5, przedstawiająca otrzymaną zależność liniową

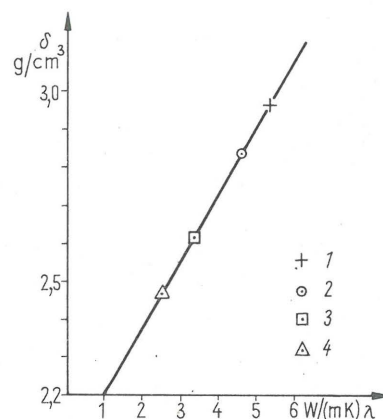


Ryc. 4. Zależność prędkości fali podłużnej (V_p) od gęstości pozornej (σ_p) dla wartości średnich:

2 - dolomitów, 3 - piaskowców czerwonego spągowca, 4 - piaskowców pstrego piaskowca

Fig. 4. Dependence of velocity of longitudinal wave (V_p) on apparent density (σ_p) for mean values of:

2 - dolomites, 3 - Rotliegendes sandstones, 4 - Bundsandstein sandstones

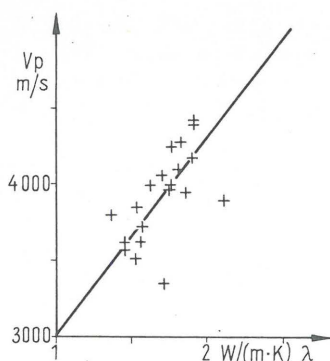


Ryc. 5. Zależność przewodności cieplnej (λ) od gęstości objętościowej (δ) dla wartości średnich:

1 - anhydrytów, 2 - dolomitów, 3 - piaskowców czerwonego spągowca, 4 - piaskowców pstrego piaskowca

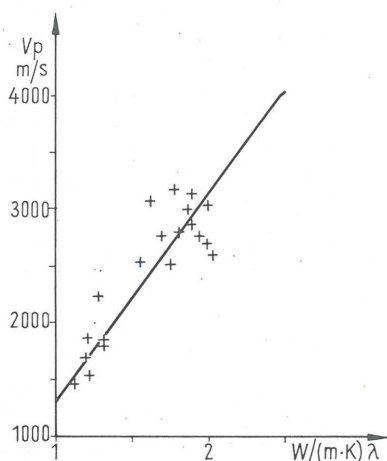
Fig. 5. Dependence of heat conductivity (λ) on volume density (δ) for mean values of:

1 - anhydrites, 2 - dolomites, 3 - Rotliegendes sandstones, 4 - Bundsandstein sandstones



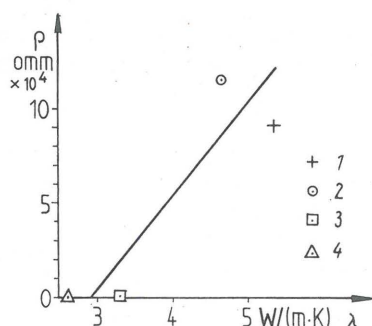
Ryc. 6. Zależność przewodności cieplnej (λ) od prędkości fali podłużnej (V_p) dla próbek suchych piaskowców czerwonego spągowca

Fig. 6. Dependence of heat conductivity (λ) on velocity of longitudinal wave (V_p) for samples of Rotliegendes sandstones in air-dry state



Ryc. 7. Zależność przewodności cieplnej (λ) od prędkości fali podłużnej (V_p) dla suchych próbek piaskowców pstrego piaskowca

Fig. 7. Dependence of heat conductivity (λ) on velocity of longitudinal wave (V_p) for samples of Buntsandstein sandstones in air-dry state



