

WYKORZYSTANIE KIERUNKOWYCH WŁAŚCIWOŚCI FAL AKUSTYCZNYCH DO POMIARU PARAMETRÓW FAL POPRZECZNYCH W OTWORZE WIERTNICZYM

UKD [550.832.44:534.011].04/08

W Polsce nie wykonywano dotychczas pomiarów parametrów propagacji fal poprzecznych w otworach wiertniczych, zwłaszcza w zakresie wyższych częstotliwości. Wiąże się to z trudnym dostępem do miejsca pomiaru oraz złożonym charakterem rozchodzenia się fal akustycznych w otworach wiertniczych.

Opisana niżej metoda umożliwi pomiar parametrów propagacji fal poprzecznych w pewnym zakresie ich prędkości.

Otwór wiertniczy w sprężystym ośrodku skalnym, wypełniony płuczką, jest układem złożonym z dwóch ośrodków ograniczonych, co powoduje, przy emitowaniu w nim energii akustycznej, powstawanie różnych rodzajów podstawowych fal sprężystych oraz drgań wyższych rzędów (1). Przy ograniczeniu rozważań do drgań podstawowych osiowosymetrycznych, o małej długości fali w porównaniu ze średnicą otworu, otrzymuje się rozkład fal — w zależności od ich prędkości rozchodzenia — przedstawiony na ryc. 1 (6). P_1 i P_2 oznaczają tu odpowiednio fale podłużne w cieczy wypełniającej otwór i w górotworze, S — fale poprzeczne w górotworze, R — fale powierzchniowe i St — fale Stoneleya. Rysunek odpowiada przypadkowi, gdy prędkość fal podłużnych i poprzecznych w górotworze jest większa od prędkości fal w cieczy. Przy spełnieniu tego warunku do odbiornika umieszczonego w otworze dochodzą najpierw fale $P_1P_2P_1$, rozchodzące się w górotworze równoległe do osi otworu z prędkością fal podłużnych, a w otworze w postaci fal stożkowych.

Ze względu na odbicia większej części energii fal akustycznych, padających na ścianę otworu, falom $P_1P_2P_1$ towarzyszą zawsze odbicia wielokrotne, których amplitudy, wobec występujących interferencji, mogą być większe od amplitud fal $P_1P_2P_1$. Wielokrotne odbicia maskują początek fal P_1SP_1 , rozchodzących się w górotworze z prędkością fal poprzecznych, i dlatego dokładne określenie czasu ich przyścia i amplitudy jest trudne, a często niemożliwe.

Falom poprzecznym towarzyszą fale powierzchniowe, rozchodzące się po powierzchni otworu z

prędkością nieco mniejszą od prędkości fal poprzecznych. W przypadku małego odstępstwa nadajnik — odbiornik różnice czasów przyścia tych fal są mniejsze od błędów pomiaru. Poza wymienionymi falami w otworze rozchodzą się fale bezpośrednio P_1 oraz fale Stoneleya o prędkości mniejszej od prędkości fal P_1 i zależnej od właściwości sprężystych górotworu.

WYBÓR METODY

Pomiar parametrów propagacji fal poprzecznych in situ można zrealizować przez zastosowanie przetworników dynamicznych emitujących i odbierających wyłącznie fale poprzeczne (8), przez wyodrębnienie fal poprzecznych na zasadzie przesunięcia fazy (9), bądź przez wykorzystanie fal odbitych (10). Wyniki pomiarów, uzyskane za pomocą tych metod, są jednak mało dokładne, szczególnie dla wyższych częstotliwości. Ponadto wprowadzanie tych metod wymaga pokonania wielu trudności technicznych.

