

O MOŻLIWOŚCIACH ZASTOSOWANIA FAL ULTRADŹWIEKOWYCH W GEOLOGII I GÓRNICTWIE

1. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ZAGADNIENIA

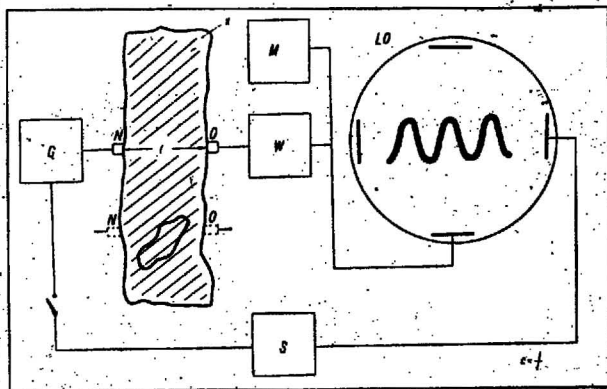
Pomysł zastosowania ultradźwięków w geologii i górnictwie powstał w związku z prowadzonymi przez Zakład Badania Drgań PAN pracami naukowymi nad udoskonaleniem ultradźwiękowej defektoskopii metali. Powyższa metoda zasłużyła sobie na uwagę tym, że stworzyła możliwości dokładnego sprawdzania wewnętrznej struktury żelaznych wyrobów bez uciekania się do przecinania ich lub też do innych niszczących zabiegów. Ale nie tylko przemysł metalowy odczuwa konieczność rozporządzania tego rodzaju środkiem kontrolnym. Poza metalami istnieją bowiem inne ośrodki stałe, których wewnętrzną budowę chcielibyśmy poznać, nie wiercąc ich i nie rozłupując. Do wymienionych zaliczać należy przede wszystkim takie surowce skalne, jak: wapień, piaskowiec, marmur, granit, bazalt jak również złoża soli kamiennej, anhydrytu czy wreszcie węgla kamiennego.

Eksploatacja tych bogactw naturalnych wymagała zawsze i wymaga w dalszym ciągu znajomości dwóch zasadniczych zagadnień. Pierwsze z nich dotyczy wiel-

kości obszaru zajmowanego przez złożę i jego miąższości, drugie zaś — stopnia zanieczyszczenia złoża przez obce, niepożądane ciała. Badaniem tych problemów zajmuje się Instytut Geologiczny oraz resortowe służby geologiczne. Instytucje te opierają swą działalność rozpoznawczą w odniesieniu do skał i złóż kopalnianych bądź na pomiarach wykonywanych mało dokładnymi metodami: sejsmiczną lub akustyczną, bądź też na badaniu próbek zdobytych przez kłopotliwe i kosztowne wiercenia lub roboty górnicze. Niedokładność metod sejsmicznych i akustycznych wynika stąd, że posługują się one falami mechanicznymi o bardzo niskich częstotliwościach, a więc i znacznych długościach. Fale takie, rozchodząc się w badanym ośrodku przeważnie ulegają ugięciu, a odbijają się jedynie od bardzo dużych i wyraźnych przeszkód. Ponieważ zaś obie wymienione metody oparte są na obserwacji fal odbitych, jest więc rzeczą zrozumiałą, że nie może tu być mowy o dużej dokładności rozpoznania. Wiercenia natomiast niszczą ośrodek i dają tylko wówczas wystarczająco dokładne wyniki, jeżeli przeprowadzać się je będzie w małych

odległościach i do właściwej dla badanego złoza głębokości. Z powyższym wiąza się poważne trudności techniczne, a w niektórych wypadkach wiercenia są w ogóle wykluczone (np. w niektórych złożach soli kamiennej występują zbiorniki wypełnione solanką; nieogłędne pędzenie wyrobisk eksploatacyjnych może spowodować zalanie chodników w kopalni). Dlatego też od dłuższego czasu odczuwano potrzebę opracowania nowej metody rozpoznania, dokładniejszej i wygodniejszej w użyciu. Zdobyte ostatnio doświadczenia przy pracy nad defektoskopią metali pozwoliły wynioskować, że właśnie fale ultradźwiękowe mogą w znacznej mierze sprostać tym wymaganiom.

Aby z tego lepiej zdać sobie sprawę, rozpatrzmy krótko zasadę badania niejednorodności metali za pomocą ultradźwięków. Do powyższego celu najczęs-

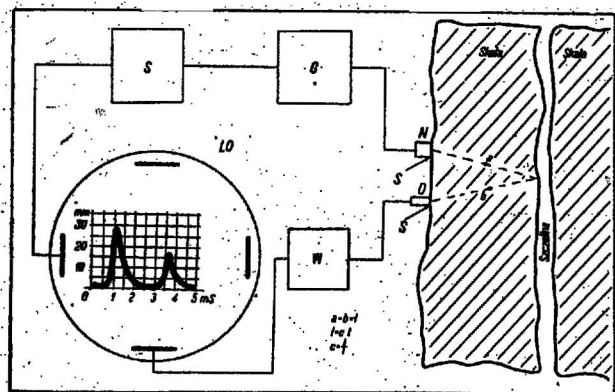


Ryc. 1

Zasada ultradźwiękowej metody prześwietleniowej. G — generator napięć zmiennych, N — nadajnik ultradźwiękowy, O — odbiornik ultradźwiękowy, W — wzmacniacz napięciowy, M — wskaźnik napięcia wyjściowego.

ciej stosuje się metodę prześwietleniową i impulsową. Pierwsza z nich przedstawiona jest schematycznie na ryc. 1. Nadajnik N wysyła falę ultradźwiękową, która po przejściu przez badany przedmiot dociera do odbiornika O, połączonego ze wskaźnikiem amplitudy (naprężeń) fali. Wielkość odebranej amplitudy zależy od tego, czy metal ma strukturę jednorodną czy też zawiera wewnętrzne skazy (pęknięcia, pęcherze powietrza), które powodują częściowe odbicie fal w kierunku nadajnika. Przesuwając zatem nadajnik i odbiornik wzdłuż przedmiotu oraz obserwując na wskaźniku zmiany amplitudy odebranych fal — można stwierdzić obecność ewentualnych skaz oraz ich rozmieszczenie.

