

NOWOCZESNE ZASTOSOWANIE AKUSTYKI W GEOFIZYCE I GÓRNICTWIE

Część I

UKD 534.2:539.217.1:550.834:622.241+622.83

W ostatnim dziesięcioleciu geofizyka i górnictwo krajów wysoko technicznie postawionych zaczyna w coraz szerszym zakresie wykorzystywać fale akustyczne dla celów poszukiwawczych, rozpoznawczych lub kontrolnych. Ustnieje bowiem wiele jednoznacznych i ścisłych powiązań między sposobem rozchodzenia się wspomnianych fal w różnych ośrodkach a właściwościami fizycznymi, mechanicznymi lub wytrzymałościowymi tych ośrodków.

Stopniowe poznawanie powyższych powiązań przy jednoczesnym opracowywaniu odpowiednich metod obserwacji i rejestrowania (rozchodzącej się w danych warunkach) fali akustycznej — doprowadziło do wypełnienia poważnej luki w możliwościach pomiarowych, którymi dysponowano do niedawna. W szczególności odnosi się to do określania pewnych właściwości górotworu, jak: jego porowatość, stopień nasycenia cieczą, stopień zamrożenia, szczelność. Te bardzo istotne dla geofizyków i górników cechy mogły być wyznaczone jedynie w sposób orientacyjny.

Obecnie metoda akustyczna pozwala ustalić je nawet *in situ* z dużą dokładnością. Ponadto okazało się, iż metoda ta nadaje się również do kontrolowania robót i urządzeń wiertniczych oraz górniczych, przyczyniając się znacznie do zwiększenia efektywności i bezpieczeństwa pracy.

W Polsce również prowadzone są także od wielu lat prace badawcze i techniczne nad wykorzystaniem fal akustycznych w geofizyce i górnictwie. Głównym ośrodkiem badań w tym zakresie jest Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, współpracujący z resortami górnictwa i przemysłu ciężkiego.

**ROZCHODZENIE SIĘ FAL AKUSTYCZNYCH
W GÓROTWORZE POROWATYM**

Podstawowymi wskaźnikami charakteryzującymi sposób rozchodzenia się fali akustycznej w danym ośrodku są jej prędkość propagacji oraz tłumienie. W suchym górotworze o porowatości φ prędkość fali akustycznej określona może być z praktycznie wystarczającą dokładnością przez następującą zależność

$$C = \left\{ \frac{2g}{3\rho_s \varphi (1 - \varphi)} \left(\frac{1 - \sigma_0}{1 + \sigma_0} \right)^{1/2} P^{1/3} k^{1/3} \right\} \dots \dots \dots [1]$$

(4): gdzie.

- C — prędkość rozchodzenia się fali akustycznej,
- g — przyspieszenie ziemskie,
- k — stała ośrodka wyznaczana doświadczalnie,
- p — ciśnienie zewnętrzne,
- φ — stosunek objętości porów ośrodka do jego całkowitej objętości,
- ρ_s — gęstość ziarn ośrodka,
- σ_0 — współczynnik Poissona dla cząstki ośrodka.

Jak widać, prędkość ta maleje wraz ze wzrostem porowatości górotworu. Przyjmując np. dla piaskowca $\sigma_0 = 0,2$ otrzymujemy dla tego ośrodka:

$$C = \frac{2,4 P^{1/3} k^{1/3}}{\rho_s^{1/3} \varphi^{1/3} (1 - \varphi)^{1/3}} \dots \dots \dots [2]$$

Jeżeli pory piaskowca zostaną wypełnione cieczą, to prędkość fali akustycznej zależeć będzie również od ciśnienia, ściśliwości i gęstości cieczy. Powinno

to być uwzględnione w obliczeniach, w związku z czym wzór [2] przybiera postać (4):

$$C = \frac{2,4 (P_0 - P_c)^{1/3} k^{1/3} [1 + 0,175 B^{3/2} k^{-1} \varphi (P_0 - P_c)^{-1/3}]^{5/6}}{\rho_c^{1/3} [\rho_c - \varphi (\rho_c - \rho_s)]^{1/3} [1 + 0,263 B^{3/2} k^{-1} \varphi (P_0 - P_c)^{-1/3}]^{1/2}} \dots \dots \dots [3]$$

gdzie:

- B — moduł ściśliwości,
- P_0 — ciśnienie zewnętrzne,
- P_c — ciśnienie cieczy w porach,
- ρ_c — gęstość cieczy w porach.

