

ZAGADNIENIE WYZNACZANIA WSPÓŁCZYNNIKÓW
ODBICIA FAL SPRĘŻYSTYCH
NA PODSTAWIE PROFILOWAŃ GEOFIZYKI WIERTNICZEJ

UKD 550.932.4.094.46

Znajomość rozkładu funkcji prędkości $V = f(h)$ oraz współczynników odbicia fal sprężystych na granicach litostratygraficznych, jest niezbędna do określania modelu prędkościowego ośrodka. Dla ośrodka skalnego o poziomych granicach rozdziału współczynnik odbicia określony jest następującą zależnością:

$$K_v = \frac{V_1 \sigma_1 - V_{i+1} \sigma_{i+1}}{V_1 \sigma_1 + V_{i+1} \sigma_{i+1}} \quad [1]$$

gdzie: V_i, V_{i+1} — prędkości w kolejnych warstwach,
 σ_i, σ_{i+1} — gęstości w kolejnych warstwach.

Jak widać z przytoczonego wzoru, aby znaleźć współczynniki odbicia na granicach warstw należy znać twardeści akustyczne poszczególnych kompleksów ($V \cdot \sigma_{i+1}$).

Zagadnienie wyznaczania prędkości interwałowej można rozwiązywać za pomocą profilowania akustycznego względnie metodą pionowego profilowania sejsmicznego w otworach wiertniczych. Na podstawie profilowania akustycznego prędkość warstw wyznacza się z wartości czasów przebiegu fali sprężystej od nadajnika do odbiornika, bądź też do dwóch odbiorników. Dla warstwy jednorodnej i sondy dwuelementowej (3):

$$V_w = \frac{l \cos \varphi}{T - \frac{d_o - (d_s + 2c)}{V_o} \sqrt{1 - \left(\frac{V_o^2}{V^2}\right)}} \quad [2]$$

dla sondy trójelementowej:

$$V_w = \frac{(l_2 - l_1) \cos \varphi}{T_2 - T_1} \quad [3]$$

gdzie:

- T, T_1, T_2 — mierzone czasy (jednym lub dwoma odbiornikami),
- V_o — prędkość rozchodzenia się fali sprężystej w płucze,
- V — prędkość rozchodzenia się fali sprężystej w ośrodku skalnym,
- φ — kąt między osią otworu i osią sondy,
- l, l_1, l_2 — odległości między nadajnikiem, a odbiornikiem lub nadajnikiem a poszczególnymi odbiornikami,
- d_o — średnica otworu wiertniczego,
- d_s — średnica sondy akustycznej,
- c — przesunięcie środka sondy w przypadku jej niecentrycznego położenia względem osi otworu.

Wyznaczona w ten sposób prędkość jest obarczona błędem, który zależy od błędów określania poszczególnych argumentów występujących w przytoczonych wzorach. Dla dwuelementowej sondy, jak widać, bardzo duży wpływ mają parametry otworu (V_o, d_o), natomiast dla sondy trójelementowej najistotniejszy wpływ ma nachylenie sondy względem ścianki otworu oraz czas interwałowy $\Delta T = T_2 - T_1$.

W przypadku nachylonego otworu wiertniczego określana prędkość będzie różna od prędkości rzeczywistej, jeżeli jednak nachylenia nie przekroczą $5-10^\circ$ wpływ tego czynnika będzie niewielki (w granicach dokładności pomiarów).

