

HENRYK LINOWSKI

Przedsiębiorstwo Poszukiwań Geofizycznych

WYZNACZANIE ZA POMOCĄ BADAŃ AKUSTYCZNYCH WSPÓLCZYNNIKÓW SPRĘŻYSTOŚCI, MIĄSZSZOŚCI STREFY ZWIETRZENIA I SPEKANIA SKAŁ

UKD 624.131.25:550.834:[552.1:539.31+551.311.231+551.252]

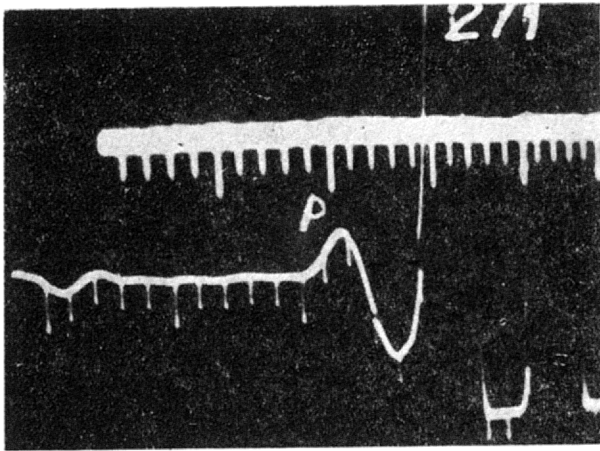
Akustyczna metoda badań skał znalazła szerokie zastosowanie w rozwiązywaniu wielu zadań z geologii inżynierskiej i hydrogeologii, zwłaszcza do wydzielenia w profilach otworów wiertniczych skał różniących się własnościami litologicznymi, jak określenie jakości cementacji skał, badanie szczelności przesłony cementacyjnej dla zapór i zbiorników wodnych, badanie szczelności płaszczu mroźniowego szybów w kopalniach, badanie jakości zacementowania rur okładzinowych w odwiertach itp.

Niniejszy artykuł dotyczy badania i wydzielenia skał spękanych oraz zwietrzałych, a w szczególności badań strefy blokowego zwietrzania podłoża przedczwartorzędowego oraz badania stref skał naruszonych wokół wyrobisk górniczych. Wyniki prac wskazują na przydatność zastosowania metody akustycznej do rozwiązywania wymienionych wyżej zadań.

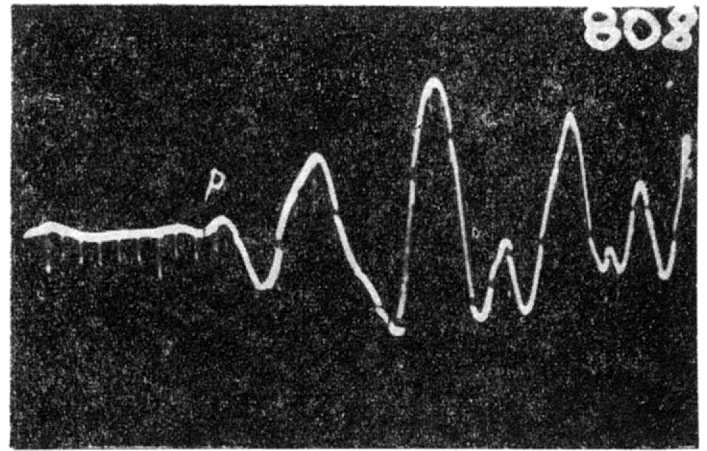
Pomiary wykonywano za pomocą aparatury „Petrooskop” P-11GI, zbudowanej w Instytucie Podstawo-

wych Problemów Techniki PAN. Umożliwia ona pomiar prędkości rozchodzenia się i tłumienia względnego fal akustycznych wzdłuż otworów wiertniczych lub pomiędzy nimi. Pomiary dokonywane są nie w sposób ciągły, lecz dyskretny.

