

## NOWOCZESNE ZASTOSOWANIA AKUSTYKI W GEOFIZYCE I GÓRNICTWIE

### Część II

UKD 550.834:622.241:622.83:622.25/26—194(438)

#### AKUSTYCZNE PROFILOWANIE OTWORÓW WIERTNICZYCH

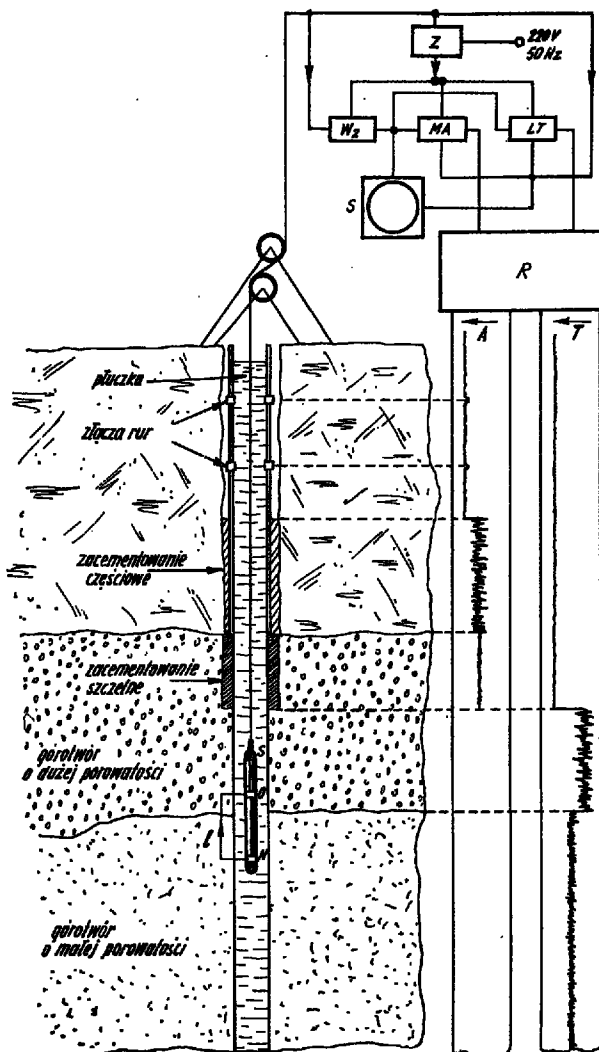
Ujawnione drogą rozważań teoretycznych i eksperymentów zależności sposobu rozchodzenia się fal akustycznych w górotworze od jego właściwości fizyko-mechanicznych znalazły praktyczne zastosowanie przede wszystkim do badania przewierconych warstw ziemi pod względem stopnia ich porowatości oraz stanu nasycenia gazem lub cieczą. Znajomość powyższych cech odgrywa szczególną rolę przy poszukiwaniach ropy naftowej i gazów ziemnych (8). Dlatego też mowa metoda pomiarowa nazwana akustycznym profilowaniem otworów wiertniczych rozpowszechniła się najbardziej w przemyśle naftowym. Metoda ta w najogólniejszym ujęciu polega na ciągłym pomiarze prędkości, a niekiedy i tłumienia względnej fali akustycznej, przechodzącej przez poszczególne warstwy przewierconego górotworu.

Zasadę pomiaru przedstawiono na ryc. 10. Do odwiertu wypełnionego płuczką lub wodą opuszczono akustyczną sondę nadawczo-odbiorczą *S*, połączoną kablem samonośnym *K*, zasilającą sondę i rejestrującą wyniki. Nadajnik *N* sondy wysyła kilkanaście razy na sekundę gasnący impuls fali akustycznej, który po przejściu przez płuczkę i odcinek warstwowy *l* górotworu odbierany jest przez odbiornik *O*. Czas przejścia fali oraz jej amplitudę rejestruje aparatura naziemna połączona kablem z sondą. Dzieliąc ten czas przez odcinek *l* otrzymuje się prędkość fali akustycznej w górotworze. Pomiar wykonywany jest w sposób ciągły, przeważnie w trakcie wyciągania sondy. Również w sposób ciągły rejestrowane są jego wyniki, tzn. czas przejścia fali oraz zmiany jej amplitudy w funkcji głębokości odwiertu (por. wykresy *T* i *A* na ryc. 10). Ten ostatni jest wskaźnikiem zmian tłumienia względnej. Optymalna prędkość przesuwania się sondy w otworze w czasie akustycznego profilowania zawarta jest w granicach od ok. 600 do ok. 800 m/godz.