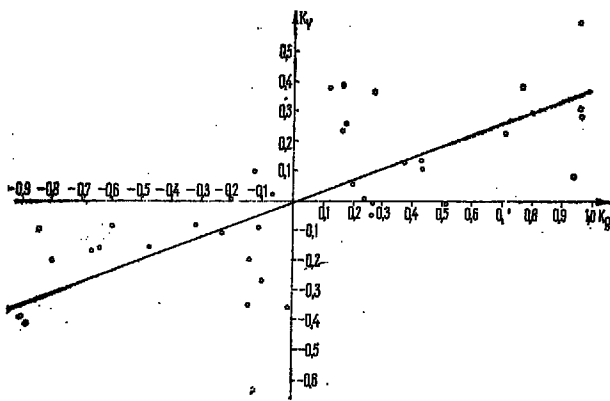
Błąd w wyznaczaniu czasu interwałowego może być w niektórych przypadkach, dość znaczny. Jest to spowodowane najczęściej zanikiem pierwszych faz sygnału (cycle skipping) (9). Zjawisko to występuje głównie w szczelinowatych i kawernistych częściach otworu wiertniczego. Pierwszy impuls, biegnący w tych odcinkach jest dostateczny aby uruchomić bliższy odbiornik, ale może się okazać za słaby do włączenia drugiego rejestratora. Jeżeli drugi odbiornik będzie włączony przez późniejszy impuls, to czas interwałowy ΔT okaże się anormalnie wydłużony, a tym samym prędkość wyznaczona na podstawie ΔT będzie zaniżona. Wyznaczona prędkość z profilowania akustycznego w znacznym stopniu (przynajmniej w niektórych przypadkach) różni się od prędkości określonej metodą pionowego profilowania sejsmicznego. Prace prowadzone w kierunku wyjaśnienia powodów tych rozbieżności (2, 5, 8) pozwalają na sformułowanie szeregu wniosków. Jedną z podstawowych przyczyn niezgodności wyników obu metod jest wpływ strefy przyodwiertowej na wskazania profilowania akustycznego.

Jak wiadomo, podczas procesu wiercenia otworu wiertniczego oraz po jego odwierceniu warunki równowagi panujące w otworze zostają poważnie zachwiane. Powstają pewne naprężenia, których rozkład wokół odwiertu warunkuje prędkość rozchodzenia się fali sprężystej, badanej sondą akustyczną. Początkowo po procesie wiercenia powstaje pierścień podwyższonych naprężeń wywołanych reakcją ścian otworu wiertniczego na ciśnienie mas skalnych, leżących w nadkładzie. Pierścieniowi podwyższonych naprężeń odpowiada strefa podwyższonych prędkości wokół odwiertu. W skałach płaskowcowo-ilastych, a więc bardziej plastycznych, rozkład ciśnienia górotworu jest bardziej złożony i zależy od czasu jaki upływa od momentu odwiercenia otworu do momentu pomiaru.

W tym przypadku, pierścień naprężeń powstały tuż po odwierceniu stopniowo rozszerza się, a naprężenia maleją wskutek plastyczności skał. Analogiczny rozkład obserwuje się dla stref podwyższonej prędkości.

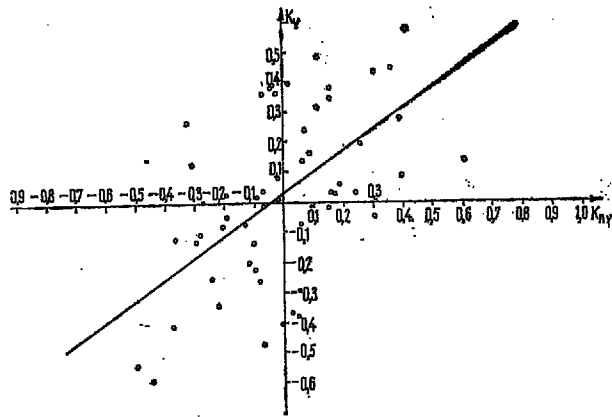
W niektórych skałach powstałe naprężenia po pewnym czasie całkowicie znikają, w innych strefa podwyższonych naprężeń i prędkości pozostaje, ale o dużo mniejszych wartościach i większym zasięgu niż pierwotne. W tych przypadkach, przy dostatecznej długości sondy pomiarowej fala sprężysta refragowana na tym pierścieniu będzie charakteryzować się wyższą prędkością niż przy pomiarach pionowego profilowania sejsmicznego. Taki model rozkładu naprężeń oraz prędkości można zaobserwować wtedy, jeśli rozpatrujemy zmiany prędkości w skale w kierunku maksymalnych naprężeń.