Przy niecałkowitym wypełnieniu por cieczą stosujemy poprawkę:

$$C_s = C - C_c (1 - S^2) (1 - \varphi^{1/3}) \dots \dots \dots [4]$$

gdzie:

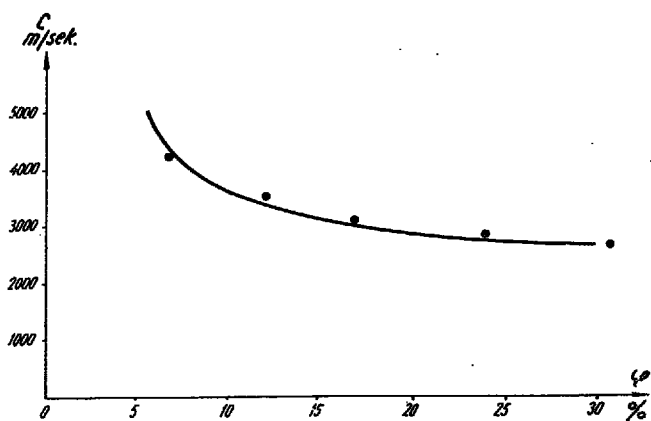
- C_c — prędkość fali akustycznej w cieczy, wypełniającej pory,
- C_s — prędkość fali akustycznej w piaskowcu o nasyceniu S,
- S — stopień nasycenia piaskowca cieczą.

Przytoczone wyżej wzory ważne są również poza piaskowcami dla górotworu porowatego innego rodzaju, pod warunkiem uwzględnienia w nich odpowiednich wartości liczbowych.

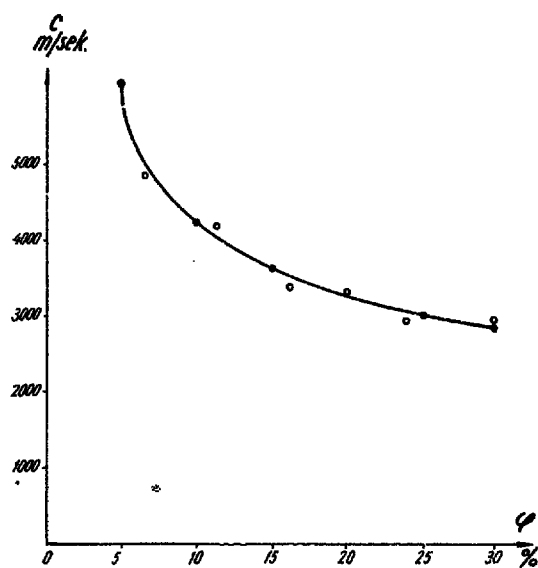
W ramach własnych prac badawczych wyznaczono metodą rachunkową (na podstawie wzorów: 2, 3, 4) oraz pomiarową prędkość fal akustycznych w próbkach piaskowców o różnej porowatości i stopniu nasycenia wodą lub naftą. Wyniki przedstawiono w formie wykresów (ryc. 1, 2, 3, 4). Zadowolająca zgodność obliczeń i pomiarów świadczy o prawidłowości obu zastosowanych metod, a z przebiegu krzywych wyraźnie wynika związek istniejący między prędkością fali akustycznej w górotworze a jego porowatością i stopniem nasycenia cieczą.

W przypadku piasków, żwirów itp. odznaczających się bardzo dużą porowatością (ok. 50—60%) znaczny wpływ na prędkość propagacji fal akustycznych wywiera ciśnienie górotworu. Zjawisko to wyraźnie występuje już na niewielkich głębokościach pod powierzchnią ziemi. Dowodzą tego pomiary akustyczne przeprowadzone przez autora między otworami, wykonanymi w płytce występujących warstwach luźnego górotworu.