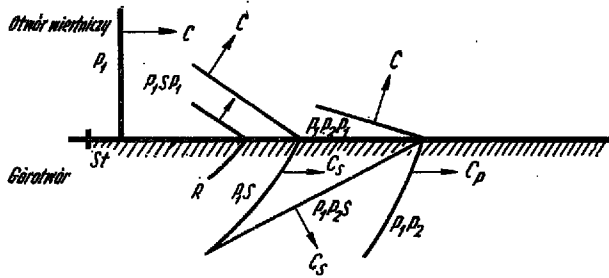
W niniejszej pracy opisano metodę pomiarową, polegającą na wykorzystaniu załamania fal sprężystych na granicy dwóch ośrodków (2). W porównaniu z wymienionymi wyżej daje ona większą dokładność i jest stosunkowo prosta.

FALE NA GRANICY DWÓCH OŚRODKÓW

Dla fal płaskich, padających skośnie z cieczy na granicę ciała stałego i przypadku $C_{P_1} < C_{P_2}$ otrzymuje się fale odbite i załamane: podłużną i poprzeczną, zgodnie z ryc. 2, gdzie C_{P_1} i C_{P_2} oznaczają prędkości fal podłużnych w pierwszym i drugim ośrodku. Prędkości rozchodzenia się fal związane są z ich kierunkami zależnością Snelliusa:

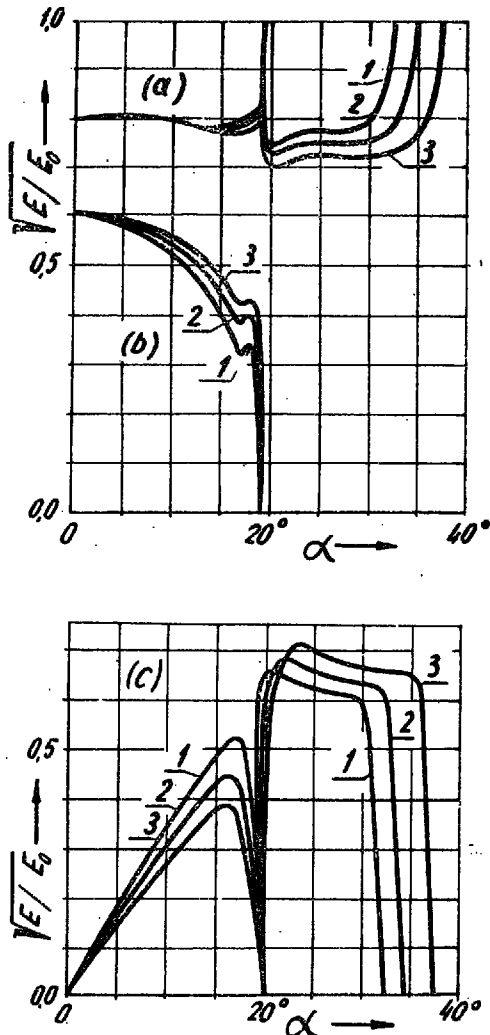
$$\frac{C_{P_1}}{\sin \alpha'} = \frac{C_{P_2}}{\sin \beta} = \frac{C_S}{\sin \gamma}$$

gdzie: α — kąt padania,
 β, γ — kąty załamania fal podłużnych i poprzecznych,
 C_S — prędkość fal poprzecznych w ośrodku stałym.



Ryc. 1. Fale akustyczne rozchodzące się w otworze wiertniczym wypełnionym wodą (R. L. Morris).
 C — prędkość fal akustycznych w wodzie, C_P — prędkość fal podłużnych w górotworze, C_S — prędkość fal poprzecznych w górotworze.

Fig. 1. Acoustic waves propagating in borehole filled with water (after R. L. Morris).
 C — velocity of acoustic waves in water, C_P — velocity of longitudinal waves in rock mass, C_S — velocity of transversal waves in rock mass.



