

MATERIAŁY POMOCNICZE DO WYKŁADU Z PODSTAW ZASTOSOWAŃ ULTRADŹWIĘKÓW W MEDYCYNIE

(wyłącznie do celów dydaktycznych – zakaz rozpowszechniania)

2. Prędkość propagacji i tłumienie fal ultradźwiękowych w ośrodkach biologicznych. Ukośne i prostopadle padanie fal ultradźwiękowych na granice ośrodków.

S2-S5. Prędkość propagacji fali ultradźwiękowej

prędkość fazowa prędkość grupowa ogólnie, prędkość dla każdego ośrodka

$$c = c_f = \frac{\omega}{k} \qquad c_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} = c_f - \lambda \frac{dc_f}{d\lambda} \qquad c = \sqrt{\frac{1}{\rho \cdot C_o}}$$

Ciecze	Ciała stałe	Gazy
$c = \sqrt{\frac{1}{\rho \cdot \beta_a}}$	$c_L = \sqrt{\frac{K + \frac{4G}{3}}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1-2\nu)(1+\nu)}}$	$c = \sqrt{\frac{P \cdot \kappa}{\rho}}$
	$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}$	

$K = E/(3(1-2\nu))$ [Pa] – współczynnik sprężystości objętościowej (moduł ściśliwości);
 $K = -Vdp/dV$

$E = 2G(1+\nu)$ [Pa] - moduł Younga;

$E = \sigma/\varepsilon$ (względne odkształcenie liniowe materiału od naprężenia);

G [Pa] - moduł Kirchhoffa; $G = \tau/\gamma$ (odkształcenie postaciowe do naprężenia);

ν – bezwymiarowy współczynnik Poissona;

$\nu = -\varepsilon_n/\varepsilon_m$ (odkształcenie poprzeczne do podłużnego przy osiowym stanie naprężenia);

S6. Fale poprzeczne w tkankach (TW – transversal wave)

Tkanka	ρ [kg/m ³]	c_L [m/s]	c_T [m/s]
tłuszcz	937	1479	51.8
mięsień	1070	1532	48.5
kość	1780	3380	1940

$f = 1$ MHz, $t = 37$ °C

S7-S9. Prędkość dźwięku fali podłużnej dla różnych rodzajów ośrodków biologicznych ciała ludzkiego, wybranych ciał stałych, cieczy i gazów

średnia prędkość w tkance miękkiej 1540 m/s, gęstość 1058 kg/m³;
tkanka bez tłuszczu 1575 m/s, z tłuszczem 1465 m/s;

kość gąbczasta 2700 m/s fast, 1400 m/s slow; gęstość 1140 kg/m³;
kość zbita 4040 m/s, gęstość 1900 kg/m³;

powietrze: $c = 353$ m/s; gęstość 1.138 kg/m³;
woda 1524 m/s, gęstość 993 kg/m³ w temperaturze 37 °C

S10. Zmiany prędkości dźwięku z temperaturą w wodzie morskiej

Wzór Claya i Edwina ($P = 1$ atm na powierzchni):

$$c_{sw} = 1449.2 + 4.6 \cdot t - 5.5 \cdot 10^{-2} \cdot t^2 + 0.29 \cdot 10^{-3} \cdot t^3 + (1.34 - 0.01 \cdot t) \cdot (0.1 \cdot s - 35) + 0.016d$$

$$\Delta c / \Delta t \approx 4.6 \text{ (m/s)/}^\circ\text{C}; \quad \Delta c / \Delta s \approx 0.134 \text{ (m/s)/}\% ; \quad \Delta c / \Delta d \approx 0.016 \text{ (m/s)/m}$$

S11. Dyspersja prędkości dźwięku (wartości)

Małe zmiany:

- roztwory hemoglobiny: 0.165 (m/s)/MHz
- tkanka mózgu ludzkiego: 0.3 (m/s)/MHz
- wątroba szczura: 0.5 (m/s)/MHz
- mięsień sercowy szczura: 0.22 (m/s)/MHz

Duże zmiany:

- płuca z zaw. 60% powietrza: 138 (m/s)/MHz, (tj. od 644 m/s przy 1 MHz do 1472 m/s przy 7 MHz)
- tkanka kostna: 1 ÷ 12 % dla 1 ÷ 3 MHz

S12-S.13. Prędkość dźwięku o dużym natężeniu

Dla silnych dźwięków (ultradźwięków) prędkość propagacji jest większa.