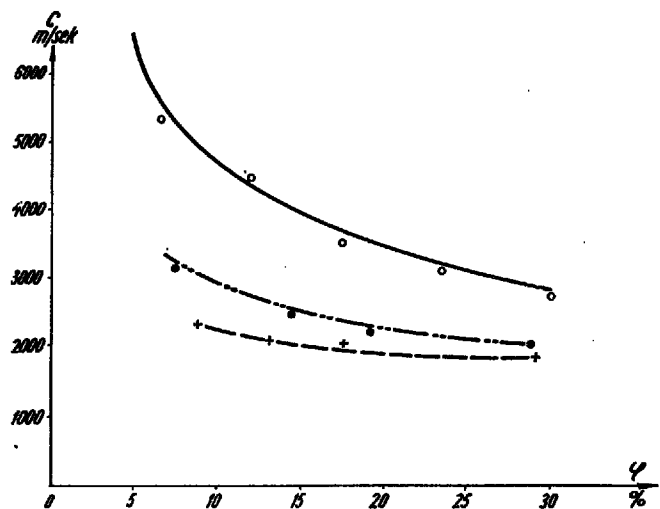
Wyniki w postaci krzywych prędkości fali akustycznej w funkcji głębokości względem powierzchni ziemi dla różnych typów luźnego górotworu przedstawiono na ryc. 5 i 6. Okazuje się, że tuż przy powierzchni ziemi prędkości fal akustycznych są bardzo małe, natomiast już na głębokości 25 m ulegają 2—3-krotnemu zwiększeniu. Zmiany te są różne w zależności od rodzaju górotworu. Ogólnie można stwierdzić, że są one procentowo większe w piaskach i żwirach niż w glinach i ilach. Ponadto przebieg krzywych dla dwóch pierwszych ośrodków różni się bardziej od liniowego niż dla pozostałych. Np. w piaskach największe przyrosty prędkości fali akustycznej występują w zakresie zmian głębokości od 0,5 do 10 m. Poniżej 10 m przyrosty te zaczynają maleć, przybierając przy większych głębokościach charakter zbliżony do asymptotycznego. W glinkach oraz ilach przyrosty prędkości są bardziej równomierne w całym zakresie pomiarowym.



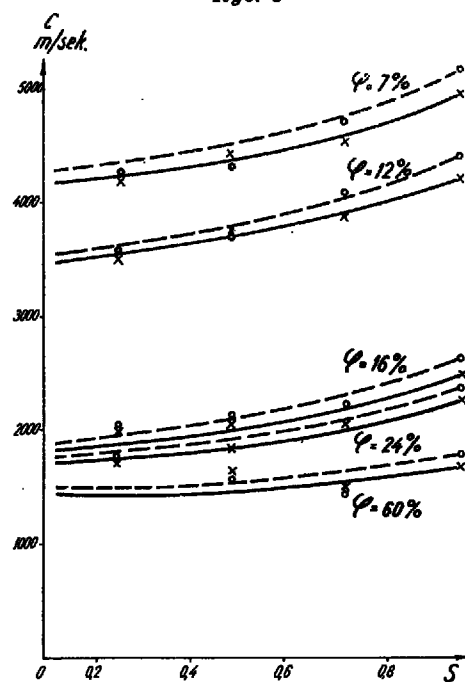
Ryc. 1



Ryc. 3



Ryc. 2



Ryc. 4

Ryc. 1. Zależność prędkości fali akustycznej od stopnia porowatości piaskowca suchego.