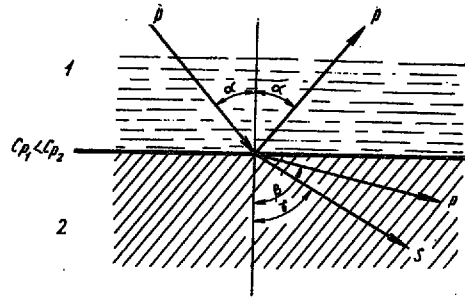
Ryc. 3. Względna wartość energii.

a — fal odbitych; b — fal podłużnych załamanych, c — fal poprzecznych załamanych w funkcji kąta padania (Ergin):

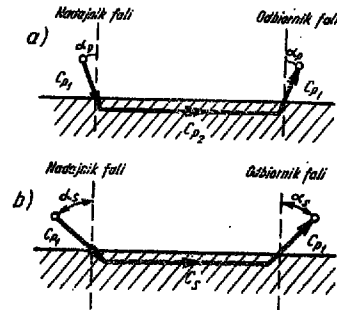
curve	C_{P_2}/C_{S_2}	C_{P_2}/C_{P_1}	ρ_1/ρ_2
krzywa 1	1,6	3,0	3,0
2	1,7	3,0	3,0
3	1,8	3,0	3,0

Relative value of energy.

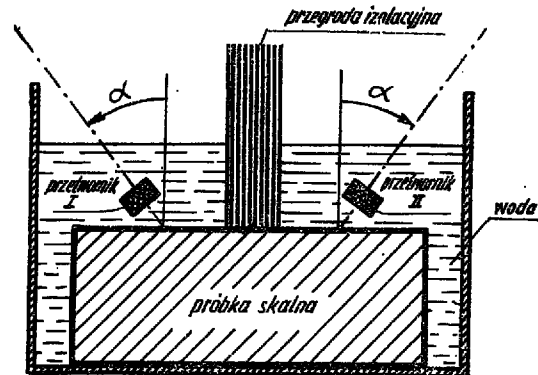
a — reflected waves, b — refracted longitudinal waves, c — transversal waves refracted according to the function of angle of incidence (Ergin).



Ryc. 2. Odbicie i załamanie fal podłużnych padających z cieczy na granicę ciała stałego.
 Fig. 2. Reflection and refraction of longitudinal waves coming from the fluid at the boundary of solid body.



Ryc. 4. Droga refrakcyjnych fal podłużnych (a), droga refrakcyjnych fal poprzecznych (b).
 Fig. 4. Course of refracted longitudinal waves (a) and refracted transversal waves (b).



Ryc. 5. Układ laboratoryjny do badania fal refrakcyjnych.
 Fig. 5. Laboratory set to studies of refracted waves.

Załamane fale podłużne i poprzeczne rozchodzą się w ośrodku drugim tylko w określonym zakresie zmian kąta padania. Kąt padania α , dla którego kąt $\beta = 90^\circ$ jest granicznym kątem załamania, spełnia zależność:

$$\sin \alpha_p = \frac{C_{P_1}}{C_{P_2}}$$

Dla kąta padania większego od α_p fale podłużne ulegają całkowitemu wewnętrznemu odbiciu. W ośrodku stałym rozchodzą się jedynie fale poprzeczne.

Kąt padania, dla którego kąt $\beta = 90^\circ$ jest granicznym kątem załamania fali poprzecznej, spełnia zależność:

Ryc. 6. Obrazy fal akustycznych rozchodzących się w próbce sjenitu dla różnych kątów nachylenia przetworników przy $f = 500$ kHz.

Fig. 6. Images of acoustic waves passing through sample of syenite under various angles of inclination of converters and at $f = 500$ kHz.