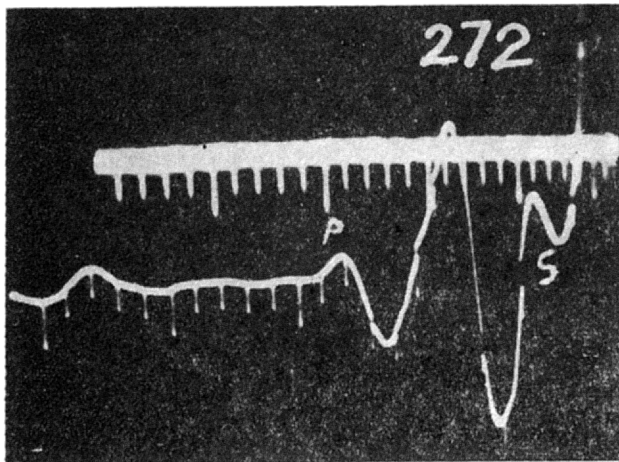
Zakres częstotliwości mierzonych fal akustycznych wynosi 2 — 25 kHz, zakres pomiaru czasu przejścia fali akustycznej wynosi od 4 do 10 μ s, całkowite wzmocnienie sygnałów akustycznych około 100 dB, dokładność pomiaru czasu przejścia fali — 5%, zaś tłumienia względnego 20%. Przebiegi fal są obserwowane na oscyloskopie i fotografowane. Sonda nadawcza posiada nadajnik iskrowy o maksymalnej mocy w impulsie 100 kW, zaś odbiorcza zaopatrzona jest w odbiornik piezoelektryczny. Charakterystyki kierunkowości sond są kołowe. Średnica każdej sondy wynosi 35 mm. Pomiary mają być wykonane tylko w otworach wypełnionych wodą.



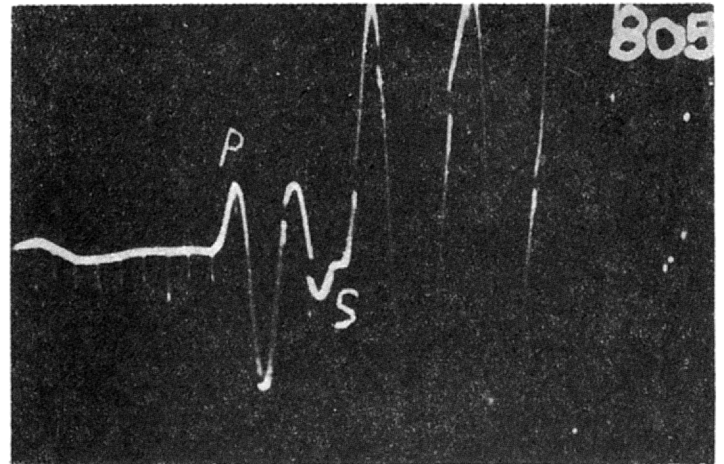
a



c



b



d

Ryc. 1. Oscylogramy fal podłużnych (P) i poprzecznych (S).

Fig. 1. Oscillograms of longitudinal waves (P) and transversal waves (S).

BADANIE STREFY SPEKANIA SKAŁ W PODŁOŻU

Do badania i wydzielenia stref skał spekniętych oraz zwietrzałych w podłożu zastosowano metodę profilowania otworowego (nadajnik i odbiornik w tym samym otworze). Wielkość kroju pomiarowego (a) przyjmowano zależnie od przyjętej odległości między nadajnikiem a odbiornikiem (l) oraz od ilości pokryć danego odcinka profilu otworu pomiarami akustycznymi (m), co można wyrazić wzorem:

$$a = \frac{l}{m} \quad [1]$$

Przy czym $l \geq l_{min}$

$$l_{min} = 2h \sqrt{\frac{\vartheta + \vartheta_h}{\vartheta - \vartheta_h}} \quad [2]$$

gdzie l_{min} — najmniejsza odległość między nadajnikiem i odbiornikiem, przy której obliczona prędkość reprezentuje w przeważającym stopniu nienaruszony ośrodek wokół otworu;

h — odległość od roboczej powierzchni elementu sondy do granicy strefy naruszonej;