— wyniki obliczone, ● wyniki pomiarów

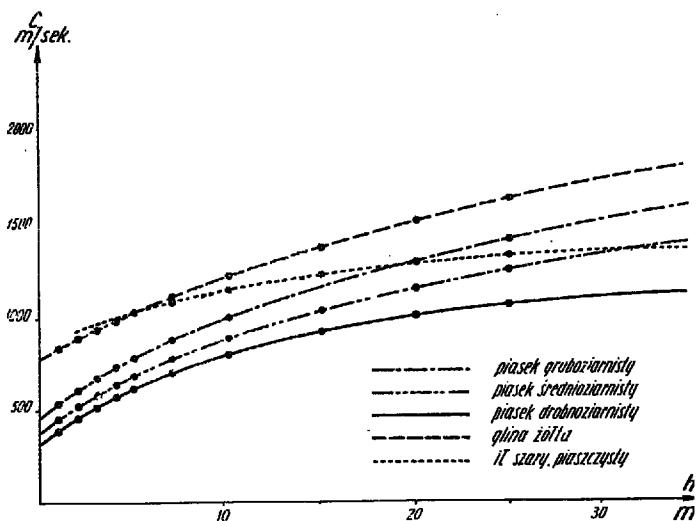
Ryc. 2. Zależność prędkości fali akustycznej od stopnia porowatości piaskowca nasyconego wodą.

— .. — wyniki obliczone, o ● x wyniki pomiarów

Ryc. 3. Zależność prędkości fali akustycznej od stopnia porowatości piaskowca nasyconego naftą.

— wyniki obliczone, O wyniki pomiarów

Ryc. 4. Zależność prędkości fali sprężystej od stopnia nasycenia piaskowca wodą lub naftą. Wyniki obliczone: --- nasycenie wodą, — nasycenie naftą. Wyniki pomiarów: O nasycenie wodą, x nasycenie naftą.



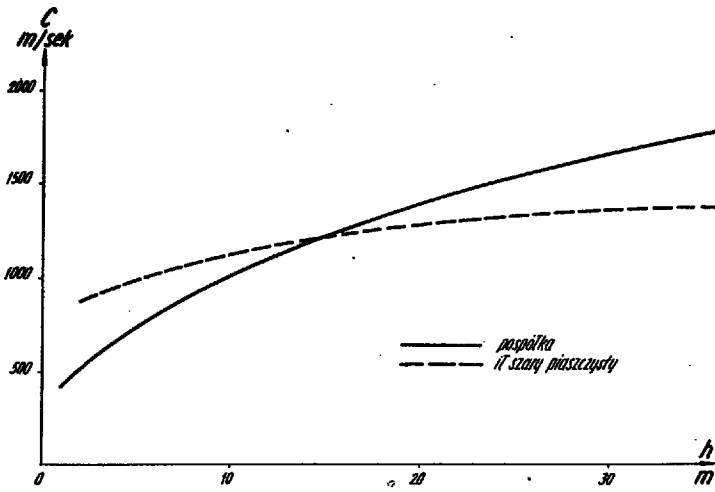
Ryc. 5

Ryc. 5 i 6. Zależność prędkości fali akustycznej w skałach luźnych od głębokości poniżej powierzchni ziemi.

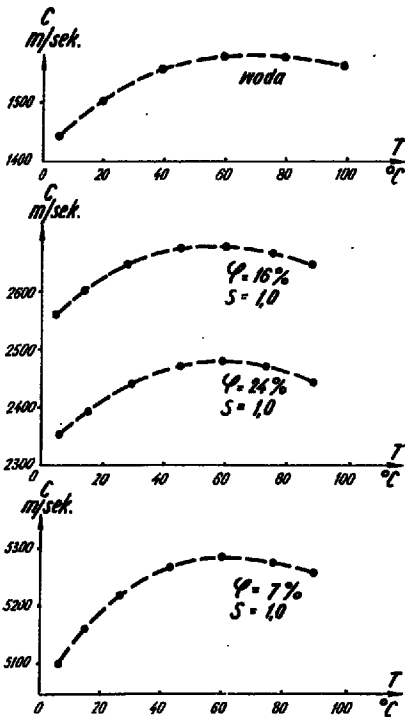
Objawy te należy tłumaczyć dużym, lecz niejednakowym wpływem ciśnienia górotworu na strukturę a przede wszystkim na porowatość poszczególnych skał luźnych. Najbardziej podatne pod tym względem są piaski oraz ich mieszaniny ze żwirem, a najmniej — gliny i ły. Niewątpliwie wynika to z bar-

dziej zwartej budowy tych ostatnich. Działaniu ciśnienia górotworu podlegają również skały zwarte, ale w znacznie mniejszym stopniu ze względu na dużą sztywność ich budowy.