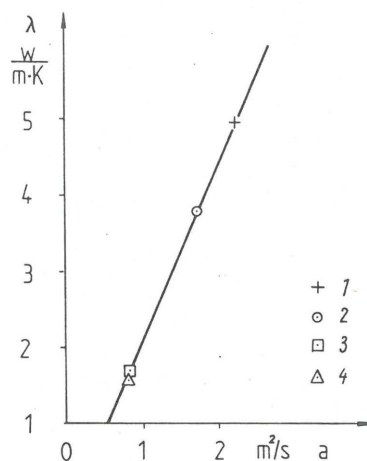
Ryc. 8. Trend zależności przewodności cieplnej (λ) i oporności elektrycznej (ρ) dla średnich wartości próbek nasyconych: 1 – anhydrytów, 2 – dolomitów, 3 – piaskowców czerwonego spągowca, 4 – piaskowców pstrego piaskowca

Fig. 8. Trend of dependence of heat conductivity (λ) and electric resistance (ρ) for mean values of saturated samples of: 1 – anhydrites, 2 – dolomites, 3 – Rotliegendes sandstones, 4 – Buntsandstein sandstones

przewodności cieplnej λ od gęstości objętościowej δ dla czterech badanych typów skał (anhydrytów, dolomitów, piaskowców czerwonego spągowca i piaskowców pstrego piaskowca).

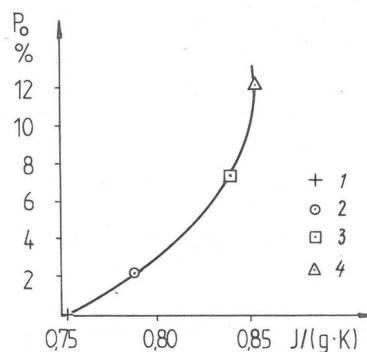
Jak pokazują ryc. 6 i 7, przedstawiające zależność przewodności cieplnej λ od prędkości fali podłużnej V_p dla próbek suchych piaskowców czerwonego spągowca i piaskowców pstrego piaskowca, zależności te mają charakter liniowy. Można więc stwierdzić, że jeżeli w danym typie skały obserwuje się wzrost prędkości fali podłużnej, to jednocześnie wzrastać będzie przewodność cieplna tej skały.

Dość złożone związki łączą oporność elektryczną ρ z przewodnością cieplną λ skał. Jeżeli będziemy rozpatrywać różne rodzaje skał (zarówno w stanie suchym, jak i nasyconym), to zauważymy, że skały o wyższej oporności elektrycznej charakteryzują się wyższą przewodnością cieplną. Ogólny trend związku tych własności dla skał nasy-



Ryc. 9. Zależność przewodności cieplnej (λ) od przewodności temperaturowej (a) skał, sporządzony dla wartości średnich: 1 – anhydrytów, 2 – dolomitów, 3 – piaskowców czerwonego spągowca, 4 – piaskowców pstrego piaskowca

Fig. 9. Dependence of heat conductivity (λ) on temperature conductivity (a) of rocks, traced for mean values of: 1 – anhydrites, 2 – dolomites, 3 – Rotliegendes sandstones, 4 – Buntsandstein sandstones



Ryc. 10. Zależność właściwej pojemności cieplnej (c) od porowatości otwartej (P_0) dla wartości średnich: 1 – anhydrytów, 2 – dolomitów, 3 – piaskowców czerwonego spągowca, 4 – piaskowców pstrego piaskowca

Fig. 10. Dependence of specific heat capacity (c) on open porosity (P_0) for mean values of: 1 – anhydrites, 2 – dolomites, 3 – Rotliegendes sandstones, 4 – Buntsandstein sandstones

conych obrazuje ryc. 8. Zupełnie odwrotne zjawisko zachodzi w przypadku obserwacji wymienionych własności w tym samym typie skały zarówno w stanie suchym, jak i po jej nasyceniu wodą. Obserwujemy tu wyraźny trend zmniejszania się przewodności cieplnej ze wzrostem oporności elektrycznej.