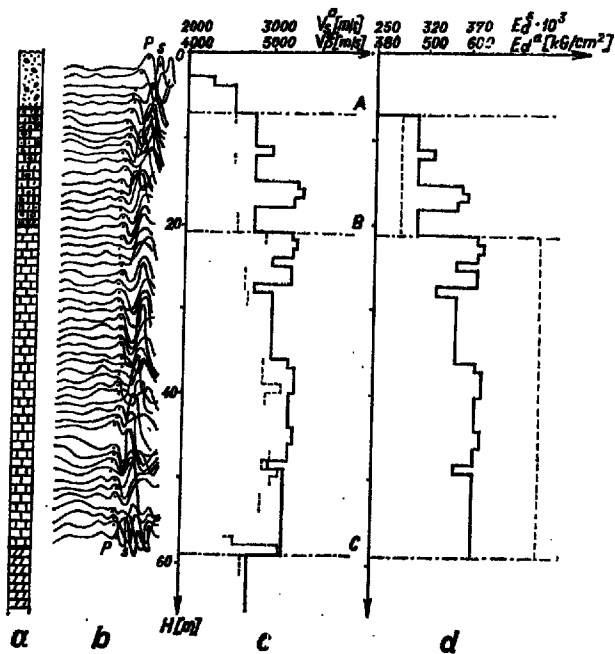
ϑ — prędkość w skale niespekanej (nienaruszonej);

ϑ_h — prędkość w skale naruszonej.

Krotność pokrycia danego odcinka pomiarowego przyjmuje się zależnie od wyrazistości rejestrowanych fal i wymaganej dokładności pomiarów. Na danej głębokości fotografowano przebieg impulsów obserwowanych na lampie oscyloskopowej. Na ryc. 1 przedstawiono uzyskane oscylogramy, na których przede wszystkim wydzielono wejścia fal podłużnych. Na niektórych zapisach można było z dużą pewnością określić pojawienie się fal poprzecznych. Na ogół fale poprzeczne były silnie zakłócone dalszymi fazami fal podłużnych. Dobierając odpowiednio niski stopień wzmocnienia można było uzyskać dostatecznie wyraźną amplitudę fali poprzecznej.

Oscylogramy posłużyły do wyznaczenia prędkości fal akustycznych P i S, które zestawiono w postaci wykresów w profilu otworu. Następnie obliczono na podstawie znanych wzorów wartości współczynników sprężystości (moduł Younga i współczynnik Poissona).

Na ryc. 2 przedstawiono wyniki badań metodą profilowania w otworze wiertniczym dla rejonu projektowanej zapory w Czorsztynie — Niedzicy. Na wykresach tych wyraźnie zaznaczają się następujące granice: A — granica między nadkładem utworzonym z luźnych utworów (aluwia, zwietrzelina), a podłożem wapiennym; B — granica w podłożu wapiennym między strefą blokowego zwietrzenia a skalą niespekąną. Na podstawie obserwacji rdzeni wiertniczych trudno jest określić jej występowanie. Istnienie strefy blokowego zwietrzenia można wytłumaczyć większym stopniem spekania skał. Potwierdzają jej istnienie wyniki badań wodochłonności; niekiedy występują w



Ryc. 2. Profilowanie akustyczne w otworze wiertniczym.

a — profil geologiczny otworu wiertniczego, b — zarejestrowane przebiegi fal na wybranym odcinku otworu, c — wykresy prędkości, ——— V_p^a prędkość akustycznej fali podłużnej, ——— V_p^s prędkość akustycznej fali poprzecznej, d — wykresy dynamicznych modułów Younga, ——— E_d^a dynamiczny moduł Younga wyznaczony z pomiarów akustycznych, ——— E_d^s dynamiczny moduł Younga wyznaczony z pomiarów sejsmicznych. A, B, C — granice wg danych z pomiarów sejsmicznych.