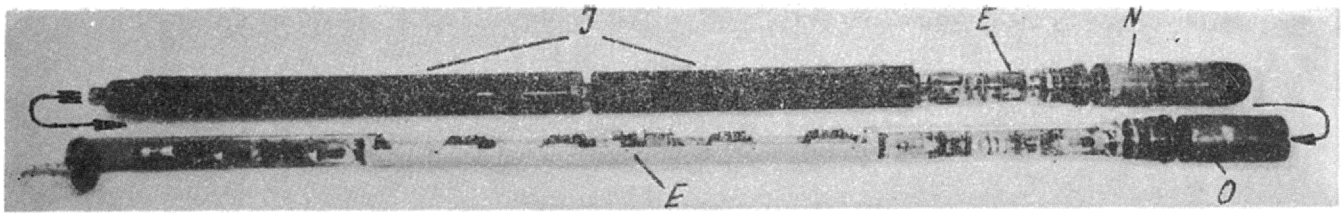
Na ryc. 10, poza samą zasadą pomiaru, pokazano również przykładowo jego wyniki otrzymywane zależnie od warunków panujących w odwiertcie. Tak więc na odcinku odwiertu zarurowanym, lecz niezacementowanym (rozpatrując w dół od powierzchni ziemi) fala akustyczna rozchodzi się w rurze z jednakowego materiału i dlatego prędkość fali jest stała. Jej amplituda nie zmienia się również (bo otoczenie rur jest jednorodne — woda lub powietrze) z wyjątkiem miejsc, gdzie znajdują się złącza rur, powodujące lokalne słumienia fali.

W strefie częściowego zacementowania prędkość w dalszym ciągu jest taka sama, ponieważ warunkuje ją niezmienny materiał rur; natomiast amplituda zaczyna wahać się pod wpływem absorpcji części energii akustycznej przez cement, zależnej od stopnia wypełnienia nim wolnych przestrzeni na zewnątrz rur. Przy szczelnym zacementowaniu tych przestrzeni zjawisko absorpcji ma charakter prawie stały, wobec czego amplituda fali waha się tylko nieznacznie, aczkolwiek jest ona znacznie mniejsza niż na odcinku bez cementu. Widać zatem, że pomiar amplitudy fali akustycznej pozwala kontrolować szczelność zacementowania rur okładzinowych w odwiertach. Praktyka wykazała, że kontrola taka jest jednoznaczna i o wiele dokładniejsza od dotychczas stosowanych.

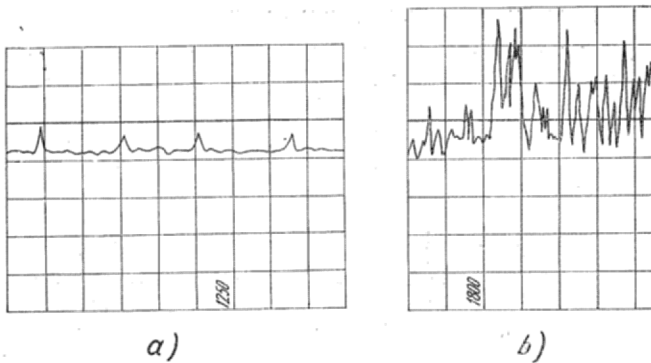
Wspomniane wyżej słumienia amplitudy przez złącza rurowe mogą być również wykorzystane praktycznie do dokładniejszego określania odległości między tymi złączami w przypadku rur z materiałów niemagnetycznych (w rurach stalowych stosuje się do tego celu metodę magnetyczną). W niezarusowanej części odwiertu prędkość fali akustycznej zależy od właściwości górotworu, a przede wszystkim od jego porowatości. Widać to po gwałtownej zmianie charakteru wykresu, towarzyszącej zazwyczaj przejściu sondy z odcinka niezarusowanego do zarurowanego lub odwrotnie. Zarejestrowane wahania prędkości są odzwierciedleniem zmian porowatości zgodnie z omówionymi uprzednio zależnościami (por. cz. I). Niekiedy przy badaniach otworów skalnych wykorzystuje się także pomiar tłumienia, który jak już wyżej wy-