Druga metoda impulsowa (ryc. 2) polega na wysyłaniu w głąb badanego metalu krótkotrwałych impulsów ultradźwiękowych, które po odbiciu się od przeciwległej powierzchni przedmiotu lub też od napotkanej po drodze przeszkody w postaci wewnętrznej skazy metalu trafiają do odbiornika połączonego z lampą oscyloskopową. Uwzględniając odczytane na oscyloskopie przesunięcie czasowe między impulsem nadanym i odebrany oraz szybkość rozchodzenia się fali ultradźwiękowej w danym metalu, można określić odległość przeszkody oraz jej położenie względem miejsca nadawania i odbioru. Warto podkreślić, że przy użyciu dostatecznie krótkich fal mogą być wykrywane skazy nawet o bardzo małych wymiarach (rzędu milimetrów). Jak więc widać, opisane wyżej metody w odniesieniu do metali gwarantują dużą dokładność oraz stosunkowo prostą manipulację przy pomiarach. Powstało pytanie, w jakim stopniu zalety te dadzą się zachować przy zastosowaniu fal ultradźwiękowych do badania ośrodków geologicznych? Odpowiedzi na to dostarczyły właśnie prace zainicjowane przez Zakład Badania Drgań PAN.



Ryc. 2

Zasada metody ultradźwiękowej, impulsowej. G — generator impulsów elektrycznych, N — nadajnik ultradźwiękowy, O — odbiornik ultradźwiękowy, W — wzmacniacz napięciowy, LO — lampa oscyloskopowa, X — badany ośrodek, S — układ synchronizujący.

2. ANALIZA WARUNKÓW ROZCHODZENIA SIĘ FAL ULTRADŹWIEKOWYCH W OŚRODKACH GEOLOGICZNYCH

Zakres, w jakim zrealizowana może być w praktyce metoda zarówno prześwietleniowa, jak i impulsowa, zależy głównie od następujących czynników:

- a) prędkości rozchodzenia się fal ultradźwiękowych w danym ośrodku,
- b) wielkości tłumienia fal ultradźwiękowych przez dany ośrodek,
- c) wpływu niejednorodności ośrodka na sposób rozchodzenia się fal ultradźwiękowych.

Znajomość prędkości rozchodzenia się fal jest niezbędna do określenia oporności akustycznej ośrodka, stanowiącej kryterium dla najkorzystniejszego przeniesienia energii ultradźwiękowej na drodze od nadajnika poprzez badany ośrodek do odbiornika. Poza tym przy metodzie impulsowej obliczamy na podstawie tejże prędkości odległość miejsca odbicia od punktu pomiaru.

Również podstawową rolę odgrywa zjawisko tłumienia, określające praktycznie granicę zasięgu badań. Przy dużym tłumieniu do odbiornika dochodzi fala o zbyt małej amplitudzie naprężeń dla uzyskania dostatecznie wyraźnej jego reakcji na tle ubocznych zakłóceń.

Niejednorodności ośrodka są przyczyną uginania się, załamania i odbijania fal. Dwa pierwsze zjawiska są raczej niepożądane, natomiast trzecie stanowi właśnie podstawę ultradźwiękowych metod pomiarowych. Im silniejsze i wyraźniejsze powstają odbicia, tym pewniejsze i dokładniejsze będą wyniki rozpoznania. O charakterze odbić decyduje długość fali oraz własności fizyczne samej niejednorodności. Jeżeli własności te będą się tylko nieznacznie różniły od własności fizycznych otaczającego ośrodka, wówczas zjawisko odbicia wystąpi w stopniu niewystarczającym dla omawianej metody pomiarowej.

Wymienione wyżej czynniki zostały dotychczas dokładnie poznane jedynie w odniesieniu do fal ultradźwiękowych rozchodzących się w metalach oraz w innych nielicznych ciałach stałych lub cieczech. Jeżeli natomiast chodzi o ośrodki interesujące geologię i górnictwo, to brak było zarówno jakiegokolwiek własnego doświadczenia, jak i odpowiednich danych w obcej literaturze fachowej. Z tego też względu wstępne prace Z.B.D. musiały być poświęcone dokładnemu zapoznaniu się z warunkami rozchodzenia się fal ultradźwiękowych w ośrodkach wybranych przez Instytut Geologiczny.

2.1. Badania laboratoryjne.

2.1.1. Wyznaczenie prędkości rozchodzenia się fal ultradźwiękowych.

Zagadnienie wyznaczenia prędkości rozchodzenia się fal rozwiązane zostało metodą rachunkową oraz pomiarową. W pierwszym wypadku oparto się na stałych elastyczności, zaczerpniętych z literatury. Posługiwano się zależnością matematyczną.

$$V_1 = \sqrt{\frac{C_{11} + C_{12} + C_{44}}{2\rho}} \quad (1)$$

gdzie:

V_1 — prędkość rozchodzenia się fali podłużnej w cm/sek.

C_{11}, C_{12}, C_{44} — stałe elastyczności dla ciał anizotropowych w dyn/cm $\cdot 10^{11}$

ρ — gęstość ośrodka (g/cm 3), w którym rozchodzi się fala.

A oto niektóre z otrzymanych wyników:

Rodzaj ośrodka	V_1 m/sek.
Sól kamienna	4040
Anhydryt	4220
Wapień	6125

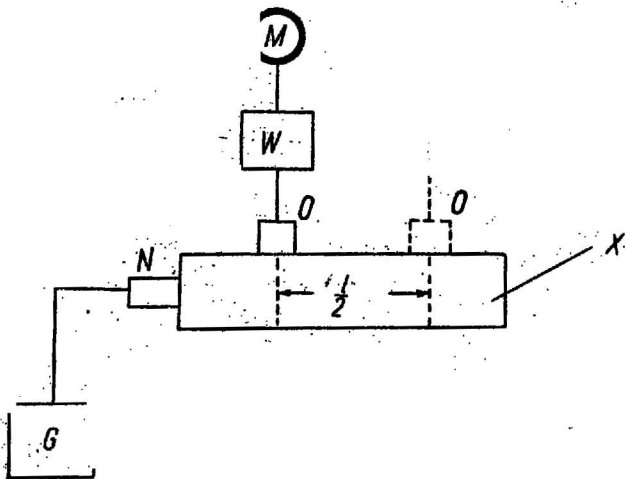
Pomiary prędkości dokonano w laboratorium Zakładu Badania Drgań na próbkach dostarczonych przez Instytut Geologiczny. Próbki te miały kształt walców o średnicy ok. 7 cm lub 10 cm. Zastosowano metodę pośrednią, która polegała na wytworzeniu w próbce fali stojącej oraz na określeniu długości fali poprzecznej na podstawie odległości między węzłami lub strzałkami (ryc. 3). Mając długość fali obliczono jej prędkość ze wzoru:

$$V_t = f \cdot \lambda \quad (2)$$

V_t — prędkość rozchodzenia się fali poprzecznej w m/sek.

f — częstotliwość fali w c/s.