Fig. 2. Acoustic velocity logging in a bore hole.

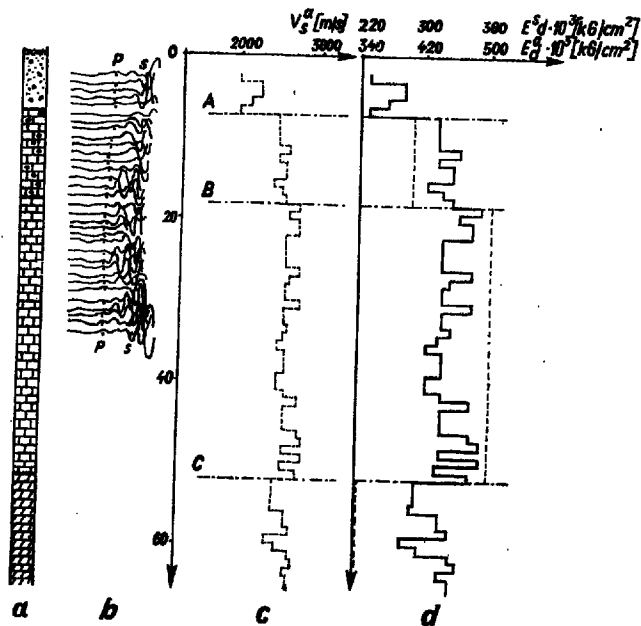
a — geological section of a bore hole, b — wave course recorded along a part of the bore hole, c — velocity diagrams, ——— V_p^a velocity of acoustic longitudinal wave, ——— V_p^s velocity of acoustic transversal wave, d — diagrams of Young's dynamic moduluses, ——— E_d^a — Young's dynamic modulus calculated from acoustic velocity logging, ——— E_d^s — Young's dynamic modulus calculated from seismic surveys. A, B, C — boundaries according to seismic surveys.

tej strefie rdzawe naloty związków żelaza; C — granica rozdzielająca wapienie od margli.

Wyniki badań akustycznych zostały porównane z danymi profilowania sejsmicznego. Przedstawione dane wskazują na dużą zgodność danych sejsmicznych z danymi pomiarów akustycznych przy określaniu poszczególnych granic. Natomiast prędkość fal i odpowiadające im parametry sprężystości różnią się wartościami ze względu na występowanie zjawiska dyspersji fal. Na ryc. 3 przedstawiono wyniki badań w innym otworze. Przykład ten jest dość interesujący z powodu trudności obserwacji fali podłużnej, charakteryzującej się tak małą amplitudą, że nie można jej było dokładnie wyznaczyć. Natomiast nie było trudności w wyznaczaniu fali poprzecznej. Dla tego przykładu zostały obliczone wartości modułu Younga przy założonej z góry wartości współczynnika Poissona.

BADANIA MIĄSZSOCI STREFY SKAŁ NARUSZONYCH I ROZKŁADU WSPÓŁCZYNNIKÓW SPRĘŻYSTOŚCI W OTOCZENIU WYROBISK GÓRNICZYCH

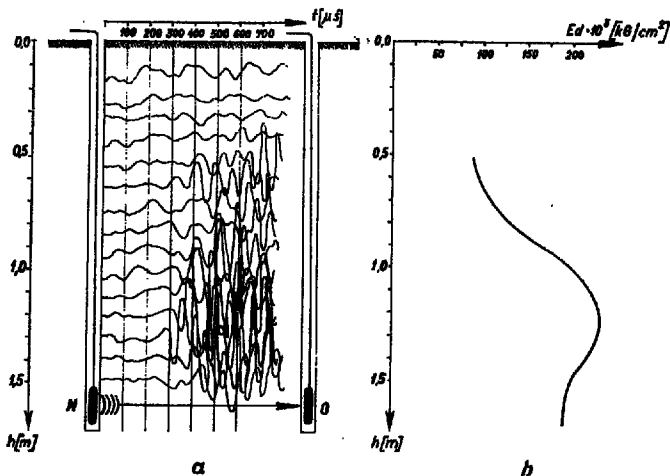
Do wykonania pomiaru potrzebne są minimum dwa otwory, w jednym umieszcza się sondę nadawczą, a w drugim odbiorczą. Pomiaru prędkości i amplitudy fali można dokonywać w dwojaki sposób: albo przesuwać jednocześnie obie sondy w otworach lub jedna sonda jest przesuwana, zaś druga pozostaje



Ryc. 3. Profilowanie akustyczne w otworze wiertniczym.