Nieco inny obraz otrzyma się w pobliżu otworu wiertniczego, jeżeli zmiany prędkości w skale określić normalnym naprężeniem działającym w kierunku rozchodzenia się fali sprężystej (7). W takim



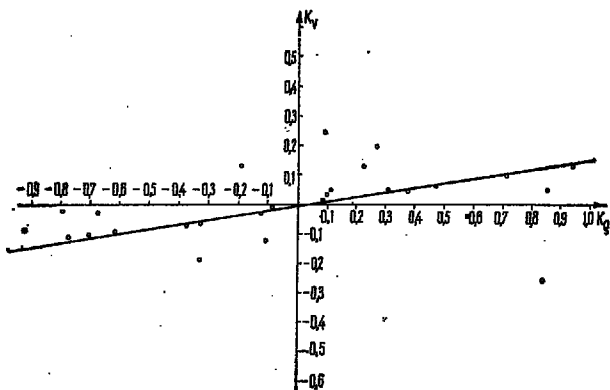
Ryc. 1. Zależność $K_v=f(K_p)$ dla otworu Ba-1.

Fig. 1. Dependence $K_v=f(K_p)$ for Ba-1 borehole.



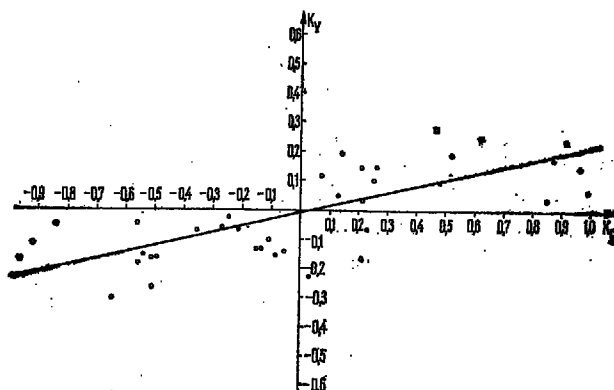
Ryc. 2. Wykres zależności $K_v=f(K_{ny})$ dla otworu Ba-1.

Fig. 2. Dependence $K_v=f(K_{ny})$ for Ba-1 borehole.



Ryc. 3. Wykres zależności $K_v=f(K_p)$ dla otworu Bar-2.

Fig. 3. Dependence $K_v=f(K_p)$ for Bar-2 borehole.



Ryc. 4. Wykres zależności $K_v=f(K_p)$ dla otworu La-1.

Fig. 4. Dependence $K_v=f(K_p)$ for La-1 borehole.

przypadku okazuje się, że prędkość będzie wyrażona tensorem, a więc będzie się zmieniać we wszystkich trzech kierunkach.

Innymi przyczynami, wpływającymi na rozkład prędkości w strefie przyodwiertowej są:

- jej budowa oraz kształt samego odwiertu,
- różnica ciśnień hydrostatycznych płuczki (P_o) i wód złożowych (P_{wz}),
- różnica temperatur cyrkulującej płuczki i ośrodka skalnego.

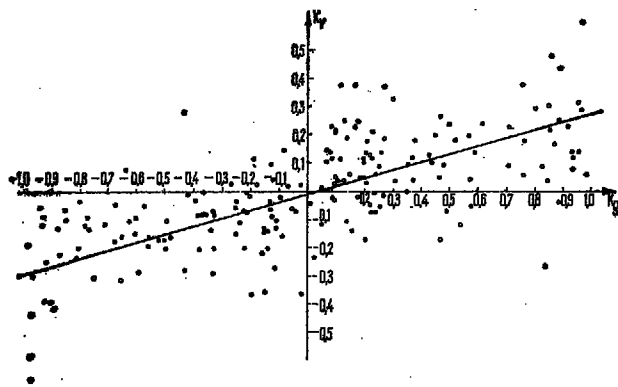
Ad a) i b). Jak wiadomo, średnica odwiertu nie jest jednakowa na całej głębokości. Naprzeciw skał miękkich względnie silnie spękanych tworzą się kawerny, mikroszczeliny oraz wymycia. Niekiedy wskutek pęcznienia łoża następuje także zwięźlenie średnicy. Kawernistość skał oraz ich rozluźnienie mechaniczne powodują znaczne obniżenie prędkości. Przyczyną zmian w pobliżu otworu wiertniczego jest też strefowa budowa ośrodków przepuszczalnych, powstała wskutek różnicy ciśnień hydrostatycznych płuczki (P_o) oraz wód złożowych (P_{wz}). Ponieważ $P_o > P_{wz}$ następuje przenikanie zawartej w płuczce wody do ośrodka skalnego, natomiast cząsteczki ilaste płuczki osadzają się na ścianie otworu wiertniczego tworząc „korek” ilasty, który po pewnym czasie przeciwdziała dalszemu procesowi filtracji. W ośrodku skalnym tworzą się strefy:

- przemyta — zawierająca w przestrzeni porowatej tylko czysty filtrat płuczkowy,
- filtracji — zawierająca mieszaninę filtratu i wody złożowej,
- część niezmienniona warstwy — mająca w przestrzeni porowatej wodę złożową.