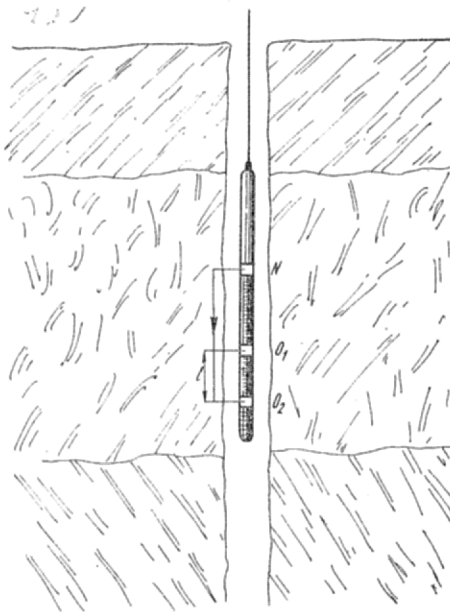
Ryc. 10. Zasada akustycznego profilowania otworów wiertniczych.



Ryc. 11. Polska sonda akustyczna.



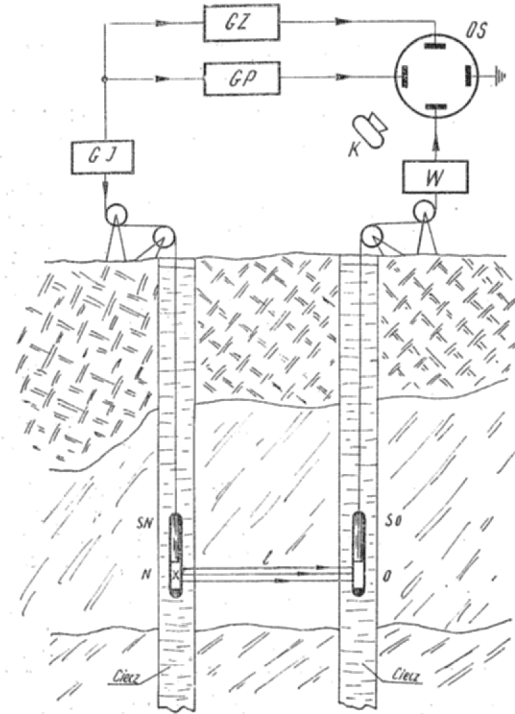
Ryc. 12. Fragmenty oryginalnego zapisu pomiaru akustycznego: a) w otworze niezacementowanym, b) w otworze zacementowanym.



Ryc. 13. Zasada profilowania akustycznego sondą dwuodbiornikową.

jaśniono, wzrasta wraz z porowatością i wobec tego może dostarczać dodatkowych informacji. Ponadto pomiar tłumienia pozwala na wykrywanie obecności gazu ziemnego w płucce, powodującego bardzo silne pochłanianie energii akustycznej.

Pierwszą w Polsce aparaturę do akustycznego profilowania otworów wiertniczych opracowano i zbudowano pod koniec 1964 r. w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN na zlecenie Przedsiębiorstwa Geofizyki Przemysłu Naftowego. Po wstępnym okresie próbnym aparaturę wprowadzono do użytku na skalę przemysłową. Na ryc. 11 pokazano: sondę aparatury (bez obudowy), która zawiera nadajnik magnetostrykcyjny N, wytwarzający falę akustyczną o częstotliwości ok. 20 kHz; odbiornik piezoelektryczny Q; izolator I zapobiegający bezpośredniemu