Objaśnienia jak na ryc. 2.

Fig. 3. Acoustic velocity logging in a bore hole. Explanations as in Fig. 2.



Ryc. 4. Profilowanie akustyczne między dwoma otworami.

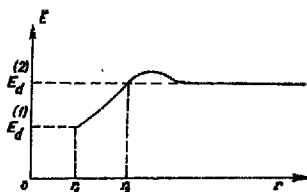
a — schemat pomiarowy i zapisy fal akustycznych, N — nadajnik, O — odbiornik, b — wykres wartości dynamicznego modułu Younga (E_d) w zależności od odległości od spągu sztolni.

Fig. 4. Acoustic velocity logging between two bore holes.

a — measuring scheme and recording of acoustic waves, N — transmitter, O — receiver, b — diagram of the value of Young's dynamic modulus (E_d) depending upon the distance from the bottom of the gallery.

nieruchoma. Stosowano pierwszy sposób. Pomiaru były wykonywane w sztolni. Na ryc. 4 przedstawiono zapisy fal oraz obliczone wartości E_d .

Uzyskane wyniki potwierdzają znany fakt, że wokół wyrobisk występuje strefa spękań i naprężeń powstała wskutek prowadzenia robót strzałowych



Ryc. 5. Sposób wyznaczenia granicznych wartości E_d i miąższości stref naruszonych powstałych w wyniku robót górniczych i ciśnienia górotworu.

$r < r_1$ — skała mocno naruszona (spękana), $r_1 < r < r_2$ — skała mało spękana, $r_2 < r$ — skała nienaruszona, $E_d(1)$ — moduł w strefie spękanej (naruszonej), $E_d(2)$ — moduł w strefie nienaruszonej.

Fig. 5. Mode of determination of limiting values E_d and of thickness of disturbed zones formed due to mine workings and rock massif pressure.

$r < r_1$ — strongly disturbed (cracked) rock, $r_1 < r < r_2$ — slightly fissured rock, $r_2 < r$ — undisturbed rock, $E_d(1)$ — modulus in the cracked (disturbed) zone, $E_d(2)$ — modulus in the undisturbed zone.

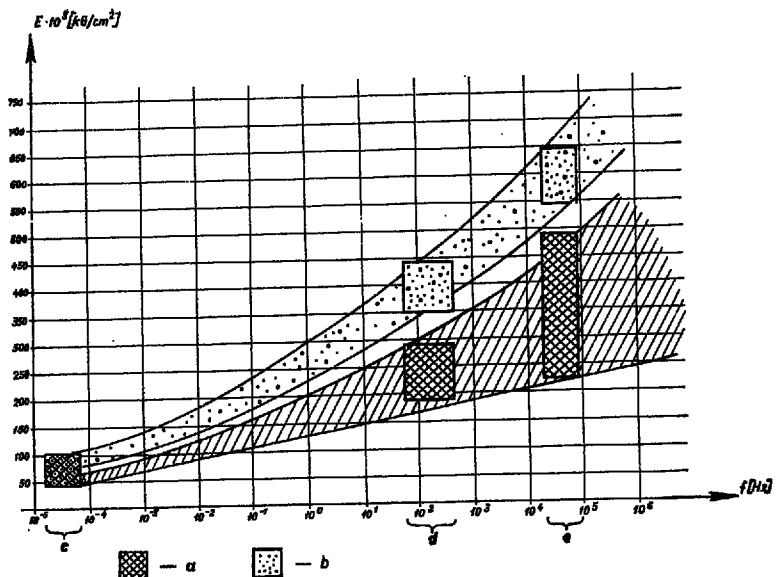
i ciśnienia górotworu. Według tych wyników dynamiczny moduł YOUNGA poza strefą, w której występuje tak silne tłumienie fal, że w ogóle ich się nie rejestruje, stopniowo wzrasta do wartości maksymalnej, a następnie spada (do pewnej stałej wartości). Takie zachowanie się E_d charakteryzuje skały sprężysto-plastyczne, bowiem skały doskonale sprężyste nie posiadają wyraźnego maksimum.