Zasięg tych stref zależy także od własności przepuszczalnych ośrodka skalnego. Wpływ poszczególnych stref na wielkość prędkości jest uwarunkowany różnicą prędkości rozchodzenia się fali sprężystej w filtracie płuczkowym i wodach złożowych.

Ad c). Na prędkość w strefie przyodwiertowej ma także dość duży wpływ gradient temperatury w kierunku radialnym na granicy stykającej się płuczki i ośrodka skalnego (2). Przyczyną pojawienia się tego gradientu jest cyrkulacja płuczki w otworze wiertniczym. Płuczka będąc w dolnych częściach otworu, gdzie panuje wyższa temperatura, nagrzewa się, następnie podchodząc do góry ogrzewa masy skalne przylegające do odwiertu, a charakteryzujące się niższą temperaturą. Radialny rozkład temperatur wokół odwiertu powoduje z kolei podwyższenie prędkości mierzonej sondami akustycznymi, w szczególności o małej bazie.

Podane wyżej przyczyny powodujące niezgodność wyników pomiarów prędkości metodami profilowania akustycznego i pionowego profilowania sejsmicznego mogą być w pewnym stopniu wyeliminowane przez odpowiedni dobór sond. Aby uzyskać informacje o niezmiennionej części warstwy, przy najmniejszym wpływie radialnych gradientów naprężeń i temperatur, należy stosować sondy o dwóch odbiornikach (nadajnikach), o dość dużej długości. Oprócz wymienionych czynników, które są związane z wpływem i budową strefy przyodwiertowej bardzo istotną rolę przy pomiarach prędkości V_{PA} i V_{PPS} pełnią: anizotropowość ośrodka oraz różne częstotliwości robocze obu metod.



Ryc. 5. Zbiorczy wykres zależności $K_v=f(K_p)$ dla otworów: Ba-1, Bi-1, Iw-1, La-2, Ż-1.

Fig. 5. Summative diagram of dependence $K_v=f(K_p)$ for boreholes Ba-1, Bi-1, Iw-1, La-2 and Ż-1.

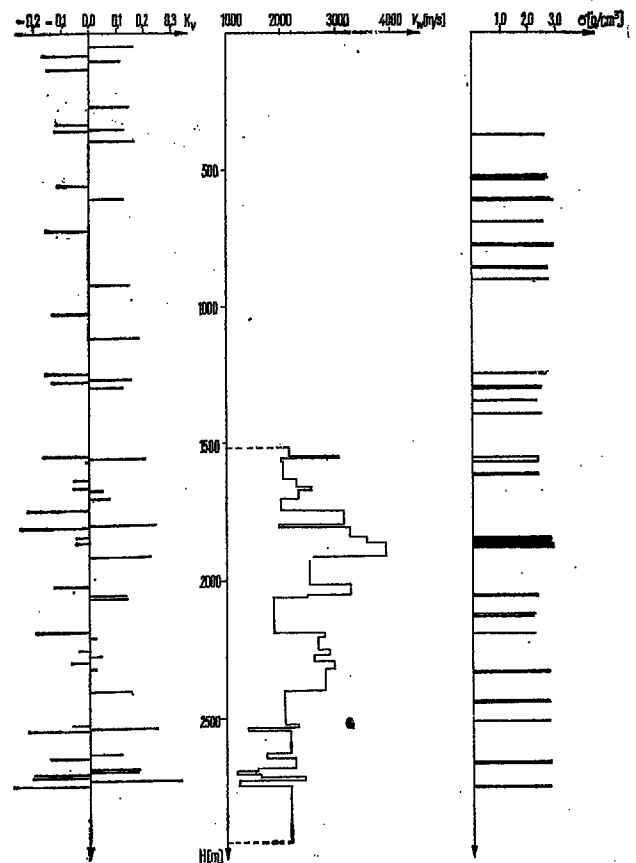
Przy poziomym warstwowaniu ośrodka skalnego pomiary wykonane sondami akustycznymi są niższe od wskazań pionowego profilowania sejsmicznego. Przyczyna tych rozbieżności tkwi w różnym kierunku rozprzestrzeniania się fali sprężystej w obu metodach. W profilowaniach akustycznych fala biegnie prostopadle do uwarstwienia, a więc z najmniejszą prędkością, gdy przy metodzie profilowań sejsmicznych rozprzestrzenia się pod pewnym kątem. Wpływ tego czynnika określony jest stopniem anizotropowości ośrodka oraz kątem padania fali sejsmicznej na powierzchnię sejsmiczną.