Trend powiązań przewodności temperaturowej a z gęstością pozorną σ_p , prędkością fali podłużnej V_p i porowatością otwartą P_o ma podobny charakter, jak trend zależności przewodności cieplnej λ od tych parametrów. Zależność między przewodnością cieplną a przewodnością temperaturową ma charakter liniowy i przedstawia ją ryc. 9. Ryc. 10 pokazuje natomiast charakter zależności porowatości otwartej P_o i właściwej pojemności cieplnej c . Jest to zależność wyższego rzędu.

Wyniki przeprowadzonych badań, pozwalają zarówno zorientować się w skali zmienności pomierzonych własności petrofizycznych w badanych typach skał, jak i na obserwację związków oraz zależności między tymi własnościami w skałach suchych i nasyconych. Ma to ważne znaczenie, szczególnie dla analizy mniej znanych własności petrofizycznych, jakimi są przewodnictwo cieplne oraz temperaturowe i inne.

LITERATURA

1. Basista S. — Opracowanie metodyki badań przewodności cieplnej utworów geologicznych legnickiego zagłębia miedziowego. Arch. PBG 1979.
2. Basista S. — Opracowanie metodyki i techniki określania właściwej pojemności cieplnej i przewodności temperaturowej skał. Ibidem 1980.
3. Bierieskin W.M. — K woprosu o sootnoszenii mieždu pŁotnostiu i skorostiu rozprostranienija uprugich woŁn w nich. Rozw. Promysł. Geofiz. wyp. 49.
4. Čermak V., Krešl M. — Thermal conductivity of rock and its measurement on the Divided-bar Apparatus. Geofysikalni sbornik, Praha 1967.
5. Chmura K. — Własności fizyko-termiczne skał niektórych polskich zagłębi górniczych. Wyd. Śląsk, Katowice 1970.
6. Dąbrowski A. — Przyczyny geologiczne siły ciężkości na obszarze Polski w świetle analizy ciężaru objętościowego. Pr. Inst. Geol. 1974 t. 73.
7. Desbrandes R. — Théorie et interprétation des diagraphies, Technip, Paris 1968.
8. Dortman W.N. — Fiziceskije swojstva gornych porod i poleznych iskopajemych. Moskwa 1976.
9. Dziubiński J., Jaworski A. — Opracowanie metodyki badań własności elektrycznych skał. Arch. PBG 1977.

10. Fajkiewicz Z. — Gęstość skał. W: Zarys geofizyki stosowanej. Wyd. Geol. 1972.
11. Płewa S. — Regionalny obraz parametrów geotermicznych obszaru Polski. Wyd. Geofiz. i Geol. Naft. Kraków 1966.
12. Ratcliffe E.N. — Thermal conductivities of fused and crystalline quartz. Brit. Journ. of Appl. Physics 1959 10 22.
13. Stolarski T. — Instrukcja pomiarów gęstości i porowatości skał. Arch. PBG 1973.

SUMMARY

The paper presents results of studies on petrophysical properties (density, porosity, heat conductivity, temperature conductivity, specific heat capacity, velocity of longitudinal wave, and electric resistance) of rocks from the Fore-Sudetic Monocline. Studies on air-dry and saturated samples of rocks such as anhydrites, dolomites, and Bundsandstein and Rotliegendes sandstones showed interrelationships and dependences of the above properties, presented in the paper in the form of graphs. The obtained results suggest strong dependences or dependence trends between less known physical parameters such as heat conductivity, temperature conductivity and specific heat capacity and the remaining petrophysical properties.

РЕЗЮМЕ

В статье представлены результаты исследований следующих петрофизических свойств: плотность, пористость, теплопроводность, температурная проводимость, удельная теплоёмкость, скорость продольной волны и электросопротивление образцов горных пород предсудетской моноклинали. Исследования проведенные на сухих и насыщенных образцах ангидритов, доломитов и песчаников пёстрого песчаника и песчаников красного лежня, указывают на взаимные связи и зависимости этих свойств. Эти зависимости представлены в статье на чертежах. Полученные результаты указывают также на существование сильных связей или трендов зависимостей между менее известными физическими параметрами, такими как теплопроводность и остальными петрофизическими свойствами.