Miąższość strefy naruszonej robotami strzałowymi oraz strefy zaniku fal akustycznych wyznaczono według sposobu przedstawionego na ryc. 5. Miąższość strefy określonej wielkością r_2 dla utworów wapiennych w otoczeniu sztolni o średnicy 1,8 m nie wykazuje dużego zróżnicowania na poszczególnych stanowiskach pomiarowych, gdyż zmienia się w granicach 40 — 90 cm. Natomiast miąższość strefy r_1 , którą przypuszczalnie należy wiązać z bardzo silnym spękaniem skał, wykazuje większe zróżnicowanie, gdyż 10 — 50 cm.

PORÓWNANIE DYNAMICZNYCH MODUŁÓW YOUNGA ZE STATYCZNYMI

Wyniki badań otrzymane przez wielu autorów wskazują na to, że zwykle zachodzi nierówność $E_d > E_s$, natomiast z punktu widzenia teorii sprężystości dla ośrodka doskonale sprężystego, jednorodnego i izotropowego powinna być zachowana równość $E_d = E_s$. Występujące w przyrodzie skały odbiegają własnościami w większym lub mniejszym stopniu od modelu ośrodka doskonale sprężystego, jednorodnego i izotropowego. Przybliżeniem realnie występujących w przyrodzie skał jest model ośrodka reologicznego, charakteryzujący się tym, iż stan naprężenia w danym punkcie ośrodka określa się nie tylko stanem deformacji w danym momencie czasu, ale także zmianą tego stanu w czasie.

Istotna różnica między sposobami wyznaczenia E_s i E_d polega na tym, że czas trwania naprężenia jednego znaku dla badań statycznych jest 10^9 razy dłuższy od odpowiedniego czasu dla fali akustycznej. Stąd właśnie pierwszy moduł nazywa się statycznym, a drugi dynamicznym. Zależność między wartością E a szybkością procesów naprężenia — odkształcenia



Ryc. 6. Porównanie wartości E wyznaczonych przy użyciu różnych metod.

E — moduł Younga, f — częstotliwość, a — skały spękane, b — skały niespękane, c — przedział badań statycznych, d — przedział badań sejsmicznych, e — przedział badań akustycznych.

Fig. 6. Comparison of the values E determined by means of various methods.

E — Young's modulus, f — frequency, a — cracked rocks, b — non-cracked rocks, c — interval of static examinations, d — interval of seismic surveys, e — interval of acoustic surveys.

w trakcie pomiarów, przedstawia ryc. 6. Wykres ten obrazuje zależność E od częstotliwości fali sprężystej lub częstotliwości cykli pomiarowych stosowanych przy badaniach statycznych.

Dane, które posłużyły do sporządzenia tego wykresu dotyczą tego samego ośrodka (wapieni). W przypadku skał spękanych wartości E nie wzrasta tak szybko w miarę wzrostu częstotliwości jak w przypadku skał niespękanych. Wiąże się to z tym, że prędkość fali sprężystej w skałach spękanych podlega silniejszej dyspersji.