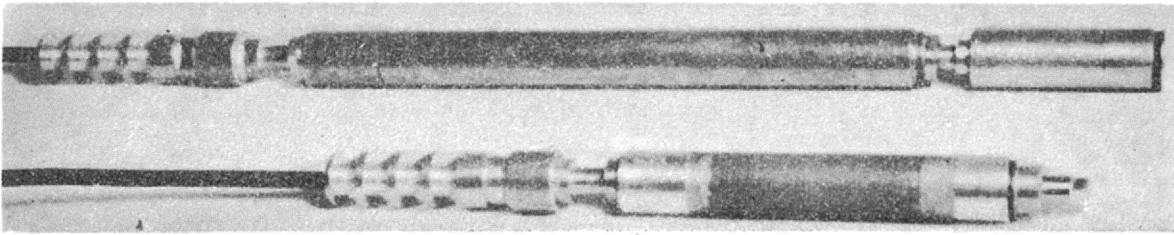


Ryc. 14. Zasada pomiaru akustycznego w wyrobiskach górniczych.

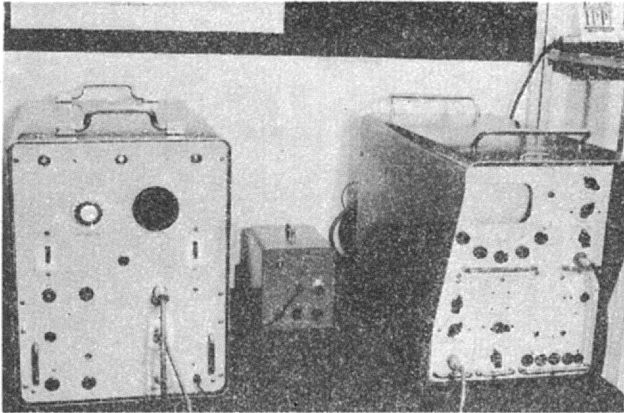
przechodzeniu drgań akustycznych z nadajnika do odbiornika po konstrukcji sondy; układy elektroniczne nadawczo-odbiorcze E oraz niewidoczną na rycinie głowicę kabla samonośnego. Obudowa sondy jest wodoszczelna dla ciśnień do ok. 400 atm, a wszystkie elementy i układy przystosowane do pracy w temperaturze otoczenia sięgającej 100°C. Dzięki temu można nią wykonywać pomiary na głębokości do 3000 m. Średnica zewnętrzna sondy wynosi 90 mm, długość wraz z głowicą — 4780 mm.

Część naziemna aparatury, zawierająca układy zasilające sondę oraz rejestrujące wyniki jest umieszczona w samochodzie pomiarowym. Zasadę działania całości ilustruje schemat blokowy na ryc. 10. Impuls elektryczny wytworzony przez generator sondy powoduje jednoczesne uruchomienie nadajnika N, licznika czasu LT, miernika amplitudy MA oraz wyzwala podstawę czasu synchronoskopu kontrolnego S. Nadajnik N wysyła gasnący impuls fali akustycznej, który po przejściu przez badany odcinek odwiertu jest odebrany przez odbiornik O, a stamtąd już, jako odpowiedni sygnał elektryczny kierowany jest po kablu samonośnym do części naziemnej. Z chwilą przyjęcia tego sygnału ulega wyłączeniu licznik czasu LT, a powstałe w nim napięcie stałe, proporcjonalnie do czasu przejścia fali, zapisane jest przez rejestrator RT. Jednocześnie odbierany jest sygnał (impuls fali akustycznej) ukazujący się na ekranie synchronoskopu, a miernik MA mierzy jego pierwszą amplitudę (lub kilka pierwszych) i — proporcjonalnie do jej wielkości — napięcie przekazuje do rejestratora RA.

W ten sposób zmierzone i zapisane są chwilowe wartości czasu przejścia i amplitudy fali akustycznej.