λ — długość fali w m.



Ryc. 3

Schemat blokowy układu do pomiaru długości fali ultradźwiękowej.

G — generator napięć zmiennych, N — nadajnik ultradźwiękowy, O — odbiornik ultradźwiękowy, W — wzmacniacz napięciowy, M — wskaźnik napięcia, X — próbka badanego ośrodka

Dla otrzymania istotnej dla nas prędkości fali podłużnej wykorzystana została zależność

$$\frac{V_1}{V_t} = \sqrt{\frac{2(1-\sigma)}{1-2\sigma}} \quad (3)$$

gdzie:

σ — liczba Poissona, wyrażająca stosunek skurczenia poprzecznego do wydłużenia dla sztab i walców o średnicy znacznie mniejszej od długości.

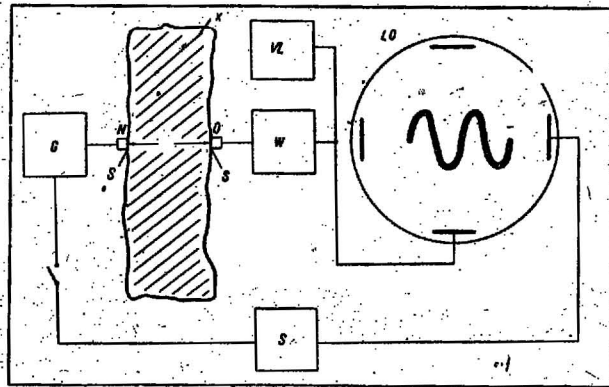
Uzyskano następujące wyniki:

Rodzaj ośrodka	V_1 m/sek.
Sól kamienna	4060
Anhydryt	4200
Wapień	6100

Należy wyjaśnić, że mimo otrzymania prawie całkowitej zgodności między wielkościami pomierzonymi i obliczonymi, omówiona wyżej metoda pomiaru prędkości fali ma charakter raczej eksperymentalny. Powstające bowiem wewnątrz próbki interferencje (wskutek wielokrotnych odbić fal od ścianek) utrudniają rozróżnienie właściwych węzłów i strzałek i stwarzają duże prawdopodobieństwo błędów. Uzyskanie dokładnych wyników możliwe jest metodą optyczną lub też metodą odbitych impulsów; obie metody wymagają jednak skomplikowanych urządzeń, których eksperymenciatorzy nie mieli początkowo do dyspozycji.

2.1.2. Orientacyjne pomiary tłumienia fal ultradźwiękowych.

Pomiary tłumienia polegały na wyznaczeniu stosunku amplitud fali o różnych częstotliwościach na początku i końcu odcinka badanego ośrodka. Praktycznie zrealizowane zostało to w układzie pomiarowym przedstawionym na ryc. 4 i 5. Między nadajnikiem i odbiornikiem ultradźwiękowym umieszczone były kolejno cylindryczne próbki z tego samego materiału lecz o różnych długościach l_1 i l_2 , przy czym $l_1 > l_2$.



Ryc. 4

Schemat blokowy układu do pomiaru tłumienia fal ultradźwiękowych.

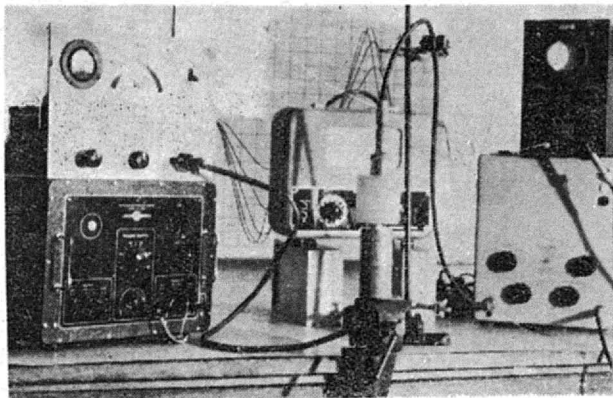
G — generator napięć zmiennych, N — nadajnik ultradźwiękowy, O — odbiornik ultradźwiękowy, W — wzmacniacz napięciowy, Lo — Lampa oscyloskopowa, VL — woltomierz lampowy, X — próbka badanego materiału, SS — powierzchnie styku między nadajnikiem, próbką i odbiornikiem.

Moc ultradźwiękowa nadajnika w ciągu całego pomiaru była stała. Z otrzymanych w ten sposób wyników pomiaru obliczono tłumienie.

$$b_1 = 20 \lg \frac{A_1}{A_2} \quad (4)$$

gdzie:

- b_1 — tłumienie fali ultradźwiękowej przez dany ośrodek na odcinku $l = l_1 - l_2$ (w dB)
- A_1 — amplituda ciśnienia fali po przejściu przez próbkę o długości l_1
- A_2 — amplituda ciśnienia fali po przejściu przez próbkę o długości l_2



Ryc. 5

Aparatura do pomiaru tłumienia fal ultradźwiękowych w próbkach ośrodków statycznych.

Stosując powyższą metodę można było wyeliminować nieznane na razie tłumienie w miejscach styku S między nadajnikiem, odbiornikiem i próbką oraz częściowo wpływ kształtu próbek. Ostateczne wyniki liczbowe przedstawia tabela 1.