$$c = c_o + \Delta c_{NL} = c_o + \frac{B}{2A} \cdot v_a$$

$c = 1540$ m/s; $\rho = 1058$ kg/m³; $Z = 1.62 \cdot 10^6$ kg/(m²·s);
wartość $B/A = 10$ przyjęto dla tkanki tłuszczowej

Natężenie I [W/cm ²]	Ciśnienie p [kPa]	Δc_{NL} [m/s]
0.001	6	0.02
0.01	18	0.06
0.1	56	0.17
1	178	0.55
10	563	1.74
100	1782	5.50

S14. Anizotropia prędkości dźwięku

Anizotropia prędkości dźwięku występuje w zależności od kierunku propagacji fali ultradźwiękowej.

S15-S16. Tłumienie fali ultradźwiękowej (podstawowe zależności)

$$\alpha = \frac{1}{2d} \cdot \ln\left(\frac{I_o}{I_d}\right) = \frac{1}{d} \cdot \ln\left(\frac{p_o}{p_d}\right) \quad I_d = I_o \cdot e^{-2\alpha d} \quad \mu = 2 \cdot \alpha$$

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_s$$

S17-S18. Współczynnik rozproszenia

Całkowity energetyczny współczynnik rozproszenia fali ultradźwiękowej w ośrodkach biologicznych to całkowita moc rozproszona przez jednostkową objętość ośrodka, odniesiona do tej objętości i do jednostkowego natężenia fali padającej.

$$\mu_s = a \cdot f^b$$

Energetyczny kierunkowy współczynnik rozproszenia - moc rozproszona przez jednostkową objętość ośrodka w jednostkowy kąt bryłowy dla zadanego kierunku, odniesiona do tej objętości i kąta oraz do jednostkowego natężenia fali padającej. Współczynnik ten określany jest najczęściej dla kierunku przeciwnego μ_{bs} lub zgodnego μ_{fs} z propagacją fali ultradźwiękowej.

S19. Współczynnik absorpcji

$$\alpha_a = \alpha_v + \alpha_{hc} + \alpha_R$$

$$\alpha_a = \left(\frac{2\pi^2}{\lambda^2 \rho c} \left(\frac{4}{3} \eta + \xi \right) \right) + \left(\frac{2\pi^2 f^2}{\rho c^3} \frac{(\kappa - 1) \cdot k_t}{c_p} \right) + \left(\sum_j \frac{A_j}{f^2 + \frac{1}{f_{Rj}^2}} \right)$$

$$\alpha_a = \frac{\omega^2}{2\rho c^3} \left(\frac{4}{3} \eta + \xi + \frac{(\kappa - 1) \cdot k_t}{c_p} \right) + f^2 \sum_j \frac{A_j}{1 + \left(\frac{f}{f_{Rj}} \right)^2}$$

W praktyce, przyrost prędkości dźwięku w obszarze dyspersji związanej z relaksacją molekularną dla ośrodków biologicznych, w zakresie 1 ÷ 10 MHz jest zwykle mniejszy niż 1%.

S20-22. Współczynnik absorpcji tkanek miękkich i wody

$$\alpha_a = \alpha_{a1} \left(\frac{f}{f_1} \right)^n \quad \alpha_a = \alpha_{a1} \left(\frac{f}{f_1} \right)^2$$

$$\alpha \approx 0.0014 \text{ (dB/cm)/MHz}^2 \approx 0.0161 \text{ (Np/m)/MHz}^2$$

S23. Średnie wartości tłumienia ultradźwięków w tkankach miękkich

$\alpha = 0.5$ (dB/cm)/MHz ≈ 5.8 (Np/m)/MHz – średnia wartość

$\alpha = 0.3$ (dB/cm)/MHz ≈ 3.5 (Np/m)/MHz – średnia wartość dla tkanek bez tłuszczu

$\alpha = 0.6$ (dB/cm)/MHz ≈ 6.9 (Np/m)/MHz – średnia wartość dla tkanek z tłuszczem

Wzrost zawartości tłuszczu i kolagenu w tkance powoduje wzrost współczynnika tłumienia.

S24. Tłumienie w tkankach twardych (E.Talarczyk – skrypt)

Zależność tłumienia od częstotliwości jest liniowa w materiałach niekryształicznych (np. szkło, topiony kwarc). W materiałach kryształicznych (np. metale, **kości, zęby**), dla większych częstotliwości zaczyna odgrywać rolę rozproszenie energii na skutek wielokrotnych odbić fali od poszczególnych krystalitów, których wielkość staje się bliska długości fali. Rozproszenie to powoduje gwałtowny wzrost tłumienia.

