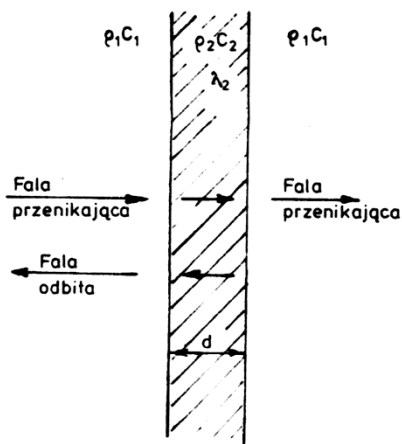


**MATERIAŁY POMOCNICZE DO WYKŁADU
Z PODSTAW ZASTOSOWAŃ ULTRADŹWIĘKÓW W MEDYCYNIE**
(wyłącznie do celów dydaktycznych – zakaz rozpowszechniania)

**3. Przenikanie ultradźwięków przez ośrodki warstwowe. Fala stojąca.
Systematyka zjawisk. Ciśnienie promieniowania. Kawitacja.**

S2-3. Przenikanie ultradźwięków przez ośrodki warstwowe (Talarczyk E. Podstawy techniki ultradźwięków, Wrocław, 1990)

Amplitudowe wsp. odbicia i przenikania



$$R_1 = \frac{(m^2 - 1)^2}{4m^2 \operatorname{ctg}^2\left(\frac{2\pi d}{\lambda_2}\right) + (m^2 + 1)^2}$$

gdzie $m = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2}$

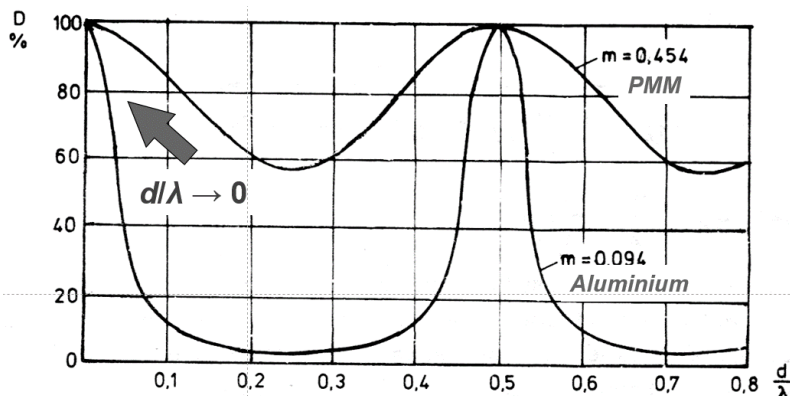
$$R_{\max} = \frac{(m^2 - 1)^2}{(m^2 + 1)^2} \quad \text{dla} \quad \operatorname{ctg}\left(\frac{2\pi d}{\lambda_2}\right) = 0$$

wtedy: $\frac{2\pi d}{\lambda_2} = (2n+1) \cdot \frac{\pi}{2}$ czyli $d = (2n+1) \cdot \frac{\lambda_2}{4}$ dla $n = 0, 1, 2, \dots$

$$D_{\max} = 1 \quad \text{dla} \quad R_{\min} \quad \text{dla} \quad \operatorname{ctg}\left(\frac{2\pi d}{\lambda_2}\right) = \pm \infty$$

wtedy: $\frac{2\pi d}{\lambda_2} = n \cdot \pi$ czyli $d = n \cdot \frac{\lambda_2}{2}$ dla $n = 0, 1, 2, \dots$

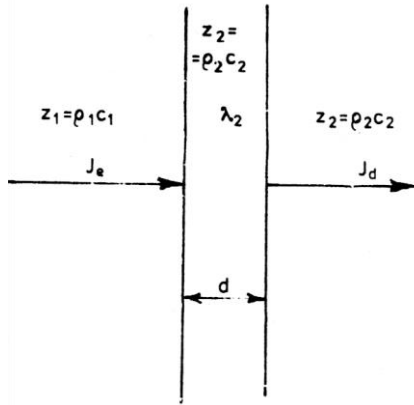
S4. Przenikanie ultradźwięków przez ośrodki warstwowe (Talarczyk E. Podstawy techniki ultradźwięków, Wrocław, 1990)