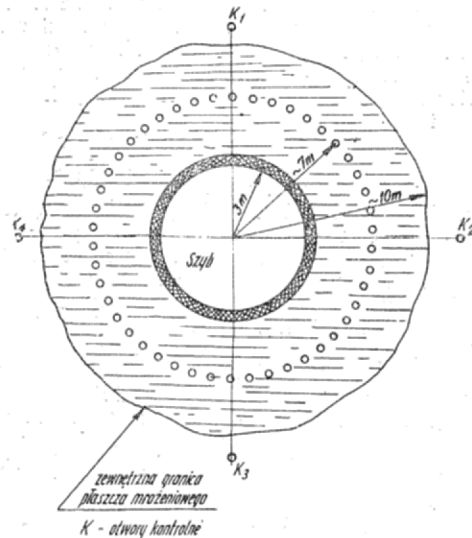


Ryc. 15. Sondy akustyczne do pomiarów w wyrobiskach górniczych.



Ryc. 16. Aparatura naziemna do pomiarów akustycznych w wyrobiskach górniczych.

Ryc. 17. Orientacyjne rozmieszczenie otworów do mrożenia górotworu wokół szybu górniczego.



Ponieważ jednak opisany cykl pracy powtarzany jest kilkanaście razy na sekundę, więc praktycznie otrzymuje się pomiar i zapis ciągły. Również ciągły jest obraz impulsu fali na ekranie synchronoskopu kontrolnego, co stwarza możliwości stałej jego obserwacji, a także fotografowania. Na ryc. 12 przedstawiono fragmenty oryginalnego zapisu pomiaru akustycznego na odcinku otworu niezacementowanego (a) oraz zacementowanego (b).

Omawiany sposób akustycznego profilowania obarczony jest wadą polegającą na tym, że wyniki pomiaru (a szczególnie pomiaru prędkości fali) zależą często w znacznym stopniu od położenia sondy wobec ścianki odwiertu. Jak wynika bowiem z ryc. 10 mierzony jest czas przejścia fali nie tylko przez górotwór lub rurę, lecz również przez dwa odcinki w płucce. Natomiast w obliczeniach uwzględnia się długość drogi jedynie wzdłuż ścianki odwiertu. W otworach o średnicy znacznie większej od średnicy sondy prowadzi to do powstawania sporych błędów, ponieważ prędkość fali w płucce jest znacznie mniejsza niż w rurach lub górotworze. Dociskanie sondy do ścianki odwiertu za pomocą decentralizatorów nie wchodzi w grę, gdyż odbiornik reaguje bardzo silnie na drgania wywołane tarciami i dlatego nawet sonda zaopatrzona musi być w gumowe zderzaki o średnicy nieco większej od obudowy. Zderzaki oraz fakt, że wiele odwiertów ma znaczne odchylenia od pionu wpływają w wielu przypadkach na zmniejszenie błędu pomiaru, albowiem sonda nie porusza się po osi otworu, lecz ślizga po pochyłości ścianki w niewielkiej od niej odległości ograniczonej zderzakami.

W celu całkowitego uniknięcia opisanej wady należy stosować sondę wyposażoną w dwa odbiorniki, umieszczone w pewnej odległości od siebie i przedzielone izolatorem akustycznym (ryc. 13). Za pomocą takiej sondy czas przejścia fali akustycznej mierzony jest jako różnica czasów przejścia od nadajnika do dalszego i bliższego odbiornika. Dzięki temu błędy spowodowane położeniem sondy kompensują się tak dalece, że nawet na odcinkach niezbyt głębokich kątem dokładność pomiaru jest zupełnie wystarczająca.

ca. Aparatura z sondą dwuodbiornikową dla potrzeb naszego przemysłu naftowego budowana jest obecnie w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN.

Kończąc omówienie akustycznego profilowania należy podkreślić, że metoda ta oprócz stwierdzonych już znacznych korzyści kryje w sobie poważne perspektywy dalszego rozwoju. Jako przykład wystarczy wymienić stwierdzone ostatnio możliwości otrzymywania informacji o związaniu cementu z górotworem oraz o strukturze górotworu, znajdującego się w dalszym sąsiedztwie odwiertu na podstawie analizy budowy odbieranego sygnału akustycznego.