Omówiony sposób pomiaru na próbkach pozwolił jedynie na przybliżone określenie rzędu wielkości tłumienia na danym odcinku badanego ośrodka. Wynika to stąd, że wskutek małych wymiarów próbek powstaje w nich sztuczne „zageszczenie” energii ultradźwiękowej (ze względu na liczne wewnętrzne odbicia fal o ścianki) w przeciwieństwie do zjawiska rozpraszania energii, zachodzącego w mniejszym lub większym stopniu w ośrodku rozciągającym się na dużej przestrzeni (jak ma to na ogół miejsce w przyrodzie). Jednak i te orientacyjne wyniki wystarczyły w zupełności, aby ustalić, w jakich ośrodkach może być praktycznie wykorzystana metoda ultradźwiękowa oraz jakie należy stosować częstotliwości. Jak widać z tabeli 1, nie nadają się do badania ultradźwiękami: piaski i ily, gdyż warstwa ich o grubościach zaledwie kilku centymetrów powoduje nie dające się pokonać technicznie tłumienie rzędu kilkuset dB. Natomiast stosunkowo niewielkiemu tłumieniu ulegają fale ultradźwiękowe w anhydrycie, soli kamiennnej, wapieniu. Najlepsze przewodnictwo ultradźwięków wśród zbadanych wykazują: granit, bazalt, marmur. Poza tym pomiary ujawniły również, że we wszystkich wypadkach tłumienie wzrasta wraz z częstotliwością, co zachodzi zwłaszcza przy częstotliwości powyżej 70 Kc. O wyborze najkorzystniejszej dla przyszłej metody częstotliwości zdecydowały dwa względy: dokładność i zasięg rozpoznania. Z punktu

Tabela I

f Kc	30	40	50	60	70	80	90	100	120	150
Anhydryt	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	1,0
Sól kamienna jasnożółta	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,7	0,8	1,0	1,5	1,5
Sól kamienna biała	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,65	0,7	1,5	2,0
Sól kamienna ciemnożółta	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	2,0	2,4	3,0	3,0
Wapień	6,0	—	6,0	—	4,0	—	—	6,0	12,0	12,0
Piasek suchy	15	25	38	50	60	60	60	60	60	60
Piasek z 25% wody	10	12	18	25	40	40	—	—	—	—

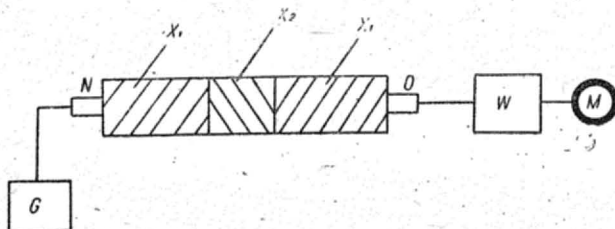
widzenia dużej dokładności długość fali ultradźwiękowej powinna być jak najmniejsza, a zatem częstotliwość jak najwyższa (co wyjaśnione było już na wstępie). Odwrotnie natomiast przedstawia się sprawa z zasięgiem, ponieważ maleje on ze wzrostem tłumienia, a więc i ze wzrostem częstotliwości. Biorąc powyższe okoliczności pod uwagę, uznano za najwłaściwsze częstotliwości zawarte w zakresie 60 — 70 Kc. Występujące w tych warunkach fale są dostatecznie krótkie (w porównaniu do wymiarów obiektów rozpoznania) i stosunkowo słabo tłumione.

2.1.3. Badanie wpływu niejednorodności ośrodka na rozchodzenie się fal ultradźwiękowych.

Zagadnienie wpływu niejednorodności ośrodka zbadane zostało w ogólnych zarysach metodami laboratoryjnymi na układach sztucznego odwzorowania naturalnych warunków panujących w przyrodzie. Jeden z takich układów przedstawiony jest na ryc. 6. Badany ośrodek stanowiły dwie próbki soli kamiennnej przedzielane kolejno warstwą wody, powietrza, ily lub anhydrytu. Przeprowadzone na takim układzie pomiary tłumienia porównywano z wynikami uzyskanymi wówczas, gdy obie próbki soli były zetknięte bezpośrednio z sobą (bardzo ściśle). Otrzymano następujące wzrosty tłumienia.

Rodzaj badanego układu	Wzrost tłumienia w porównaniu do czystej soli w dB
Próbka soli I, anhydryt, próbka soli II	<0,5
Próbka soli I, woda, próbka soli II	20
Próbka soli I, powietrze, próbka soli II	60—80
Próbka soli I, ily, próbka soli II	>80

Oprócz tego stwierdzono w każdym wypadku tworzenie się fali stojącej w próbce I, co dowodzi, że wszędzie miało do czynienia ze zjawiskiem odbicia



Ryc. 6

Schemat blokowy układu do badania wpływu niejednorodności ośrodka na tłumienie fal ultradźwiękowych.

G — generator napięć zmiennych, N — nadajnik ultradźwiękowy, O — odbiornik ultradźwiękowy, W — wzmacniacz napięciowy, M — wskaźnik napięcia.

się fali na granicy próbki I i warstwy oddzielającej ją od próbki II. Wyniki te uzupełnione zostały w późniejszej fazie prac pomiarami impulsowymi, które pozwoliły określić dokładnie współczynnik odbicia fal ultradźwiękowych o częstotliwości 60 — 70 Kc na granicach różnych ośrodków.

Ośrodek	Aluminium	Woda	Olej transformatorowy	Sól kamienna	Powietrze
Aluminium	0	72	74	1,5	100
Woda	—	0	0	65	100
Olej transformatorowy	—	—	0	68	100
Sól kamienna	—	—	—	0	100
Powietrze	—	—	—	—	0

2.2. Pomiary w naturalnych złożach soli kamiennnej.

Dla uzupełnienia i potwierdzenia wyników otrzymanych laboratoryjnie przeprowadzono pomiary rozchodzenia się fal ultradźwiękowych w złożach soli kamiennnej (pod Inowrocławiem oraz w Wieliczce). Jako miejsce pierwszych pomiarów terenowych wybrano kopalnię soli z tego względu, że mają one stosunkowo dokładnie opracowane mapy geologiczne oraz łatwo dostępne obiekty pomiaru. Ponadto, jak już wykazały badania laboratoryjne, tłumienie fal ultradźwiękowych w soli jest niewielkie.