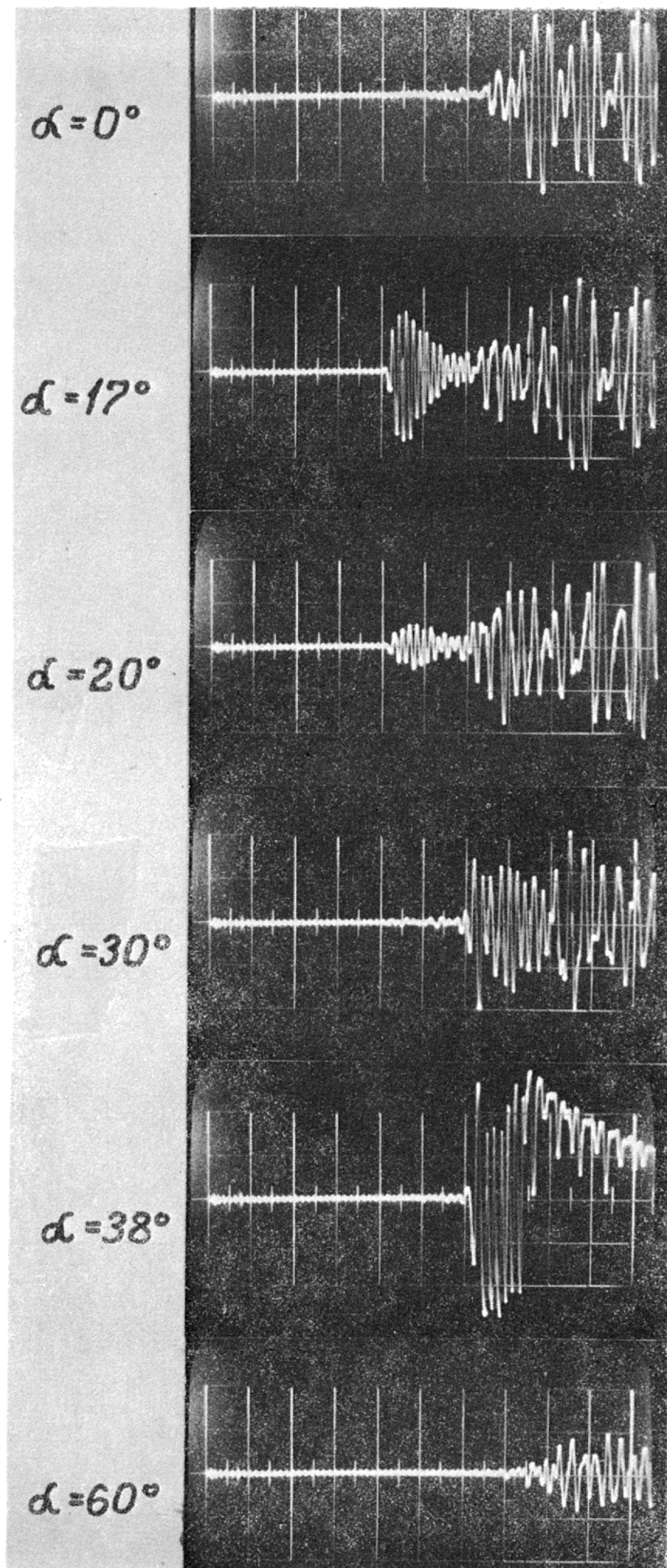
$$\sin \alpha_s = \frac{C_{P_1}}{C_S}$$

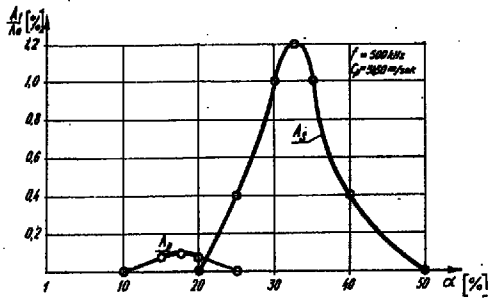
Dla kąta padania większego od α_s energia fal padających nie wnika do ośrodka stałego i przemienia się w energię fal odbitych. Dla ilustracji zjawiska załamania fali akustycznej na granicy woda — skała na ryc. 3 przedstawiono zależność stosunku energii fal odbitych i załamanych od energii fal padających z wody na powierzchnię skały, w funkcji kąta padania (3). Względna wartość energii fal odbitych i załamanych zależy w niewielkim stopniu od liczby Poissona, stosunku gęstości ośrodków i stosunku prędkości fal akustycznych w ośrodkach. Natomiast zależy ona głównie od wielkości kąta padania fal. Dla kątów padania równych lub większych od odpowiednich kątów granicznych maleje ona de zera.