#### AKUSTYCZNE BADANIE GÓROTWORU WOKÓŁ SZYBÓW I CHODNIKÓW GÓRNICZYCH

Nieniszczące, a jednocześnie wyprzedzające prace górnicze badanie górotworu zaczyna odgrywać coraz większą rolę przy głębieńiu wyrobisk górniczych. Wieloletnie eksperymenty i badania wykazały, że do tego celu bardzo dobrze nadaje się metoda akustyczna. Stosowanie jej polega na mierzaniu prędkości lub ewentualnie amplitudy fali akustycznej pomiędzy otworami o niewielkiej średnicy, wykonanymi w górotworze z powierzchni ziemi lub też w ścianach wyrobiska. Porównując ze sobą wyniki z rozmaitych punktów pomiarowych oraz zestawiając je z danymi uzyskanymi na próbkach lub też drogą obliczeń (por. cz. I) otrzymujemy informacje o porowatości, stopniu nasycenia cieczą, naprężeniu oraz zamrożeniu górotworu.

Na ryc. 14 przedstawiono zasadę pomiaru. Dwie sondy — jedna nadawcza SN, druga odbiorcza SO — opuszczono na kablach samonośnych do otworów  $O_1$ ,  $O_2$ , między którymi znajduje się górotwór przeznaczony do badania. Dla uzyskania dobrego sprzężenia akustycznego sond z górotworem otwory muszą być wypełnione wodą lub inną cieczą. Na požądanej głębokości sonda SN wysyła impuls fali akustycznej,

który po przejściu przez górotwór jest odebrany przez sondę SO, a następnie przekazywany do aparatury naziemnej, gdzie ulega uwidocznieniu na ekranie oraz zarejestrowaniu fotograficznie. Z fotografii odczytać można czas przejścia fali akustycznej oraz jej amplitudę. Znana odległość między sondami pozwala obliczyć prędkość fali w górotworze. Pomiar przeprowadza się punktowo co jeden lub więcej metrów, zależnie od potrzeb.

W Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN poza studiami teoretyczno-doświadczalnymi nad powyższą metodą — opracowano też i zbudowano kilka typów odpowiednich urządzeń pomiarowych m.in. dla Stacji Badawczo-Doświadczalnej Górnictwa Rud, dla Zjednoczenia Budownictwa Kopalń Rud oraz dla Instytutu Geologicznego. Jedno z tych urządzeń, przeznaczonych do akustycznej kontroli szczelności płaszcz mroźniowego w szybach górniczych, pokazano na ryc. 15 i 16.

Na pierwszym z nich przedstawiono sondę nadawczą (krótsza) i odbiorczą, na drugim aparaturę naziemną. Sonda nadawcza zawiera nadajnik eksplozywny, działający na zasadzie elektrycznego wyładowania iskrowego w cieczy. Wyładowanie to jest źródłem fal akustycznych o szerokim widmie częstotliwości (od ok. 1000 Hz do ok. 25 000 Hz), pozwalającym na uzyskanie wystarczającego zasięgu nawet w ośrodkach o dużym tłumieniu. Zewnętrzna średnica sondy wynosi 35 mm, a długość 430 mm. Sonda odbiorcza wyposażona jest w odbiornik piezoelektryczny oraz wzmacniacz tranzystorowy. Jej średnica wynosi 35 mm, długość 670 mm. W aparaturze naziemnej znajduje się generator impulsów, uruchamiający nadajnik oraz synchronoskop, służący do uwidocznienia odbieranego sygnału akustycznego. Zasadę działania urządzenia wyjaśnia ryc. 14.