2.2.1. Pomiary współczynnika tłumienia fal.

Rozchodząca się w ośrodku stałym fala ultradźwiękowa wprawia w drgania grupy cząsteczek ośrodka. Jest to związane oczywiście z pokonywaniem tarcia i sił międzycząsteczkowych, co przejawia się w postaci częściowej zmiany energii akustycznej na ciepłą. Wynikłe stąd straty nazywamy tłumieniem danego ośrodka. Od wielkości tego tłumienia zależy maleńie amplitudy naprężeń fali w miarę jej oddalania się od źródła. Powyższe zjawisko może być ujęte matematycznie w następującej zależności:

$$A_1 = A_0 \cdot e^{-mr} \quad (5)$$

gdzie:

- A_0 — amplituda fali u jej źródła,
- A_1 — amplituda fali w odległości r od źródła,
- m — współczynnik tłumienia fali przez dany ośrodek.

W wypadku fali z czołem o skończonej krzywiznie (a więc takiej, jaką promieniował nadajnik używany do niniejszych badań) występuje dalsze osłabienie amplitudy wskutek rozproszenia energii w przestrzeni. Przy kołowej charakterystyce kierunkowości nadajnika stosowanego przez autora, tłumienie rozproszenia było wprost proporcjonalne do odległości i uwzględnione mogło być we wzorze (5) w następujący sposób:

$$A_1 = \frac{A_0 \cdot r_0}{r_1} e^{-mr_1} \quad (6)$$

gdzie:

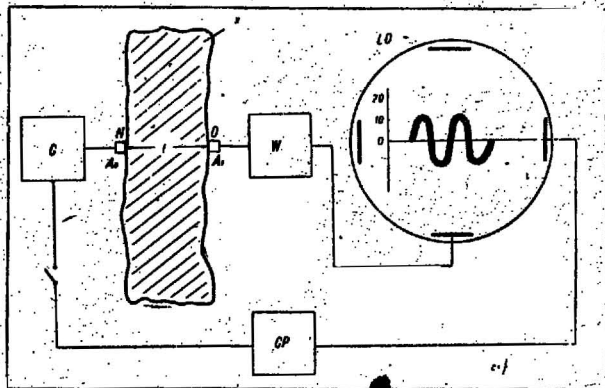
- A_0 — amplituda fali w odległości $r_0 < r_1$ od źródła,
- A_1 — amplituda fali w odległości r_1 od źródła,
- m — współczynnik tłumienia fali przez ośrodek,
- r_0, r_1 — odległości punktów pomiaru od źródła w m.

W trakcie pomiarów laboratoryjnych zjawisko rozproszenia energii ultradźwiękowej miało przebieg mocno zniekształcony wskutek ograniczonych wymiarów

próbek i dlatego nie pozwalało na wyznaczenie współczynnika m . Stało się to możliwe dopiero w terenie, gdzie rozproszenie występowało zgodnie z zależnością (5) i mogło być uwzględnione w obliczeniach. Współczynnik tłumienia m dla różnych gatunków soli przy częstotliwości fali 68 Kc określony został na podstawie wielkości A_0 i A_1 , pomierzony w układzie przedstawionym na ryc. 7. Obiektami pomiarów były filary pokładowe różnej grubości, do których z jednej strony przystawiano nadajnik ultradźwiękowy, z drugiej zaś, przeciwległej — odbiornik (metoda przeswieceniowa). Za pomocą tego samego układu pomiarowego określony został również maksymalny zasięg fali, jaki pozwalała uzyskać prowizoryczna jeszcze wówczas aparatura. Wyniki liczbowe zestawione są poniżej.

Gatunek soli	Współczynnik tłumienia m	Zasięg fali w m
Sól czerwona, ciemna	0,042	35
Sól spizłowa, jednorodna	0,187	20
Sól czerwona z domieszką piasku	0,331	12
Sól biała tzw. śnieżna	0,444	10
Sól spizłowa z przerostami ilów i anhydrytu	0,873	5

Jako zasięg fali przyjmowano największą odległość, po której przebyciu fala zdolna była jeszcze wywołać dostrzegalną reakcję odbiornika.



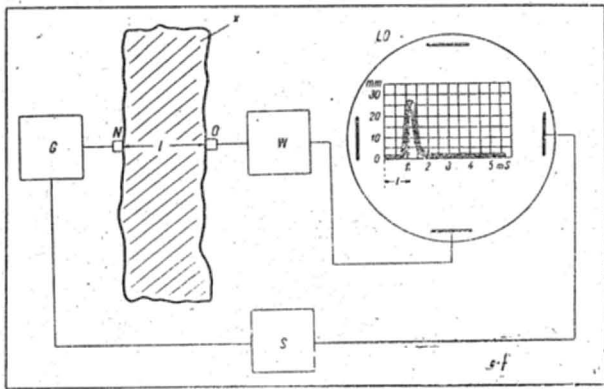
Ryc. 7

Schemat blokowy układu do pomiaru współczynnika tłumienia fal ultradźwiękowej w ośrodkach stałych. G — generator napięć zmiennych, N — nadajnik ultradźwiękowy, O — odbiornik ultradźwiękowy, W — wzmacniacz napięciowy, LO — lampa oscyloskopowa, GP — generator podstawy czasu, X — badany ośrodek.

2.2.2. Pomiary prędkości rozchodzenia się fal.

Pomiary te przeprowadzone zostały metodą impulsową (ryc. 8). W głębi filara o dokładnie zmierzonej grubości wysyłano krótkie impulsy (czas trwania — 0,2 sek.) w odstępach, wynoszących 5 ms. Impulsy po przejściu przez filar dochodziły z odpowiednim opóźnieniem do odbiornika. Dzielną długość drogi fali od nadajnika do odbiornika (grubość filara) przez wielkość opóźnienia impulsu odbitego względem nadanego — otrzymano badaną prędkość. Opóźnienie odczytywane było na skali specjalnego oscyloskopu (synchronoskopu). Otrzymane wyniki wykazały na ogół zgodność z pomiarami laboratoryjnymi. Jedynie w wypadku złóż mocno zanieczyszczonych ilami lub

piaskiem prędkości rozchodzenia się fal wypadają znacznie mniejsze, co można wytłumaczyć zmianą stałych elastyczności ośrodka.