S5-6. Przenikanie ultradźwięków przez ośrodki warstwowe (Talarczyk E. Podstawy techniki ultradźwięków, Wrocław, 1990)

3 środowiska

$$D = \frac{8}{4 + (m_{12} + m_{21})(m_{23} + m_{32}) + (m_{12} - m_{21})(m_{23} - m_{32}) \cos\left(\frac{4\pi d}{\lambda_2}\right)} \quad \text{gdzie } m_{ik} = \frac{Z_i}{Z_k} = \frac{\rho_i c_i}{\rho_k c_k}$$



$$(m_{12} - m_{21})(m_{23} - m_{32}) > 0 \quad Z_1 > Z_2 > Z_3 \quad \text{lub} \quad Z_1 < Z_2 < Z_3$$

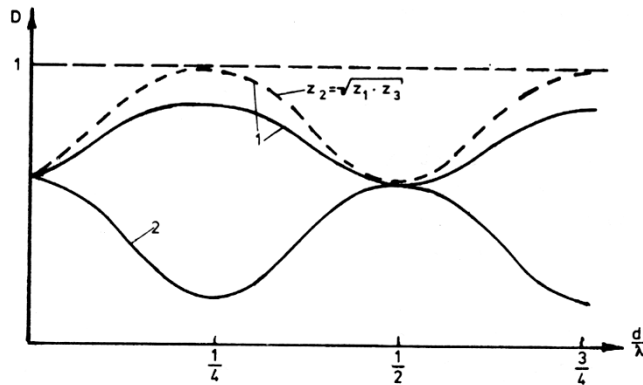
$$D_{\max} = \frac{4}{2 + \frac{Z_1 Z_3}{Z_2^2} + \frac{Z_2^2}{Z_1 Z_3}} \quad \text{dla } d = (2n+1) \frac{\lambda_2}{4}$$

$$D_{\max} = 1$$

$$Z_2 = \sqrt{Z_1 \cdot Z_3}$$

$$(m_{12} - m_{21})(m_{23} - m_{32}) < 0 \quad Z_1 < Z_2 > Z_3 \quad \text{lub} \quad Z_1 > Z_2 < Z_3$$

$$D_{\max} = \frac{4m_{13}}{(1+m_{13})^2} \quad \text{dla } d = n \frac{\lambda_2}{2}$$



S7. Fale stojące (Obraz J., Ultradźwięki w technice pomiarowej, WNT, Warszawa, 1983)

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

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

Obie fale interferują ze sobą.

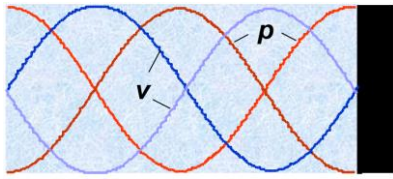
Powstaje pole o nierównomiernym rozkładzie ciśnienia:

- sumowanie ciśnień w zgodnej fazie (maksima),
- odejmowanie ciśnień w fazie przeciwnej (minima),
- maksima i minima występują w tych samych miejscach: powstaje fala stojąca.

Gdy $R < 1$ → część energii przechodzi przez przeszkodę (fala stojąca + biegnąca)

Gdy $R = 1$ → tylko fala stojąca

S8. Fale stojące (Obraz J., Ultradźwięki w technice pomiarowej, WNT, Warszawa, 1983)



$$\rho_1 c_1 \ll \rho_2 c_2 \quad m \approx 0 \Rightarrow R' = \frac{1-m}{1+m} \approx 1 \quad R'' = -\frac{1-m}{1+m} \approx -1$$

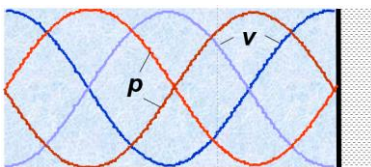
$$D' = \frac{2}{1+m} \approx 2 \quad D'' = \frac{2m}{1+m} \approx 0$$

W głąb przeszkody doskonale sztywnej wnika fala ciśnienia o podwójnej amplitudzie.

$$P_d = P_e + P_r \Rightarrow P_d \approx 2P_r \quad V_d = V_e + V_r \Rightarrow V_d \approx 0$$

Energia fali za przeszkodą = 0 ($D = D' \cdot D''$)