Uruchomiony przyciskiem generator GI dostarcza po kablu ładunek elektryczny, powodujący działanie nadajnika N, który wysyła pojedynczy impuls fali akustycznej. Impuls po przejściu przez badany odcinek zamrażanego górotworu dochodzi do odbiornika O, a następnie przekazany jest kablem do wzmacniacza W aparatury naziemnej. W aparaturze tej jednocześnie z zadziałaniem nadajnika N następuje otwarcie obiektywu kamery fotograficznej K oraz start generatorów podstawy czasu GP i znaczników czasu GZ. Pierwszy generator powoduje ruch plamki świetlnej w poprzek ekranu lampy oscyloskopowej, kreślącej oś czasu. Generator GZ, impulsami szpilkowymi, dzieli tę oś na odcinki 20  $\mu$ sek lub 200  $\mu$ sek. Z chwilą nadejścia odebranego sygnału akustycznego plamka świetlna zaczyna kreślić również jego obraz,

## SUMMARY

This report, provided with the introduction which explains the present significance of the problem considered, deals with the theory of propagation of elastic waves in porous rock formations, with various temperatures and various degree of liquid saturation. The theory has been supported by the results of experimental investigations.

The second part, based on the theory presented, concerns the most important modern ways of practical application of acoustic waves for the investigations of rock formations, particularly for the acoustic well logging and acoustic investigations of the rock formations bored in the vicinity of mining shifts.

Moreover, the progress in practical application of these new methods in Poland is discussed, too.

który zarejestrowany zostaje na taśmie światłoczułej przez kamerę przystawioną do ekranu. Po wywołaniu zdjęcia można za pomocą znaczników odczytać czas przejścia fali akustycznej oraz określić w milimetrach jej amplitudę.

Przy akustycznym badaniu płaszcz mroźniowego do opuszczania sond wykorzystywane są w zasadzie otwory, przez które krąży solanka zamrażająca. Rozmieszczenie otworów pokazano w sposób orientacyjny na ryc. 17. Pomiar wykonuje się kolejno między sąsiednimi otworami wzdłuż całego kręgu mroźniowego i na różnych głębokościach. Porównując zmierzone prędkości z wynikami otrzymanymi na próbkach określa się ewentualne miejsca słabiej zamrożone lub w ogóle nie zamrożone (1, 2).

W podobny sposób do opisywanego i za pomocą podobnej aparatury można badać akustycznie porowatość i zwięzłość gruntu dla celów budowlanych.

Jeżeli natomiast chodzi o wykorzystywanie pomiarów akustycznych do badania górotworu wewnątrz wyrobisk górniczych, to różnica polegać może głównie na tym, że otwory dla sond wiercone są w ścianach, pod kątem pozwalającym na wypełnienie otworów wodą.

Przytoczone najistotniejsze przykłady zastosowania akustyki w górnictwie nie wyczerpują tematu, pozwalają jednak zorientować się jakie możliwości ma przed sobą ta nowa, wdrażana obecnie u nas metoda pomiarowo-kontrolna.

## LITERATURA

1. Calikowski R. — Pomiarы in situ własności fizyko-mechanicznych gruntów. III Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących. Warszawa 1966.
2. Calikowski R. — Wykreślenie i numeryczne metody wyznaczania granicy płaszcz mroźniowego szybów. Rudy i Met. nieżel. 1967, nr 1.
3. Kołtoński W. — Propagacja fal ultradźwiękowych w skałach i jej praktyczne zastosowanie. PWN, Warszawa 1959.
4. Kołtoński W. — Badanie niektórych własności strukturalnych górotworu metodą akustyczną. Rozpr. inż. 1965, nr 1.
5. Machowski M., Trutwin W. — Badanie płaszcz mroźniowego z zastosowaniem metod ultradźwiękowych w skał laboratoryjnej; (maszynopis) AGH, Kraków 1965.
6. Pearson S. J. — Handbook of Well Log Analysis. New Jersey, USA, 1963.

## РЕЗЮМЕ

В первой части статьи автор дает вступительное описание современного значения рассматриваемой проблемы и приводит теорию расхождения упругих волн в пористых породах с учетом разных температур и разной степени насыщения растворов. Правильность теории подтверждена результатами

Во второй части, основываясь на представленной теории, автор указывает важнейшие современные методы практического применения акустических волн в исследовании геологических пород, особенно в акустическом профилировании буровых скважин и акустических замерах вблизи горных обвалов.

Кроме того рассматриваются достижения в практическом применении этих современных методов в Польше.