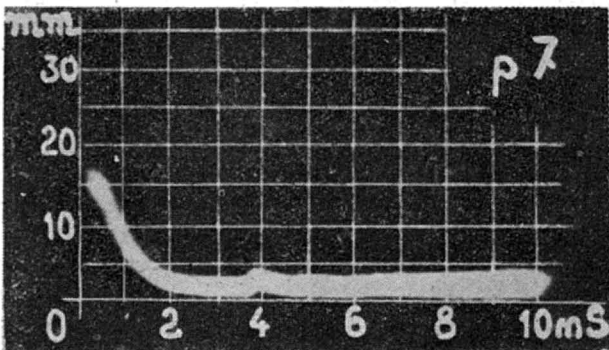
Ryc. 8

Schemat blokowy układu do pomiaru metodą impulsową prędkości rozchodzenia się fal ultradźwiękowych.

G — generator impulsów elektrycznych, N — nadajnik ultradźwiękowy, O — odbiornik ultradźwiękowy, W — wzmacniacz napięciowy, LO — lampa oscyloskopowa, S — układ synchronizujący, X — badany ośrodek.

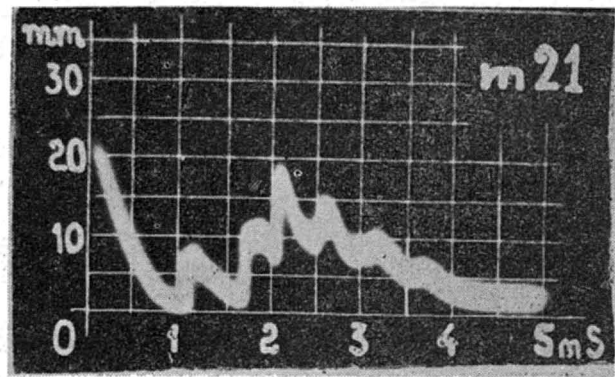
2.2.3. Badanie wpływu niejednorodności złoża na rozchodzenie się fal.

Do powyższych badań została również wykorzystana metoda impulsowa opisana w p. 2.2.2. Za cel pomiarów posłużyły filary zawierające wyraźne przerozrosty w postaci jednolitych warstw ilów, anhydrytu lub odmiennego gatunku soli o grubości 0,5 — 2 m. Uzyskane w poszczególnych przypadkach na ekranie synchronoskopu obrazy odbitych impulsów utrwalone zostały fotograficznie. Na podstawie porównania zdjęć ze strukturą odpowiadających im obiektów pomiaru stwierdzono, że obrazy odbić są powtarzalne, jednoznaczne i że dzięki swej charakterystycznej formie, uwarunkowanej własnościami ośrodków, pozwalają z dostateczną dokładnością rozróżnić złoża jednorodne od niejednorodnego, jak również określić granicę między złożem soli a ciałami o innych cechach fizycznych, jak np.: powietrze, woda, ily. Typowy wynik rozpoznania złoża jednorodnego przedstawia ryc. 9 (brak odbić), zaś niejednorodnego — ryc. 10 (liczne słabe odbicia). Obecność ciała o zupełnie odmiennych własnościach fizycznych od soli objawia się pojedynczym, silnym odbiciem impulsu (ryc. 11 zawiera odbicie od warstwy ilów).



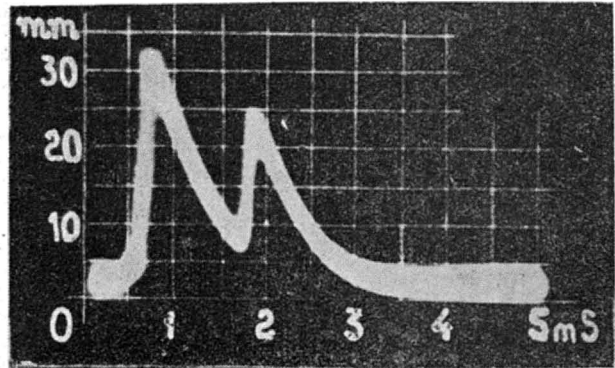
Ryc. 9

Oscylogram z pomiaru ośrodka jednorodnego przy pomocy impulsów ultradźwiękowych.



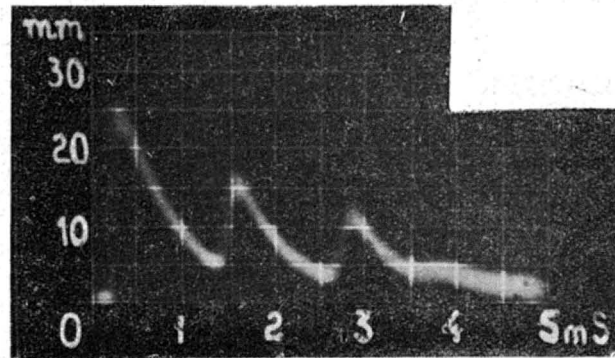
Ryc. 10

Oscylogram z pomiaru ośrodka niejednorodnego metodą impulsów ultradźwiękowych.



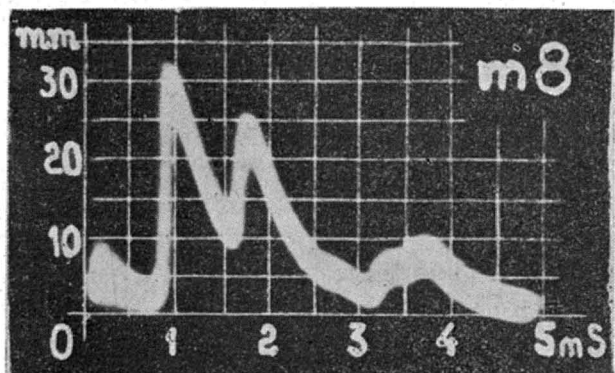
Ryc. 11

Oscylogram wskazujący na istnienie wyraźnej granicy jednorodności.



Ryc. 12

Oscylogram z pomiaru odbić impulsów ultradźwiękowych w bloku marmuru.



Ryc. 13

Oscylogram z pomiaru impulsów ultradźwiękowych, odbitych od szczelin powietrznych skały

2.3. Pomiaru w kamieniołomach.

Dalszy etap prac objął badania nad rozchodzeniem się fal ultradźwiękowych w kamieniołomach wapienia, granitu, sjenitu i marmurów. Podobnie jak poprzednio, pomiary te dotyczyły prędkości rozchodzenia się fali, jej zasięgu oraz zjawisk odbijania. Zastosowane zostały metody pomiarowe, opisane już w p. 2.2.