W dotychczasowych rozważaniach nie była rozpatrywana rola temperatury. Czynnikiem ten może być



Ryc. 6

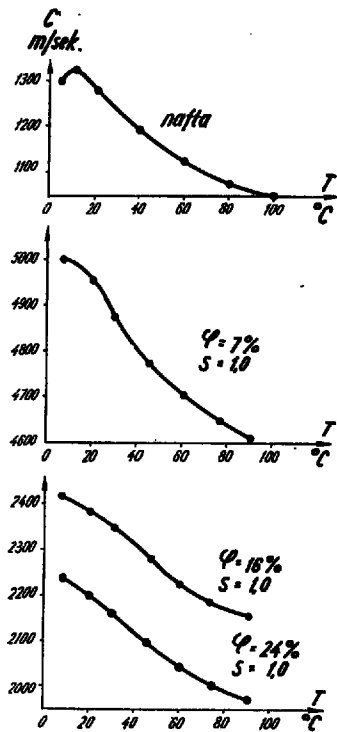


Ryc. 8. Zależność prędkości fali akustycznej od temperatury piaskowca nasyconego wodą.

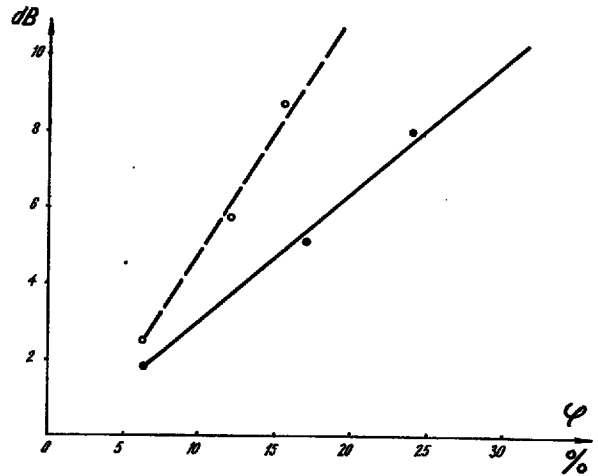
pominięty całkowicie jedynie w odniesieniu do górotworu suchego, w którym prędkość fali akustycznej praktycznie jest niezależna od temperatury. Natomiast, gdy pory górotworu wypełni ciecz wpływ temperatury na prędkość fali akustycznej staje się zupełnie wyraźny. Wskazują na to wyniki pomiarów przeprowadzonych przez autora na próbkach piaskowca o różnej porowatości, nasyconych naftą lub wodą (ryc. 7, 8).

Przy wzroście temperatury od +5°C do ok. +80°C zmiany prędkości sięgają 10%. Bezpośrednią przyczyną zjawiska jest zmienność ściślności cieczy w funkcji temperatury. Ściślność wody maleje pod wpływem ogrzewania i dlatego w ośrodku przez nią nasyconym prędkość fali akustycznej rośnie. Odwrotnie jest przy nasyceniu por naftą, ponieważ jej ściślność wzrasta wraz z temperaturą (4).

Przy obniżeniu temperatury do wartości, przy której ciecz w porach zamarza warunki propagacji



Ryc. 7. Zależność prędkości fali akustycznej od temperatury piaskowca nasyconego naftą.



Ryc. 9. Zależność tłumienia fali akustycznej od stopnia porowatości piaskowca suchego (---) i nasyconego wodą (—).

----- wyniki obliczone, O ● wyniki pomiarów.

fali akustycznej ulegają zasadniczej zmianie. Mamy bowiem wtedy do czynienia z ośrodkiem o zanikomej porowatości, zbudowanym ze ściśle połączonych ze sobą ziarn łożu i górotworu. W takim przypadku prędkość fali akustycznej uwarunkowana jest prędkościami w składnikach ośrodka oraz procentową zawartością tych składników (3):

$$C = \frac{C_g P_g + C_l P_l}{\sum P} \dots \dots \dots [5]$$

gdzie:

- C_g — prędkość fali akustycznej w ziarnach górotworu,
- C_l — prędkość fali akustycznej w łożu,
- P_g — procentowa zawartość ziarn górotworu,
- P_l — procentowa zawartość ziarn łożu.