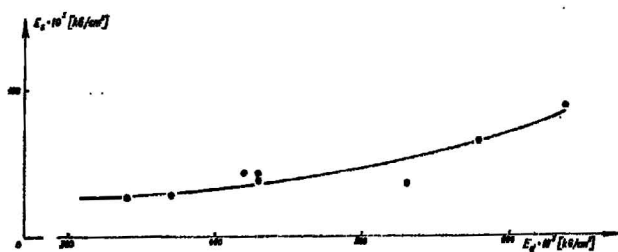
Z punktu widzenia praktycznego wykorzystania E_d konieczna jest znajomość współczynnika przeliczenia E_d na wartość E_s . Stosowane są dwa sposoby przeliczenia bądź sprowadzania modułu E_d do wartości E_s . Pierwszy polega na bezpośrednim porównaniu wartości E_d z wartościami E_s uzyskanymi z badań wykonanych na tych samych stanowiskach pomiarowych. Dla wapieni w rejonie zapory Czorsztyn-Niedzica uzyskano zależność, którą przedstawia wykres na ryc. 7. Wartości E_d zostały przyjęte według sposobu przedstawionego na ryc. 5, tj. $E_d = E_s$ [2]. Wartości E_s zostały określone na podstawie badań K. Thiela (16).

Drugi sposób zredukowania E_d do wartości E_s polega na wykorzystaniu ogólnej zależności $E_s = f(E_d)$. Na podstawie danych eksperymentalnych (11) i rozważań teoretycznych (7) można napisać następujący wzór:

$$E_s = \alpha \left(\frac{E_d}{E_{od}} \right)^{\beta} E_d \quad [3]$$

gdzie E_{od} — wartość modułu dla skał doskonale sprężystych lub wartość maksymalna przyjęta dla danego zakresu rozpatrywanych wartości modułów,

α, β — stałe.



Ryc. 7. Zależność między statycznym (E_s) a dynamicznym (E_d) modułem Younga.

Fig. 7. Dependence between the static (E_s) and dynamic (E_d) Young's moduli.

W. N. Nikitin i A. J. Sawicz (13) przez aproksymację danych eksperymentalnych za pomocą krzywej [3] określili te stałe, a mianowicie:

$$\alpha = 0,97, \quad \beta = 0,141, \quad E_{od} = 1.300\ 000 \text{ kg/cm}^2$$

Dzięki temu można wprost ze wzoru [3] otrzymać wartość E_s , jeśli jest znana wartość E_d .

WNIOSKI

Uzyskane wyniki potwierdzają przydatność zastosowania akustycznej metody do wyznaczania współczynników sprężystości i miąższości strefy zwietrzienia oraz spękania skał. Wartość modułu Younga w strefie spękania dla skał wapiennych była mniejsza od 8–20%, w stosunku do odpowiednich wartości dla skał litych. W związku z tym wydzielenie granic takich stref nie sprawia trudności. Konieczne jest jednak kontynuowanie tych prac dla różnych rodzajów skał, ich wyniki posłużyłyby do uściślenia interpretacji geologiczno-inżynierskiej przy opracowywaniu danych pomiarowych, jak również do uogólnienia wykrytych prawidłowości.

Pomiary akustyczne powinny być wykonywane jako uzupełnienie badań sejsmiczno-inżynierskich. Korzystne jest stosowanie tych metod również ze względów ekonomicznych, gdyż koszt wyznaczenia E za pomocą pomiarów akustycznych jest kilkanaście razy niższy od kosztów badań statycznych dla danego punktu pomiarowego.

Wielkość stosunku E_d/E_s zależy od własności ośrodka i przyjmuje wartości tym większe im wyraźniejszymi własnościami reologicznymi charakteryzuje się ośrodek. Natomiast rozrzut wartości E_d/E_s dla tego samego rodzaju skały przeważnie spowodowany jest tym, iż poszczególni autorzy stosują różne sposoby wyznaczania modułów statycznych. W związku z tym istnieje pilna potrzeba unifikacji sposobu wyznaczania modułów statycznych.