Inną, bardzo ważną przyczyną, powodującą omawiane rozbieżności jest różny przedział częstotliwościowy obu rozpatrywanych metod, a tym samym odmienna długość fali sprężystej wykorzystywanej w pomiarach akustycznych i sejsmicznych. Jak wiadomo (2, 5), dla fali sejsmicznej charakteryzującej się dużą długością ośrodek skalny jest na ogół drobnowarstwowy ($\lambda \gg h_i$), natomiast długość fali akustycznej jest niewielka ($\lambda \ll h_i$), a tym samym miąższości warstw są porównywalne, bądź większe od niej. W związku z tym w pionowym profilowaniu sejsmicznym wskutek interferencji fal prostych i odbitych (10), w drobno warstwowanym ośrodku będzie rejestrować się prędkości niższe, zależne także od gęstości ośrodka oraz sprężystych parametrów warstw, gdy w profilowaniu akustycznym prędkość

zależy od $\sum_{i=1}^n h_i$ oraz $\sum_{i=1}^n h_i/V_i$ ($n = 1, 2, 3, \dots$). Jak wi-

dać z przytoczonych rozważań niektóre czynniki wywołują przeciwstawne efekty i prowadzą do zaniżenia, bądź podwyższenia prędkości wyznaczonej jedną metodą w stosunku do drugiej. Jednak pomimo wyszczególnionych rozbieżności między prędkościami rozchodzenia się fal sprężystych określanych z obu metod, wykorzystanie informacji zarejestrowanych przez profilowanie akustyczne, pozwala na bardziej szczegółowe określenie modelu prędkościowego ośrodka, dającego nieporównywalnie pełniejszy obraz charakteru zmian prędkości z głębokością, niż zwykła metoda sejsmiczna. Na podstawie profilowań akustycznych można dokładnie wydzielać warstwy charakteryzujące się kontrastem parametrów sprężystych oraz określać ich współczynniki odbicia. Dane z profilowań akustycznych pozwalają również na dokładne usytuowanie granic horyzontów odbijających wykrytych obserwacjami sejsmicznymi. Obraz falowy profilowania akustycznego stwarza możliwość wydzielenia stref spękanych i szczelinowatych, powodujących silne tłumienie fal sprężystych.

Drugim parametrem występującym we wzorze [1] jest gęstość ośrodka. Ciągły rozkład gęstości z głębokością można uzyskać na podstawie pomiarów profilowania gamma-gamma w otworach wiertniczych. Ze względu jednak na małą ilość tego rodzaju pomiarów wykonywanych w Polsce istnieje trudność



Ryc. 6. Zestawienie współczynników odbicia K_v , prędkości warstwowych V_w oraz gęstości σ dla otworu Bi-1.

Fig. 6. Tabulation of reflection coefficients K_v , layer velocities V_w and density σ for Bi-1 borehole.

w określaniu funkcji $\sigma=f(h)$ w warunkach „in situ”. Uwzględnianie danych laboratoryjnych, dotyczących ciężarów objętościowych (a więc i gęstości), wykonanych na próbkach rdzeni, nie prowadzi do zwiększenia dokładności określanego współczynnika K_v , gdyż otrzymana w ten sposób wartość gęstości nie jest równoważna z gęstością badanej warstwy w warunkach złożowych. Poza tym określane wartości ciężarów objętościowych są wykonywane tylko dla niektórych interwałów i nie mogą być reprezentatywne dla poszczególnych warstw w całym profilu otworu (patrz ryc. 6).