W praktyce fala akustyczna jest w przybliżeniu płaska tylko w obszarze tzw. pola bliskiego przetwornika. W pewnej odległości od przetwornika czoło fali ulega zakrzywieniu wskutek rozbieżności wiązki. Rozwiązanie równania falowego dla przypadku fal kulistych padających z cieczy na granicę ciała stałego, jeśli $C_{P_1} < C_S < C_{P_2}$, daje w wyniku fale czołowe (refrakcyjne): $P_1P_2P_1$; P_1SP_1 ; P_1SP_2 (4, 5, 7, 11). Jeśli odbiornik i nadajnik znajdują się w cieczy, a odstęp r między nimi jest duży w porównaniu z ich odległością h od płaszczyzny granicznej, to do odbiornika dochożą fale $P_1P_2P_1$ i P_1SP_1 w czasie odpowiadającym propagacji wzdłuż dróg, zgodnie z ryc. 4. Kąty padania tych fal równe są odpowiednim kątom granicznym, a ich prędkości rozchodzenia się wzdłuż granicy ośrodków — prędkościom fal podłużnych lub poprzecznych w ośrodku stałym. Czas przejścia fal refrakcyjnych poprzecznych określa zależność (7):

$$t_s = \frac{r}{C_S} + \frac{2h}{C_{P_1}} \sqrt{1 - \left[\frac{C_{P_1}}{C_S} \right]^2} \quad [1]$$

Jak widać, w przypadku prędkości fal poprzecznych mniejszych od prędkości fal w cieczy ($C_S < C_{P_1}$), t_s jest liczbą zespoloną i fale poprzeczne nie rozchodzą się.





Ryc. 7. Zależność stosunku amplitud refrakcyjnych fal podłużnych A_P i poprzecznych A_S rozchodzących się w próbce sjenitu od amplitudy fal padających od wielkości kąta nachylenia przetworników.

Fig. 7. Interdependence between the ratio of amplitudes of refracted longitudinal waves (A_P) and transversal waves (A_S) passing through sample of syenite and the amplitude of incidence waves, and the angle of inclination of converters.

METODA POMIAROWA

Metoda pomiaru parametrów propagacji fal poprzecznych, przedstawiona w niniejszej pracy, polega na wykorzystaniu kierunkowych właściwości fal refrakcyjnych. Odpowiednie nachylenie przetworników do powierzchni ścian otworu powoduje rozchodzenie się w jego otoczeniu fal poprzecznych, a uniemożliwia wytworzenie fal podłużnych.

W celu sprawdzenia praktycznej przydatności metody i opracowania wytycznych konstrukcyjnych odpowiedniej sondy, przeprowadzono pomiary laboratoryjne na różnych próbkach skalnych w układzie przedstawionym na ryc. 5. Nad próbką znajdującą się w wodzie umieszczono dwa przetworniki akustyczne: nadawczy i odbiorczy o regulowanych kątach nachylenia do powierzchni próbki. Pomiary przeprowadzono przy użyciu betonoskopu typ BI-8R-M66, na którego ekranie obserwowano wpływ zmian kąta nachylenia przetworników na wytwarzanie fal podłużnych i poprzecznych w próbce skalnej. Wykonano również pomiary względnych amplitud tych fal w funkcji kąta nachylenia przetworników. Badania przeprowadzono przy częstotliwościach 100, 250 i 500 kHz dla różnych odległości przetworników od próbki oraz kilku odstępów nadajnik — odbiornik.