Tabela I

Rodzaj górotworu	T °C		Wytrzymałość na ściskanie kG/cm ²	
	-5	-15	-5	-15
Piasek drobnoziarnisty	2412	3101	22	82
Piasek średnioziarnisty	2092	2860	16	51
Piasek gruboziarnisty	2094	3972	76	190
Pospółka	2587	4419	66	148
Il szary	2620	2844	26	74

Podstawiając do wzoru [5] odpowiednie wartości liczbowe (np. $C_p = 5000$ m/sek, $C_i = 3200$ m/sek, $P_g = 40\%$ oraz $P_l = 60\%$) stwierdzamy, że prędkość fali akustycznej w górotworze zawodnionym, a następnie zamrożonym wynosi ok. 3900 m/sek, a więc jest znacznie większa niż w górotworze suchym. Świadczą o tym również wyniki doświadczalne uzyskane za pomocą pomiarów dokonywanych przez Katedrę Głębinienia Szybów i Obudowy Górniczej Akademii Górniczo-Hutniczej (tab.).

Charakterystyczne jest, iż obniżenie temperatury już po zamrożeniu wody w porach górotworu powoduje dalszy i to znaczny wzrost prędkości fali akustycznej, aczkolwiek prędkość ta w samym lodzie lub w ziarnach ośrodka (kwarc, skałen) nie ulega takim zmianom. Zjawisko to należy przypisać wzrostowi spoiwości elementów składowych górotworu w miarę zwiększenia stopnia jego zamrażania, co potwierdzają zresztą badania nad korekcją właściwości mechanicznych zamrożonego górotworu z prędkością fal akustycznych, prowadzone przez Katedrę Głębinienia Szybów i Obudowy Górniczej AGH. Niektóre przykładowe wyniki tych badań, a mianowicie wytrzymałość górotworu na ściskanie i prędkość rozchodzenia się w nim fali akustycznej przy różnych temperaturach ujemnych zestawiono w tabeli (5).

Drugi podstawowy wskaźnik rozchodzenia się fali akustycznej, tzn. jej tłumienie jest w przypadku górotworu trudny do dokładnego określenia zarówno metodą rachunkową, jak i pomiarową. Przy obliczeniach dużą przeszkodę stanowi niemożliwość precyzyjnego uwzględnienia wszystkich czynników, od których zależy wielkość tłumienia. Natomiast pomiar obarczony jest zazwyczaj znacznym błędem (ok. 10%—20%) ze względu na nie dające się dokładnie określić straty energii akustycznej, występujące przy przechodzeniu fali przez strefy kontaktowe między górotworem a nadajnikiem i odbiornikiem. Dlatego w praktyce wykorzystuje się raczej pomiar tłumienia względnego, pozwalający obserwować zmiany amplitudy fali akustycznej w stosunku do jakiejś wybranej stałej wartości odniesienia. Zmiany te (wywołane zmianami właściwości ośrodka) dostarczają niekiedy cennych informacji o ośrodku.

W górotworze porowatym o temperaturze dodatniej tłumienie fali akustycznej określić można w przybliżeniu następującą zależnością (4):

$$\delta = \frac{\varphi(Z_2 - 1)}{\sigma(Z_2)^{1/2}(Z_2 - Z_1)} \left(\frac{f}{f_c}\right)^{1/2} \quad [6]$$

gdzie:

- δ — tłumienie fali akustycznej,
- φ — porowatość ośrodka,
- Z_1, Z_2 — stałe ośrodka oraz wypełniacza jego por,
- σ — stała sprężystości ośrodka,
- f — częstotliwość fali akustycznej,

f_c — częstotliwość charakterystyczna ośrodka, zależna od geometrii jego por i ich wypełniacza.

Tłumienie fali akustycznej spowodowane jest głównie zjawiskiem tarcia, wywołanego ruchami ziarn ośrodka oraz wypełniacza jego por pod wpływem rozchodzącego się zaburzenia mechanicznego. Przy wypełnieniu por cieczą znaczną rolę w procesie tłumienia odgrywa jej lepkość. Ogólnie można stwierdzić, że tłumienie fali akustycznej w górotworze jest wprost proporcjonalne do jego porowatości oraz do pierwiastka częstotliwości drgań. Zmiany temperatury w zakresie od +5°C do ok. 100°C nie wpływają na tłumienie zarówno w górotworze suchym, jak i nasyconym wodą lub naftą.