Próby wykorzystania statystycznego rozkładu gęstości (z próbek skalnych) wraz z głębokością w rejonie Monokliny Przedsudeckiej, dla którego określano współczynniki odbicia, nie prowadziły do pożądanego efektów, z powodu trudnych do uwzględnienia zmian facjalno-litologicznych. Z drugiej strony można wykazać istnienie ścisłego korelacyjnego związku między prędkością rozprzestrzeniania się fali i gęstością ośrodka. Badania laboratoryjne prowadzone w kierunku ustalenia powyższych zależności funkcyjnych $\sigma=f(V)$ (1, 3, 6) wykazały o wiele większy wpływ prędkości (3–5 razy) od głębokości na wielkość współczynnika odbicia. Z tego powodu do obliczeń K_v przyjęto stałą wartość gęstości ośrodków ($\sigma = \text{const.}$).

Profilowanie akustyczne wykonywane jest zwykle od pewnej głębokości, co stanowi przeszkodę w określaniu prędkości interwałowej oraz współczynników odbicia od granic leżących płytko. Zagadnienie powyższe można rozwiązać opierając się na korelacyjnej zależności między własnościami sprężystymi skał oraz ich opornością właściwą, a także na związku między natężeniem wtórnego promieniowania gamma (PNG) i prędkością rozchodzenia się fali sprężystej

Nazwa otworu	Współczynnik korelacji liniowej	Równanie regresji liniowej	
		na podstawie PA i PO	Na podstawie PA i PNG
Bi — 1	0,65	$K_p = 0,0037 + 0,1959 K_\sigma$	$K_p = 0,032 + 0,706 K_{ny}$
Ba — 1	0,79 0,57	$K_p = -0,005 + 0,376 K_\sigma$	
Bar — 2	0,54	$K_p = -0,005 + 0,134 K_\sigma$	$K_p = 0,003 + 1,112 K_{ny}$
Iw — 1	0,80 0,84	$K_p = -0,037 + 0,363 K_\sigma$	
La — 1	0,75	$K_p = -0,009 + 0,226 K_\sigma$	
Ż — 1	0,74	$K_p = -0,016 + 0,234 K_\sigma$	
Zbiorezy	0,73	$K_p = -0,01 + 0,28 K_\sigma$	

w ośrodkach. Określając oporność właściwą warstw można obliczyć współczynniki odbicia ze wzoru:

$$K_p = \frac{\rho_l - \rho_{l+1}}{\rho_l + \rho_{l+1}} \quad [4]$$

i analogicznie określając wartość natężenia wtórnego promieniowania gamma dla wydzielonych kompleksów warstw można znaleźć:

$$K_{ny} = \frac{I_{n\gamma_l} - I_{n\gamma_{l+1}}}{I_{n\gamma_l} + I_{n\gamma_{l+1}}} \quad [5]$$

Współczynniki odbicia K_p dla wybranych otworów rejonu monokliny przedsudeckiej obliczono z krzywych oporności pozornej zarejestrowanej sondą gradientową o długości 4,25 m oraz ze sterowanego profilowania oporności. Wykorzystanie tych krzywych do interpretacji było spowodowane bardzo niską opornością płuczki w otworze wiertniczym, która w sposób istotny wpływała na wskazania krótkich sond. W wydzielonych interwałach, jednorodnych pod względem mierzonych własności, określano średnie wartości oporności właściwej oraz średnie wartości prędkości (z krzywej PA).

W analogiczny sposób określano średnie wartości $I_{n\gamma}$ z krzywych profilowań PNG, po uwzględnieniu wpływu tła gamma (z krzywej PG). Podczas interpretacji krzywych PNG i PA oraz oporności pozornych i PA zauważono brak korelacji w pewnych interwałach w odwiercie. Główną przyczyną tego zjawiska było występowanie utworów anhydrytowych, gipsowych i solnych, w których, jak wiadomo, wskazania natężenia wtórnego promieniowania gamma jest uwarunkowane istnieniem wody chemicznie związanej. Inną przyczyną niezgodności krzywych PA, PO i PNG jest zwiększanie się czasu interwałowego ΔT wskutek opuszczania cykli w strefach kawernisto-szczelinowatych.