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_a \cdot f + \alpha_s \cdot f^4 & \text{dla } \frac{D_z}{\lambda} < \frac{1}{3}, \quad \alpha_s \sim D_z^3 \\ \alpha_a \cdot f + \alpha_s \cdot f^2 & \text{dla } \frac{D_z}{\lambda} \rightarrow 1 \quad \alpha_s \sim D_z \\ \alpha_a \cdot f + \alpha_s \cdot f^2 & \text{dla } \frac{D_z}{\lambda} > 1 \quad \alpha_s \sim \frac{1}{D_z} \end{cases}$$

W ZĘBACH tłumienie $8 \div 20$ dB/mm przy 18 MHz.

$\alpha_{kości} \approx 4 \div 24$ (dB/cm)/MHz² $\approx 46 \div 276$ (Np/m)/MHz²

S25. Tłumienie w ośrodkach gazowych

Obowiązuje ogólny wzór na tłumienie.

Powietrze, $t = 37^\circ\text{C}$, wilgotność = 33.5% $\rightarrow \alpha \approx 1.7$ (dB/cm)/MHz² ≈ 19.6 (Np/m)/MHz²

S26-S27. Średnie wartości tłumienia tkanek

$t = 37^\circ\text{C}$, $f = 1$ MHz

Ośrodek	α [dB/cm]
woda	0.0014
krew	0.2
tłuszcz	0.6
mięśnie	$1.8 \div 3.3$
mózg	0.9
kość gąbczasta	24
kość zbita	4.4
powietrze	1.7

S28. Tłumienie fal poprzecznych

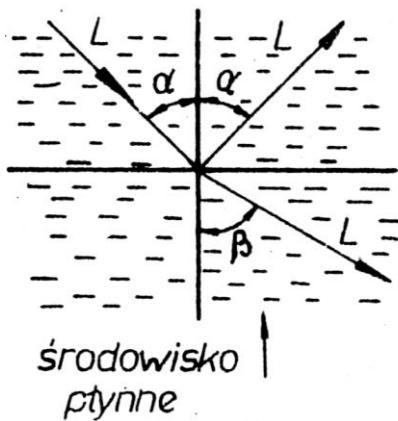
Tkanka	α_L [dB/cm]	α_L [Np/m]	α_T [dB/cm]	α_T [Np/m]
tłuszcz	0.35	4	~10400	1.2·10 ⁵
mięsień	1.04	12	~10400	1.2·10 ⁵
kość	13.2	152	22.6	260

$f = 1 \text{ MHz}$, $t = 37^\circ \text{C}$

S29. Ukośne padanie fali ultradźwiękowej na granicę dwóch ośrodków

- przenikanie
- odbicie
- załamanie
- rozszczepienie

S30-35. Ukośne padanie fali ultradźwiękowej na granicę dwóch ośrodków



$$I_r = I_e \frac{\left(1 - m \frac{\cos \beta}{\cos \alpha}\right)^2}{\left(1 + m \frac{\cos \beta}{\cos \alpha}\right)^2} \quad \text{gdzie} \quad m = \frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2} = \frac{Z_1}{Z_2}$$

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2}$$

wzór snella

$$R = \frac{I_r}{I_e} \quad D = \frac{I_d}{I_e}$$

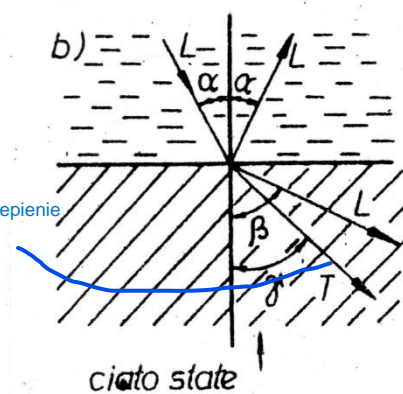
wsp. odbicia

wsp. przenikania

(energetyczne)