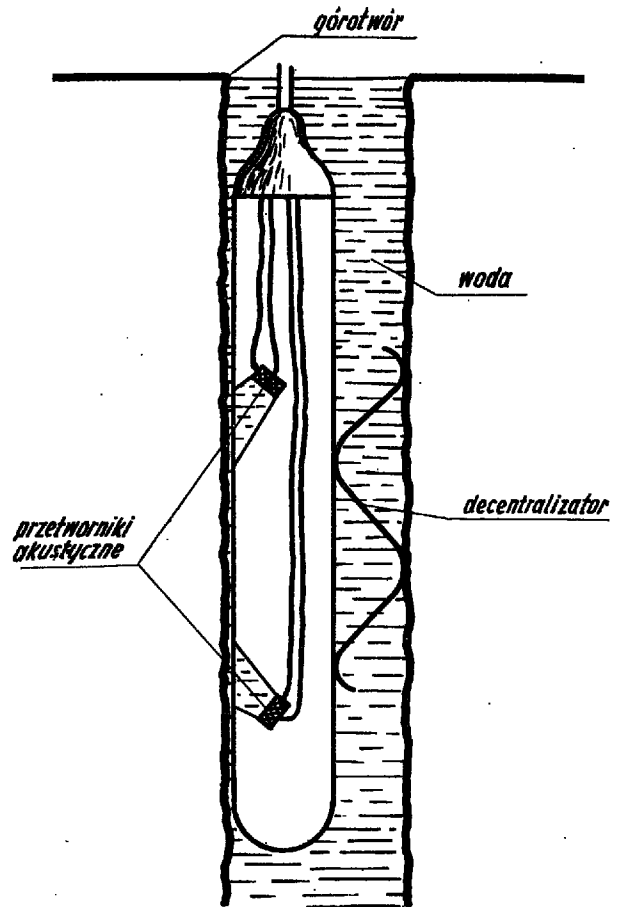
WYNIKI POMIARÓW

Na ryc. 6 przedstawiono przykładowo oscylogramy sygnałów akustycznych dla kilku kątów nachylenia przetworników, z pomiarów wykonanych na próbce sjenitu, przy częstotliwości 500 kHz. Prędkości fal podłużnych i poprzecznych w próbce wynosiły odpowiednio $C_P=5200$ m/s, $C_S=2800$ m/s. Dla kąta padania $\alpha=17^\circ$ widoczne są na oscylogramie fale podłużne na początku sygnału. W miarę zwiększania kąta amplituda ich maleje. Dla kąta $\alpha=38^\circ$ początek sygnału stanowią fale poprzeczne o bardzo dużych amplitudach, które w miarę dalszego zwiększania kąta α maleją.

Ryc. 7 przedstawia zależność stosunków pierwszej amplitudy fal podłużnych i poprzecznych do amplitudy fal padających w funkcji kąta nachylenia przetworników, dla poprzednio wymienionej próbki sjenitu, przy częstotliwości 500 kHz. Odstęp nadajnik — odbiornik wynosił 20 cm, a odległość przetworników od powierzchni próbki — 2 cm. Maksyma amplitud fal podłużnych i poprzecznych odpowiadają kątom granicznym α_P i α_S . Zakresy kątów, dla których powstają fale podłużne i poprzeczne, są funkcją rozbieżności wiązki fal padających oraz wielkości tłumienia w próbce.

