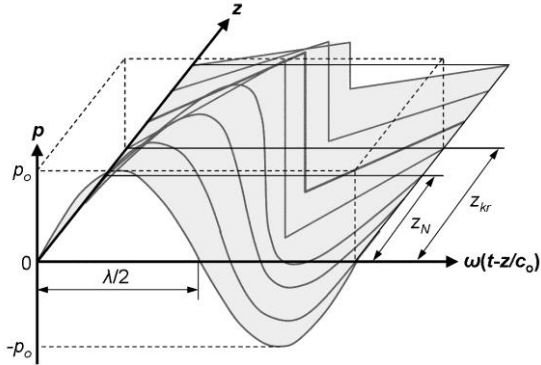


MATERIAŁY POMOCNICZE DO WYKŁADU Z BIO- i HYDROAKUSTYKI

2. Nieliniowe właściwości wody i ośrodków biologicznych

S2. Nieliniowa propagacja fali (wyjaśnienie zjawiska)



$$z_N = (\rho_0 \cdot c_0^3) / (\omega \cdot \varepsilon \cdot p_0)$$

$$\varepsilon = (B/A)/2 + 1$$

$$z_{kr} = z_N \cdot \pi/2$$

W przypadku dużych natężeń, fala ultradźwiękowa propagowana w wodzie i w ośrodku biologicznym ulega stopniowemu zniekształceniu. Mechanizm tego zjawiska jest analogiczny jak w przypadku powstawania fal uderzeniowych rozchodzących się w ośrodku gazowym.

S3,S4. Parametry nieliniowości ośrodka

Akustyczna liczba Reynoldsa – ma charakter kryterialny.

$$Re_a = \frac{p}{\left(\frac{4}{3}\eta + \xi\right) \cdot \omega}$$

S4. Parametry nieliniowości ośrodka

$$Ma = \frac{V_{a_max}}{c_0}$$

S8. Parametry nieliniowości ośrodka

$$\frac{B}{A} = \frac{\rho_0}{c_0^2} \left(\frac{\partial^2 P}{\partial \rho^2} \right)_{s_0, \rho_0} \quad \frac{B}{A} = 2\rho_0 c_0 \left(\frac{\partial c}{\partial P} \right)_{s_0, \rho_0} \quad \varepsilon = 1 + \frac{B}{2A} \quad \frac{C}{A} = \frac{3}{2} \left(\frac{B}{A} \right)^2 + 2\rho_0^2 c_0^3 \left(\frac{\partial^2 c}{\partial P^2} \right)_{s_0, \rho_0}$$

S9. Parametry nieliniowości gazu

$$\frac{B}{A} = \kappa - 1 \quad \frac{C}{A} = (\kappa - 1) \cdot (\kappa - 2)$$

S10. Parametry nieliniowości ciał stałych

$$\varepsilon = -\left(\frac{3}{2} + \frac{A + 3B + C}{\rho_0 c_L^2} \right) \quad \varepsilon' = \frac{A_2}{A_1^2}$$

S12. Wpływ nieliniowości na prędkość dźwięku

$$c = c_0 + \Delta c_{NL} = c_0 + \frac{B}{2A} \cdot v_a$$

S13. Wpływ nieliniowości na tłumienie dźwięku (dla małych i dużych zniekształceń)

Małe zniekształcenia nieliniowe, maks. tłumienie: $\left(\frac{\alpha_N}{\alpha_o}\right)_{\max} = \left(\frac{\alpha}{\alpha_o}\right)_{\max} - 1 = 0.12 \cdot \varepsilon^2 \cdot Re_a^2$

Duże zniekształcenia nieliniowe: $\alpha_N = \alpha - \alpha_o = \alpha_o \left(\frac{2 \varepsilon Re_a}{1 + \frac{z}{z_N}} \right)$ $z_N = (\rho_o c_o^3) / (\omega \varepsilon p_o)$
 $z_{kr} = z_N \cdot \pi / 2$

S14. Wpływ nieliniowości na tłumienie dźwięku (wzór ogólny)

$$\alpha = \alpha_o + \alpha_N = \frac{1}{2z} \ln \left(\frac{I_L(z)}{I_{NL}(z)} \right)$$

W zakresie częstotliwości 1 ÷ 10 MHz. współczynnik tłumienia w warunkach nieliniowej propagacji α_N stanowi odpowiednio w etanolu 104 ÷ 135 % współczynnika tłumienia w warunkach liniowych α_o , w przypadku wody 101 ÷ 106 %, we krwi 73 ÷ 99 %, a w tkance wątroby 30 ÷ 89 %. W odpowiednich warunkach, efekty nieliniowe mogą znacząco wpływać na błędy pomiaru tłumienia i absorpcji w ośrodkach biologicznych.

S15. Kryterium graniczne stosowalności akustyki liniowej

$$\left(\frac{\alpha_N}{\alpha_o}\right)_{\max} = \left(\frac{\alpha}{\alpha_o}\right)_{\max} - 1 = 0.12 \cdot \varepsilon^2 \cdot Re_a^2 \quad \left| \frac{\Delta \alpha}{\alpha_o} \right| > 0.12 \cdot \varepsilon^2 Re_a^2$$

$$p = \sqrt{2I\rho_o c_o} = \frac{2\alpha_o \rho_o c_o^3 Re_a}{\omega}$$

Efekty nieliniowe w wodzie są już mierzalne przy natężeniu rzędu 0.1 mW/cm² ($Ma = 10^{-6}$).

S16. Granica stosowalności akustyki liniowej w wodzie destylowanej i morskiej

f [MHz]	p_o [kPa]	I [mW/cm ²]	α_o [dB/m]	V_a [mm/s]	Ma	z_{kr} [m]
woda destylowana: $t = 20$ °C, $\rho = 998$ kg/m³, $c_o = 1482$ m/s						
0.6	3.576	0.43	0.072	2.4	$1.6 \cdot 10^{-6}$	66
1	5.945	1.20	0.20	4.4	$2.7 \cdot 10^{-6}$	24
woda morska: $s = 35$ ‰, $t = 20$ °C, $\rho = 1025$ kg/m³, $c_o = 1521$ m/s						
0.6	9.439	2.8	0.174	6.1	$4.0 \cdot 10^{-6}$	28
1	10.172	3.2	0.304	6.4	$4.2 \cdot 10^{-6}$	16

małe zniekształcenia nieliniowe fali: $Re_a < 1$

odległość krytyczna: $z_{kr} = \ln(\sqrt{3}) / \alpha_o$