SUMMARY

The present work concerns the use of the geoaoustic method in engineering geology to examine fissured and weathered rocks, particularly to study the zone of block-like weathering of the pre-Quaternary basement, as well as to research the rocks disturbed at the mining areas. Propagation velocity of longitudinal and transversal waves, and values of Young moduli calculated on this basis are parameters that serve to distinguish the zones considered.

Comparative analysis of both dynamic and static Young moduli is made, and methods of converting some moduli into other ones are presented.

LITERATURA

1. Dachnow G. W., Perelman A. L., Rabinowicz G. J., Szczerbakowa T. W. — Laboratorija akustycznego karotaża typu LAK-1. Prikl. geof. 1965, wyp. 43.
2. Gurwicz I. I. — Sejsmiczeskaja razwiedka. Moskwa, 1970.
3. Kołtoński W. — Propagacja fal ultradźwiękowych w skałach i jej praktyczne zastosowanie. PWN, Warszawa, 1959.
4. Kołtoński W. — Nowoczesne zastosowanie akustyki w geofizyce i górnictwie. Prz. geol. 1968, nr 3 i 4.
5. Link H. — Evaluation of Elasticity Moduli of Dam Foundation Rock Determined Seismically in Comparison to those Arrived at Statically. Huitième Congrès International des Grands Barrages. Edinburg, 1964.
6. Linowski H. — Sejsmiczna metoda wyznaczania parametrów sprężystości skał podłoża. Biblioteka AGH, 1968.
7. Linowski H. — Dokumentacja badań sejsmiczno-inżynierskich do projektu podstawowego zapory betonowej ciężkiej na rzece Dunajcu w Czorsztynie-Niedzicy. Arch. PPG, 1969.
8. Linowski H. — On the relation between dynamic and static moduli of elasticity (Younges moduli). Acta geophys. pol. 1969, nr 1.
9. Linowski H. — Instrukcja metodyczno-techniczna badań akustycznych dla potrzeb geologii inżynierskiej. Arch. PPG, 1970.
10. Loginow I. W. — Modelirowanie akustycznego karotaża aparaturą LAK-1. Prikl. geof. 1970, wyp. 58.
11. Masuda H. — Utilization of Elastic Longitudinal Wave Velocity for Determining the Elastic Property of Dam Foundation Rocks. Huitième Congrès International des Grands Barrages. Edinburg, 1964.
12. Piachotnikow A. N. — Primienienije akustycznego karotaża i intierprietacija jego riezultatow. Prikl. geof. 1964, wyp. 38.
13. Sawicz A. I., Kopter W. I., Nikitin W. N., Jaszczenko Z. G. — Sejsmoakusticzeskije metody izluczenija massiwow skalnych porod. Moskwa, 1969.
14. Stilke G. — On Elastic Surface Waves at a Cylindrical Hole in an Infinite Soil. Geoph. Prospecting 1959, nr 3.
15. Thiel K., Linowski H., Łukaszek R. — Etude de la déformabilité d'un massif rocheux hétérogène. 2-ème Congrès International Mécanique des Roches. Beograd, 1970.
16. Thiel K. — Badania własności fizycznych i mechanicznych skał podłoża zapory w Niedzicy. IOMB, Warszawa, 1966.
17. White J. E. — Seismic Waves. New York, 1965.
18. Praca zbiorowa — Geoakustika — Ispolzowanie zwuka i ultra zwuka w sejsmologii i sejsmorazwiedkie i gornom diele. Moskwa, 1966.
19. Praca zbiorowa — Issledowanije gornogo dawlenija geofiziczeskimi metodami. Moskwa, 1967.

РЕЗЮМЕ

Работа касается применения акустического метода в инженерной геологии для целей выявления выветрелых и трещиноватых пород, в частности зон блокового выветривания коренных пород и нарушенных пород вблизи горных выработок. Параметрами, послужившими для определения зон таких пород, были скорости распространения продольных и поперечных волн, а также вычисленные на их основании значения модулей Юнга.

Проведен сравнительный анализ динамических и статических модулей Юнга и представлены способы перевода одних величин модулей в другие.