Na ryc. 9 przedstawiona jest przykładowo obliczona i pomierzona zależność tłumienia fali akustycznej o częstotliwości ok. 20 kHz od porowatości piaskowca suchego i nasyconego wodą. Nasycenie to powoduje pewne zmniejszenie tłumienia.

W temperaturach ujemnych (po zamrożeniu wody w porach) górotwór staje się ośrodkiem zbliżonym do polikrystalicznego. Tłumienie fal akustycznych o długościach znacznie większych od wymiarów ziarn takiego ośrodka (a właśnie w praktyce warunk ten jest spełniany) spowodowane jest stratami termicznymi oraz relaksacyjnymi (3). Określa je w przybliżeniu wzór:

$$\delta = \frac{(E_a - E_i) \pi x}{2a^2 E_i f \rho C_p} + \frac{2(E_a - E_i) \sqrt{h}}{a E_i f} \quad [7]$$

gdzie:

- a — średni wymiar ziarn ośrodka,
- C_p — ciepło właściwe ziaren,
- E_a — adiabaticzny moduł sprężystości ziaren,
- E_i — izotermiczny moduł sprężystości ziaren,
- f — częstotliwość fali akustycznej,
- x —
- $h = \frac{x}{\rho C_p}$
- x — przewodność cieplna ziaren,
- ρ — gęstość ziaren.

Ponieważ rozpatrywany ośrodek składa się z ziaren górotworu i lodu więc występujące we wzorze [7] współczynniki muszą posiadać wartości średnie, obliczone podobnie jak w [5]. Pierwszy człon wzoru [7] przedstawia tłumienie relaksacyjne, drugi — tłumienie termiczne. Tłumienie relaksacyjne maleje ze wzrostem kwadratu wielkości ziaren i osiąga duże wartości w ośrodku drobnoziarnistym o dobrej przewodności cieplnej. Tłumienie termiczne jest odwrotnie proporcjonalne do wielkości ziaren oraz do częstotliwości. Stąd wniosek, iż przede wszystkim występuje ono w ośrodku drobnoziarnistym i przy niższych częstotliwościach.

Rozpatrywane tłumienie fali akustycznej powodowane jest przez sam ośrodek, w którym się ona rozchodzi, a ściślej mówiąc przez zjawiska termiczne i mechaniczne, zachodzące w ośrodku. Zjawiska te są przyczyną nieodwracalnej zmiany części energii akustycznej na ciepło. W pewnych, specyficznych warunkach występuje dodatkowo jeszcze inne tłumienie, wywołane pochłanianiem energii akustycznej przez otoczenia. Ma to przeważnie miejsce wówczas, gdy ośrodek dobrze przewodzący fale akustyczne graniczy z innym ośrodkiem o złej przewodności akustycznej. Ten ostatni ośrodek pochłania pewną część energii akustycznej, wskutek czego amplituda fali ulega zmniejszeniu. Jako przykład służyć może szyna stalowa, wbita częściowo w piasek. Wytworzona na wolnym końcu szyny fala akustyczna rozchodzi się z dużą amplitudą jedynie na odcinku otoczonego przez powietrze, natomiast na odcinku szyny umieszczonego w piasku amplituda maleje wielokrotnie.

Przedstawione powyżej związki, występujące między niektórymi właściwościami górotworu a prędkością lub tłumieniem rozchodzących się w nim fal akustycznych, stosowane są coraz szerzej w praktyce do nieniszczącego kontrolowania tych właściwości za

(Summary will be inserted with the second part of the paper, in the next number)

pomocą odpowiednich pomiarów. Najczęściej wykorzystuje się do tego celu pomiar prędkości fali akustycznej, ponieważ wskaźnik ten daje się łatwo obliczać i mierzyć z wystarczającą dokładnością.

(Резюме будет помещено после второй части в следующем номере журнала)