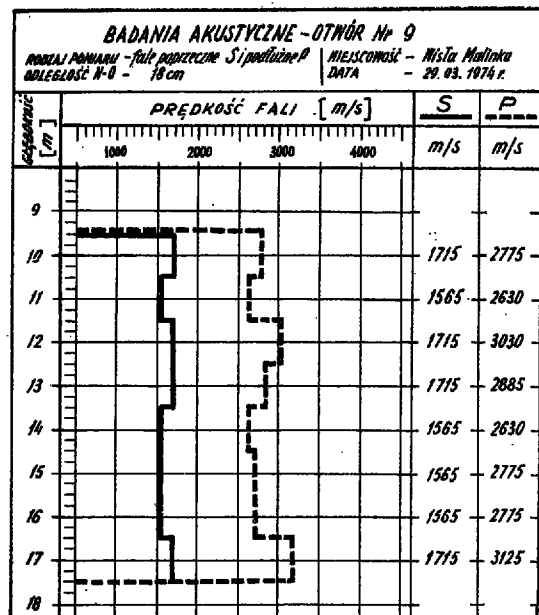
WYTYCZNE KONSTRUKCYJNE DLA PROTOTYPU SONDY

Uzyskane wyniki wskazują na możliwość zastosowania metody do pomiarów w otworach wiertni-



Ryc. 8. Sonda do pomiaru parametrów fal poprzecznych.

Fig. 8. Plummet to the measurements of transversal waves parameters.



Ryc. 9. Wyniki pomiaru prędkości fal podłużnych i poprzecznych w otworze wiertniczym na terenie budowy zbiornika wodnego (Wista — Malinka).

Fig. 9. Results of measurements of the velocity of longitudinal and transversal waves in borehole drilled in the area of construction of Wista-Malinka water reservoir.

czych, przy częstotliwościach 100 — 500 kHz. Zgodnie z przyjętą metodą, sonda pomiarowa powinna zawierać przetworniki akustyczne o osiach nachylonych pod kątem α_s , względem prostopadłej do osi otworu, w celu wytworzenia jedynie fal poprzecznych w górotworze otaczającym otwór. Ze względu na zależność $\alpha_s = \arcsin C_{P_1} : C_S$, kąty nachylenia przetworników powinny być regulowane, stosownie do zmian prędkości fal poprzecznych w górotworze. Okazało się jednak, że można uzyskać zmiany kąta padania i odbioru fal, stosując przetworniki nieruchome o odpowiedniej charakterystyce kierunkowości, promieniające wiązkę fal o określonej rozbieżności. W tym przypadku najmniejszy kąt padania fal w wiązce powinien być większy od największego kąta granicznego dla fal podłużnych. Uzyskanie odpowiedniego kąta padania fal na zasadzie rozbieżności wiązki prowadzi do dużych strat energetycznych, bowiem energia wzbudzanych fal poprzecznych jest wówczas proporcjonalna do niewielkiej części energii fal padających. Jednakże ponieważ energia fali poprzecznej jest większa od energii fali podłużnej, strata ta nie ma większego wpływu na wykorzystanie metody.

PROTOTYP SONDY

Na ryc. 8 przedstawiono schematycznie prototyp sondy przeznaczonej do pomiarów w odwiertach o małych średnicach, do głębokości 100 m. W prototypie zastosowano przetworniki pracujące z częstotliwością 500 kHz. Wybór kąta nachylenia przetworników w sondzie zależy od zakresu mierzonych prędkości fal poprzecznych. Zakres ten w przypadku płytkich otworów wynosi od 1500 m/s do 3500 m/s. Dolna wartość wynika z ograniczenia zastosowania metody do pomiarów w skałach, w których prędkość fal poprzecznych jest większa od prędkości fal w wodzie wypełniającej otwór.

Dla podanego zakresu prędkości fal poprzecznych kąt padania fal na powierzchnię górotworu powinny zmieniać się w przybliżeniu od 25 do 65°. W celu spełnienia tego warunku wykonano 2 prototypy sond z przetwornikami nachylonymi pod kątem 35 i 55°, promieniającymi wiązkę fal o rozbieżności ok. 10°.

Za pomocą zbudowanych prototypów przeprowadzono pierwsze pomiary w otworach wiertniczych na terenie przeznaczonym pod budowę zbiornika wodnego Wisła-Malinka. Ryc. 9 przedstawia przykładowo wyniki pomiaru prędkości fal poprzecznych w zestawieniu z wynikami pomiaru prędkości fal podłużnych uzyskanych konwencjonalną metodą profilowania akustycznego, przy częstotliwości 25 kHz.