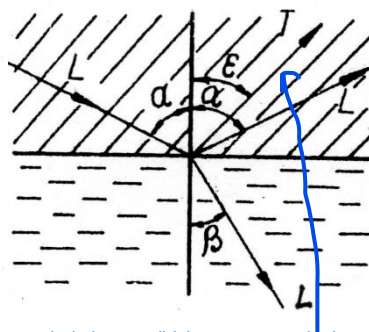
$$I_e = I_r + I_d \quad D = 1 - R$$

w środowisku płynnym tylko fale podune

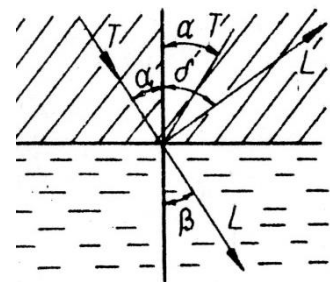


dodatkowo rozszczepienie na fal poprzeczną

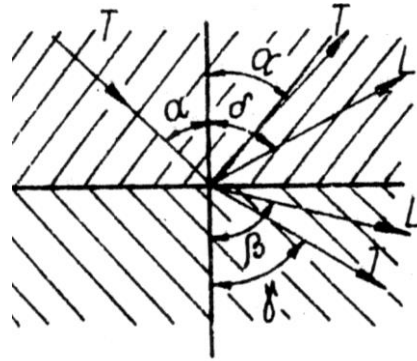
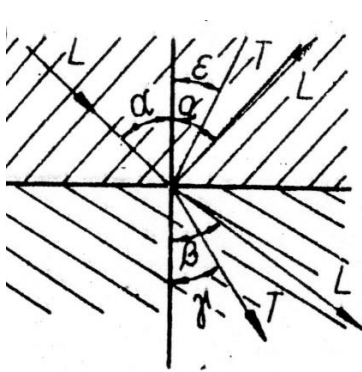
h



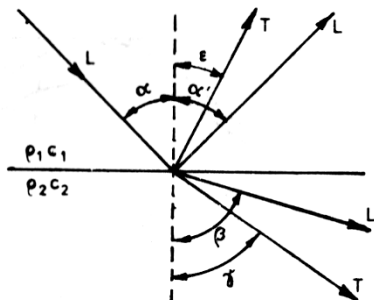
dodatkowo odbicie z rozszczepieniem



padanie fali poprzecznej- dodatkowo tworzy się poduna



S.36-41. Granica dwóch ciał stałych i kąty krytyczne



fala poprzeczna spolaryzowana
w płaszczyźnie rysunku

$$\frac{\sin \alpha}{c_{L_1}} = \frac{\sin \beta}{c_{L_2}} = \frac{\sin \gamma}{c_{T_2}} = \frac{\sin \varepsilon}{c_{T_1}}$$

$$\beta = 90^\circ \Rightarrow \sin \alpha_{kr} = \frac{c_{L_1}}{c_{L_2}} \quad \text{1-wszy kat krytyczny}$$

$$\gamma = 90^\circ \Rightarrow \sin \alpha_{kr} = \frac{c_{L_1}}{c_{T_2}} \quad \text{drugi kat krytyczny}$$

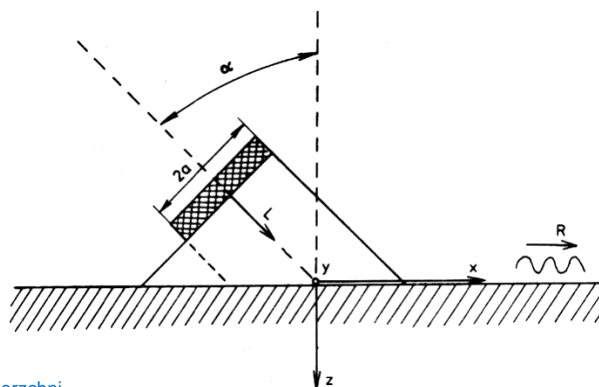
Fala powierzchniowa Rayleigha (L i T po powierzchni)
Maksymalna amplituda fali R, gdy kąt krytyczny 3-ci, czyli $\alpha_R > \alpha_{kr2}$

$$\sin \alpha_R = \frac{c_{L_1}}{c_R}$$

3-ci kat krytyczny

$$\frac{c_R}{c_T} = \frac{0.87 + 1.12\sigma}{1 + \sigma}$$

sigma - bezwymiarowy współczynnik Poissona



ok 0,9 od prędkości fali poprzecznej
padającej?

tylko powierzchniowa Rayleigh'a (sa inne
powierzchniowe)