Poniżej podane są przybliżone liczbowe wyniki pomiaru prędkości oraz zasięgu fali.

L. p.	Rodzaj ośrodka	Prędkość rozchodzenia się fali m/sek.	Zasięg fali w m
1	Wapień	~4800	~10
2	Granit	~6000	—
3	Sjenit	~6100	~30
4	Marmur biały	~6150	~30
5	Marmur zielony	~6150	~30

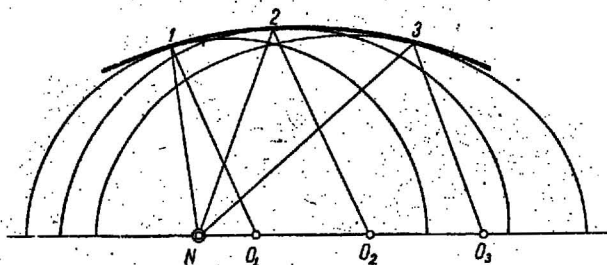
Przykłady zaobserwowanych w skałach zjawisk odbijania się fal przedstawiają zdjęcia na ryc. 12 i 13. W pierwszym wypadku odbicia spowodowane są zewnętrznymi ścianami bloku skalnego, graniczącymi z powietrzem. W drugim (ryc. 13) — przyczynę odbić stanowią szczeliny w masywie skalnym, wypełnione powietrzem lub piaskiem.

2.4. Geofizyczna interpretacja wyników.

Stwierdzenie występowania zjawiska odbicia się fali w wypadku napotkania na niejednorodność ośrodka może mieć praktyczne znaczenie, nie decyduje jednak całkowicie o wartości ultradźwiękowej, impulsowej metody rozpoznania. Metoda ta bowiem nie tylko powinna pozwolić na wykrycie niejednorodności, lecz również na określenie jej przybliżonych wymiarów, kształtu i położenia względem miejsca obserwacji.

Dlatego też opisane wyżej pomiary ultradźwiękowe nabierają realnego znaczenia dla geologii i górnictwa dopiero wówczas, gdy zinterpretowane zostaną w sensie geofizycznym, co staje się możliwe po zastosowaniu opisanej poniżej specjalnej metody graficznej, opracowanej przez Instytut Geologiczny.

Punktem zainteresowań naszych badań są, jak już wiadomo, fale odbite od przeszkody w postaci granicy jednorodnego w sensie fizycznym ośrodka, jego spekań lub jego kontaktów z innymi ośrodkami, odmienne warunkującymi rozchodzenie się fal ultradźwiękowych. Związane z tym pomiary dają się przedstawić schematycznie w sposób podany na ryc. 14. Na zewnętrznej granicy badanego ośrodka w punkcie N umieszczony jest bezkierunkowy nadajnik, wysyłający jednakowo we wszystkich kierunkach impulsy ultradźwiękowe, a w punkcie O_1 odbiornik tych impulsów. Punkty $n = 1, 2, \dots$ w których następuje odbicie fali, leżą na wewnętrznej, granicznej powierzchni jednorodności ośrodka. Zadaniem metody ultradźwiękowej jest zlokalizowanie tej powierzchni na podstawie pomiarów wykonanych w punktach O_1, O_2, O_3, \dots

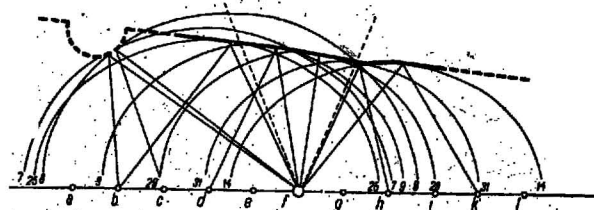


Ryc. 14

Zasada geofizycznej interpretacji wyniku pomiarów ultradźwiękowych.

Jako wstępne założenie przyjmujemy, że prawo równości kątów padania i odbicia fal ultradźwiękowych jest spełnione, a poślizg fali nie będzie brany pod uwagę ze względu na brak konkretnych danych dotyczących tego zjawiska. Dla celów geofizycznych założenia takie są zupełnie wystarczające.

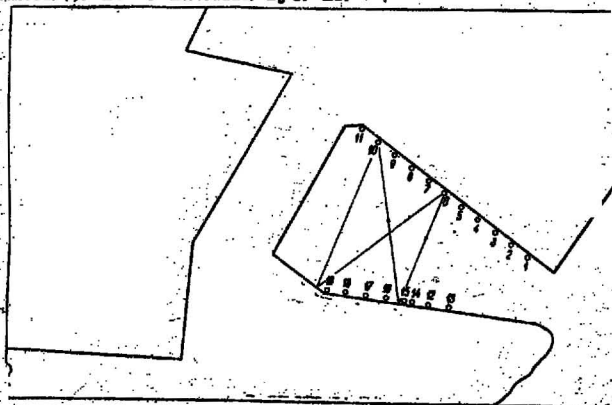
Bezpośrednim wynikiem pomiarów są współrzędne punktów N i O oraz długość drogi, jaką przebyła fala ultradźwiękowa między punktami NnO. Dane takie wystarczają, aby określić miejsce geometryczne punktów, w których możliwe było odbicie fali. Tym miejscem geometrycznym jest elipsoida obrotowa z ogniskami w punktach N i O. Ponieważ jednak stosowany jest nadajnik bezkierunkowy, więc każda powierzchnia styczna do elipsoidy obrotowej może być w punkcie styczności zwierciadłem dla fali biegnącej od N do O. Obserwując odbicie impulsów ultradźwiękowych nie w jednym tylko punkcie O, lecz w wielu punktach O_1, O_2, O_3 kolejno (a najlepiej jednocześnie) otrzymujemy zbiór elipsoid obrotowych z ogniskami w punktach NO_1, NO_2, NO_3, \dots Ponieważ w ośrodkach badanych geofizycznie obserwujemy na ogół ciągłość struktury geologicznej, więc przez interpolację można przyjąć, że poszukiwaną granicę jednorodności stanowi powierzchnia będąca obwiednią wspomnianego zbioru elipsoid.