Dalszym krokiem przy interpretacji było znalezienie związków korelacyjnych, zachodzących między obliczonymi współczynnikami odbicia $K_p = f(K_\sigma)$ oraz $K_p = f(K_{ny})$. Zagadnienie powyższe było rozwiązane za pomocą EMC ODRA-1325. Na wykresach (ryc. 1-4) podano powyższe zależności funkcyjne dla poszczególnych otworów.

Analizując podane przykłady należy podkreślić istnienie dość dobrej korelacji liniowej między K_p oraz K_p i K_{ny} (tab.). Wyliczone współczynniki korelacji dla rozpatrywanych otworów wahały się w granicach od 0,65 do 0,84. Na ryc. 5 przedstawiono zbiorczy wykres zależności $K_p = f(K_\sigma)$ dla otworów

Bi — 1, Ba — 1, Iw — 1, La — 1, Ż — 1. Współczynnik korelacji wynosi 0,73.

Korzystając z wyliczonych równań regresji liniowej dla najwyższych współczynników korelacji w danym otworze można określić wartość współczynników odbicia K_p w interwałach, w których nie było wykonanych pomiarów PA tylko PO lub PNG.

LITERATURA

1. Bireskin W. M. — K woprosu o sootnoszenii między plotnostju porod i skorostju razprastranienija uprugich wołn w nich. W: Sb. Razw. i prom. geofiz. 1963, wyp. 49.
2. Bułatowa Ż. M., Wołkowa E. A., Dubrow E. F. — Akusticzeskij karotaż. Niedra, 1970.
3. Gogonienkow G. N. — Razcziot i primienienije sintieticzeskich siejsmogram. Niedra, 1972.
4. Karus E. W., Saks M. W. — Sopotawlenije riezultatow ultrazwukowego karotaża i siejsmiczeskich nabljudienij. W: Sb: Gieoakustika. Nauka, 1966.
5. Koptiew W. I. — Ultrazwukowej karotaż powierchnostnych pieszczanno-glinistych otkożenij i sopotawlenije jego z dannymi siejsmocarotaża. W: Sb. Razwied. geofizika, 1965, wyp. 9.
6. Pietkiewicz G. I., Werbickij T. Z. — Akusticzeskije issledowanija gornych porod w nieftianych skważinach. Naukowa dumka, Kijew, 1970.
7. Płochotnikow A. N., Dzieban I. P. — Izuczenije wlijanija napražennogo sostojanija na rozprostrowanienije uprugich wołn w skważinach. W: Sb. Fizika ziemi, 1974, nr 1.
8. Wood — Sprawnenije metodow opriedelenija skorostiej w skważinach Jużnogo Teksasa. Tlum. z ang. Problemy siejsmiczeskoj rozwiedki. Gosstop. 1962.
9. Schlumberger — Log interpretation principles. USA, 1969.
10. Iwakın W. N. — O priczinie niżesriednich skorostiej rozprostrowanienija wołn w tonkonieodnorodnych sriedach. W: Sb. Gieoakustika. Nauka, 1966.
11. Dziewoński A. — Obliczanie krzywej prędkości w odwiercie na podstawie danych sondowania elektrycznego. Acta geoph. pol., 1964, vol. 12, no. 1.
12. Gelfand W., Klecan A., Krawczenko D. — Opracowanie wyników badań Grupy Profilowania Akustycznego wykonanych w okresie od XI 1970 do V 1972 r. Dokumentacja PGGN — Toruń.

SUMMARY

This paper presents the method of determination of elastic wave reflection coefficients from the plane litologic boundaries derived from well logs. Differences between results of acoustic loggings and borehole seismic measurements are also considered. This paper gives also correlation relationships between coefficients derived from acoustic loggings and electric loggings and neutron-gamma loggings for some wells from Fore-Sudetic monocline region.

РЕЗЮМЕ

В статье описан метод определения коэффициентов отражения упругих волн на плоских литологических границах раздела, по данным каротажа скважин. Рассмотрено расхождение между результатами акустического и сейсмического каротажа. Определены также корреляционные связи между коэффициентами отражения упругих волн, которые были рассчитаны по данным акустического, электрического и нейтронного гамма-каротажа для некоторых скважин Предсудетской моноклинали.