Fala powierzchniowa - mniejsze straty, bo
mniejsza rozbieżność wiązki

Fala Rayleigh'a rozchodzi się na powierzchni
na wysokości długości fali ma już tylko 5% mocy/amplitudy

fala podłuna

fala poprzeczna

w tym miejscu chcemy tworzyć fale poprzeczne

1-wszy kat krytyczny

2-gi kat krytyczny

S.43-S.45. Prostopadłe padanie fali ultradźwiękowej na granicę środowisk

Odbicie i przenikanie, energetyczne wsp. przenikania i odbicia

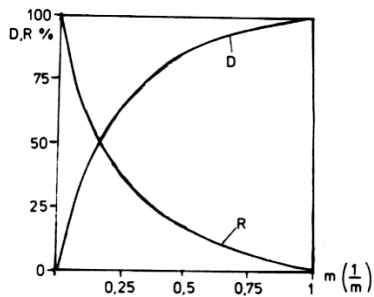
$$I_r = I_e \frac{\left(1 - m \frac{\cos \beta}{\cos \alpha}\right)^2}{\left(1 + m \frac{\cos \beta}{\cos \alpha}\right)^2} \quad \text{gdzie} \quad m = \frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2} = \frac{Z_1}{Z_2} \quad \text{impedancje akustyczne}$$

Dla $\alpha = \beta = 0$ ze wzoru wynika, że $R = \left(\frac{1-m}{1+m}\right)^2$

$$D = 1 - R \quad D = \frac{4m}{(1+m)^2}$$

strata energii dla współczynników energetycznych nie zależy od kierunku padania fali
przejście ciało stałe-ciecz = ciecz-ciało stałe

podstawienie $m = 1/m$



S.46-S.47. Prostopadłe padanie fali ultradźwiękowej na granicę środowisk

Amplitudowe wsp. przenikania i odbicia

$$p_e = P_e \sin(\omega t - \beta_1 l) = \rho_1 c_1 v_e$$

l - odległość od granicy

β - liczba falowa = $2\pi/\lambda$

współczynniki amplitudowe

$$p_r = P_r \sin(\omega t + \beta_1 l) = -\rho_1 c_1 v_r$$

v - prędkość akustyczna

β_2 (bo przeszła do drugiego ośrodka = $2\pi/\lambda_2$)

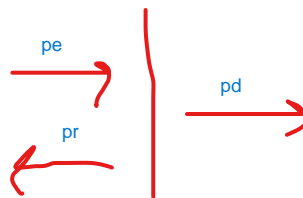
$$p_d = P_d \sin(\omega t - \beta_2 l) = \rho_2 c_2 v_d$$

ciągłość ciśnień i prędkości akustycznych na granicy

$$p_d = p_e + p_r \quad v_d = v_e + v_r$$

$$\frac{P_d}{\rho_2 c_2} = \frac{P_e}{\rho_1 c_1} - \frac{P_r}{\rho_1 c_1}$$

$$P_d = P_e + P_r$$



(energetyczny w kwadracie)

wsp. odbicia
ciśnienia
akustycznego
amplitudowego

$R' = \frac{P_r}{P_e} = \frac{1-m}{1+m}$	$R'' = \frac{V_r}{V_e} = -\frac{1-m}{1+m}$
$D' = \frac{P_d}{P_e} = \frac{2}{1+m}$	$D'' = \frac{V_d}{V_e} = \frac{2m}{1+m}$

dla prędkości akustycznej

amplitudowy dla
ciśnienia

$$D' = 1 + R'$$

$$D'' = 1 + R''$$

$$R = R' \cdot R''$$

$$D = D' \cdot D''$$

te zależą od kierunku padania fali

pleksi

prostopadłe padanie fali ultradźwiękowej na granice ośrodków: a polimeru-wody? znaleźć link

S.48. Energetyczne współczynniki odbicia fali ultradźwiękowej od granic struktur biologicznych [%]

	WODA	PLEKSI	TŁUSZCZ	MIĘŚNIE	WATROBA	NERKA	KREW	SOCZEWKA OKA	MÓZG	KOŚĆ CZASZKI
WODA	----									
PLEKSI	13	----								
TŁUSZCZ	0.5	17.6	----							
MIĘŚNIE	0.4	9.2	1.8	----						
WĄTROBA	0.32	9.5	1.6	0.003	----					
NERKA	0.17	10.4	1.3	0.04	0.002	----				
KREW	0.05	11.5	0.9	0.16	0.11	0.035	----			
SOCZEWKA OKA	0.6	8.4	2.1	0.02	----	----	0.3	----		
MÓZG	0.12	10.7	1.1	0.073	----	----	0.016	----	----	
KOŚĆ CZASZKI	46.5	18.4	51.6	42	----	----	45	----	44	----

$$R = \left(\frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \right)^2$$

$$D = 1 - R$$