Ryc. 15

Geofizyczna interpretacja pomiarów ultradźwiękowych w terenie przedstawionym na ryc. 16.

Omówiony wyżej sposób interpretacji zastosowany został w niniejszych badaniach wszędzie tam, gdzie istniała możliwość wykonania dostatecznej ilości pomiarów odbitych impulsów ultradźwiękowych. Użytko na ogół wyniki zgodne z rzeczywistym stanem rzeczy. Na ryc. 15 podany jest rezultat geofizycznej interpretacji odbitych fal pomierzonych w terenie, którego szkic zawiera ryc. 16.

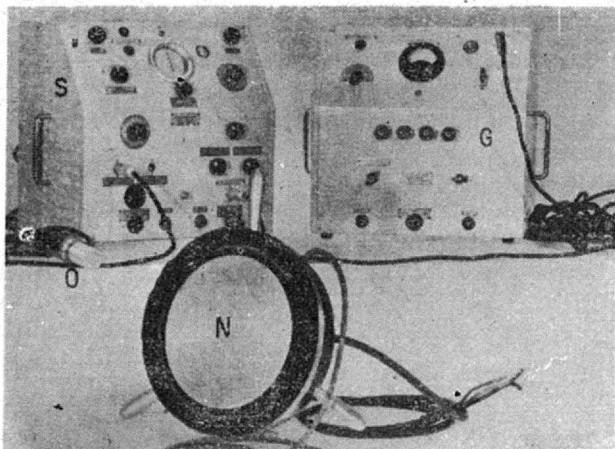


Ryc. 16

Szkic terenu, w którym przeprowadzono pomiary, interpretowane na ryc. 15.

2.5. Aparatura pomiarowa.

Do opisanych powyżej badań i pomiarów użyta została eksperymentalna aparatura ultradźwiękowa, zaprojektowana i wykonana w Zakładzie Badania Drgań. Kompletny zestaw aparatury przedstawiony jest na ryc. 17. Składa się on z magnetystrykcyjnego, bezkierunkowego nadajnika impulsowych fal ultra-



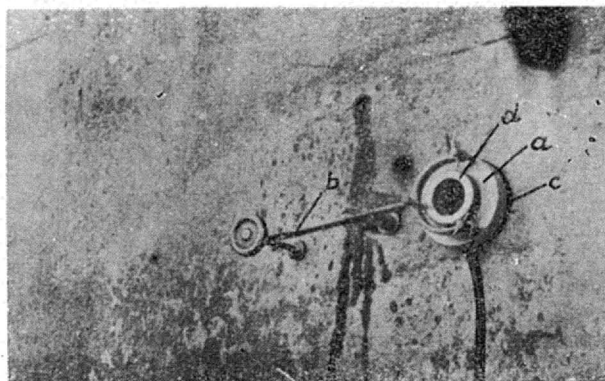
Ryc. 17

Widok kompletnego zestawu aparatury ultradźwiękowej.

dolna część rury mroźniowej znajdowała się w oddźwiękowych (N), generatora impulsów elektrycznych (G) zasilającego nadajnik, piezoelektrycznego odbiornika (O) fali ultradźwiękowej oraz synchronoskopu (S), umożliwiającego obserwację impulsów nadanych i odebranych. Podstawowe dane techniczne aparatury są następujące:

moc akustyczna nadajnika	30 w
moc elektryczna wyjściowa generatora	100 w
częstotliwość fali ultradźwiękowej	60—70 Kc
czas trwania impulsu nadawanego	0,5 m/s
częstotliwość nadawania impulsów	25—200 imp/sek.
poziom wzmocnienia układu odbiorczego	140 dB

Oprócz powyższych elementów zastosowano jeszcze specjalne urządzenie pomocnicze, umożliwiające akustyczne dopasowanie nadajnika i odbiornika do badanego ośrodka, co jest niezbędne dla zredukowania do minimum tłumienia fali na płaszczyznach stykowych (S) — por. ryc. 7. Urządzenie to uwidocznione na ryc. 18 składa się z pierścienia (a) dociskanego wraz z uszczelką gumową (c) przez dźwignię (b) do zewnętrznej powierzchni obiektu pomiaru. W otwór pierścienia (d) wkręcona zostaje głowica nadajnika lub odbiornika na taką głębokość, aby między czynną powierzchnią głowicy a badanym ośrodkiem powstała odpowiedniej wielkości komora. Komorę tę wypełnia się cieczą o właściwej oporności akustycznej (zbliżonej możliwie do oporności akustycznej badanego ośrodka). Dźwignia dociskająca pierścień przy-



Ryc. 18

Urządzenia do zamocowania i akustycznego dopasowania ultradźwiękowego nadajnika i odbiornika.

mocowana jest do obiektu pomiaru za pośrednictwem uchwytu, wsuwanego w wywiercony uprzednio otwór.

3. OCENA WYNIKÓW

Przeprowadzona przez Instytut Geologiczny ocena materiału zebranego w toku opisanych wyżej badań pozwala wysunąć następujące wnioski:

1. Uzyskany dla soli i skał zasięg fal ultradźwiękowych rzędu 10 — 30 m jest wynikiem dobrym, mogącym przynieść znaczne korzyści w rozpoznawaniu złoża i planowaniu robót górniczych, zarówno rozpoznawczych, jak następnie udostępniających złoża i wreszcie eksploatacyjnych.
2. Ultradźwiękowa metoda impulsowa w połączeniu z geofizyczną interpretacją wyników stanowi ważne uzupełnienie stosowanych dotychczas metod rozpoznawczych, a w przyszłości będzie je mogła zastąpić w wielu wypadkach jako bardziej dokładna i wygodna w użyciu.
3. Dla przestrzennego określenia granic jednorodności niezbędne jest wykonanie pomiarów wzdłuż dwóch prostych prostopadłych względem siebie. Wskazane jest jednocześnie wykonanie pomiarów w wielu punktach.
4. Używana dotychczas aparatura wymaga pewnych zmian konstrukcyjnych z uwagi na specyficzne warunki pracy oraz wymagania stawiane przez interpretację geofizyczną.
5. Należy kontynuować prace nad dalszym udoskonalaniem i rozwijaniem metody.