WNIOSKI

Głównym składnikiem błędów pomiarowych przedstawionej metody są błędy przypadkowe, spowodowane złym stanem technicznym otworu. Duże zmiany średnicy i nierówna powierzchnia otworu powodują trudności w eliminacji fal podłużnych. W celu właściwego zrealizowania metody pomiarowej sonda musi być dociskana w trakcie pomiaru do ścian otworu, dla zachowania stałej odległości przetworników od powierzchni górotworu oraz utrzymania właściwych kątów padania fal. Do wyznaczania prędkości fal poprzecznych na podstawie wyników pomiaru czasu może posłużyć zależność (1) lub też można wyznaczyć eksperymentalnie poprawkę odpowiadającą czasem przejścia fal przez odcinki w wodzie. Sonda przystosowana jest do współpracy z typową aparaturą ultradźwiękową o wymaganym zakresie częstotliwości (np. betonoskopem).

Omówiona metoda umożliwia wyznaczanie dynamicznych współczynników sprężystości górotworu, otaczającego otwór wiertniczy.

LITERATURA

1. Biot M. A. — Propagation of Elastic Waves Motion in a Cylindrical Bore Containing a Fluid. Journ. App. Phys., 23, 997, 1952.
2. Desbrandes R. — Théorie et Interprétation des Diagraphies, Paris, 1968.
3. Ergin K. — Energy Ratio of the Seismic Waves Reflected and Refracted at a Rock-Water Boundary. Bull. Seism. Soc. Amer., 42, 349, 1952.
4. Ewing W. M., Jardetzky W. S., Press F. — Elastic Waves in Layered Media. New York, 1957.
5. Heelan P. A. — On the Theory of Head Waves, Geophysics, 18, 871, 1953.
6. Morris R. L., Grine D. R., Arkfeld T. E. — Using Compressional and Shear Acoustic Amplitudes for the Location of Fractures, Journ. Pet. Tech., 16, 623, 1964.
7. Strick E. — Propagation of Elastic Waves Motion from an Impulsive Source along a Fluid/Solid Interface, II Theoretical Pressure Response, III The Pseudo-Rayleigh Wave, Trans. Roy. Soc. London, 251, 1000, 1959.
8. U.S.A. Patent 3213358.
9. U.S.A. Patent 2943694.
10. U.S.A. Patent 2825044.
11. Wolf A. — The Amplitude and Character of Refraction Waves. Geophysics, 1, 319, 1936.

SUMMARY

The parameters of transversal waves propagation belong to the group of petrophysical properties which have not been studied in Poland up to now. Propagation of acoustic waves in the borehole and at the boundary of two media is discussed. A method of measurement of the parameters of transversal waves propagation in boreholes is proposed. Its applicability was verified on rock samples under laboratory conditions. The results of the laboratory tests were used for construction of prototypes of a plummet. The prototypes constructed were tested in shallow boreholes. The results obtained are presented in the paper; some measurement errors found may be explained by an inadequate preservation of the boreholes. Propositions concerning some changes in the procedure that would make it possible to reduce the errors are given, and the method of estimating the velocities of transversal waves is discussed.

РЕЗЮМЕ

Параметры распространения поперечных волн принадлежат к группе геофизических параметров, которая до сих пор в Польше не исследовалась. В статье рассматриваются условия распространения звуковых волн в буровой скважине и на границе двух сред. Предлагается метод определения параметров распространения поперечных волн, проверенный на образцах пород в лабораторных условиях. На основании проведенных замеров определены принципиальные основы для прототипа зонда. Были созданы два экземпляра такого зонда, которые испытывались в неглубоких буровых скважинах. Приведены результаты испытаний. Констатируется, что основная причина погрешностей в измерениях обусловлена плохим состоянием скважин. Предлагаются способы уменьшения погрешностей и способ определения скорости поперечных волн.