S9. Fale stojące (Obraz J., Ultradźwięki w technice pomiarowej, WNT, Warszawa, 1983)



$$\rho_1 c_1 \gg \rho_2 c_2 \quad m \rightarrow \infty \Rightarrow R' = \frac{1-m}{1+m} \approx -1 \quad R'' = -\frac{1-m}{1+m} \approx 1$$

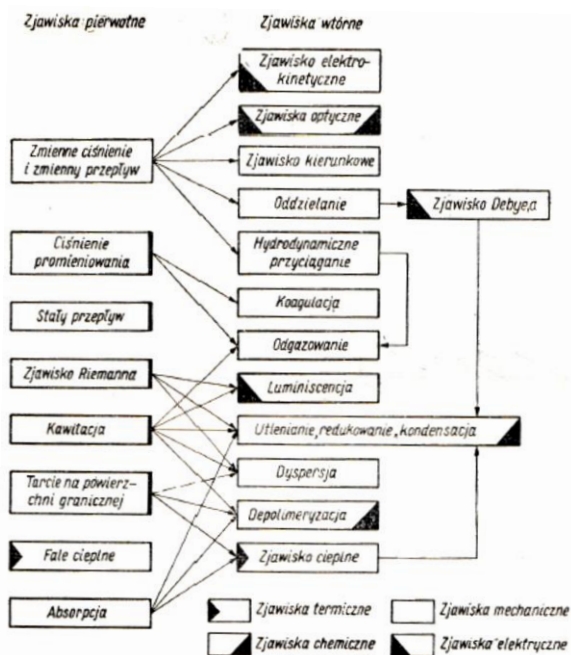
$$D' = \frac{2}{1+m} \approx 0 \quad D'' = \frac{2m}{1+m} \approx 2$$

W głąb przeszkody doskonale podatnej wnika fala prędkości o podwójnej amplitudzie.

$$P_d = P_e + P_r \Rightarrow P_d \approx 0 \quad V_d = V_e + V_r \Rightarrow V_d \approx 2V_r$$

Energia fali za przeszkodą = 0 ($D = D' \cdot D''$)

S10-13. Systematyka zjawisk ultradźwiękowych (wg Spenglera) (Matauszek J., Technika Ultradźwięków, WNT, Warszawa, 1957): ZJAWISKA PIERWOTNE



Zmienne ciśnienie i zmienny przepływ

Fale ciepłe (temperaturowe)

Stały przepływ ośrodka (wiatr kwarcowy, strumień akustyczny)

Zjawisko Riemanna (zniekształcenie czoła fali)

Tarcie na powierzchni granicznej

Absorpcja (pochłanianie)

S14-21. Systematyka zjawisk ultradźwiękowych (wg Spenglera) (Matauszek J., Technika Ultradźwięków, WNT, Warszawa, 1957): ZJAWISKA WTORNE

Zjawiska mechaniczne

Zjawiska kierunkowe:

Separacja:

Hydrodynamiczne siły przyciągania:

Koagulacja:

Odgazowanie cieczy i stopów:

Dyspersja (hydrozole, emulsje, aerozole):

Zjawiska cieplne

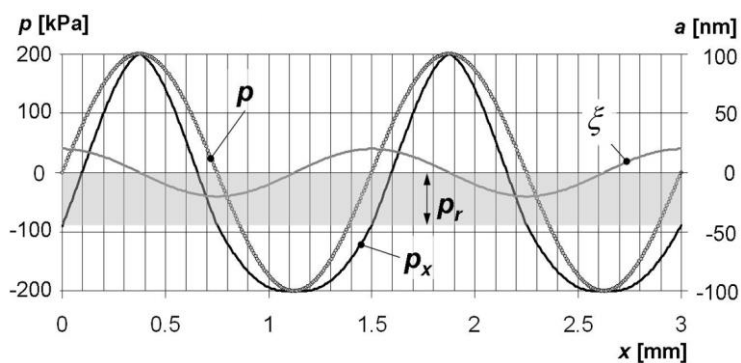
Zjawiska elektryczne

Sonoluminescencja:

Zjawisko elektrokinetyczne:

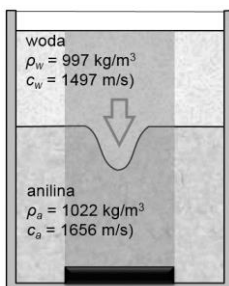
Zjawisko Debeye'a:

Zjawiska optyczne

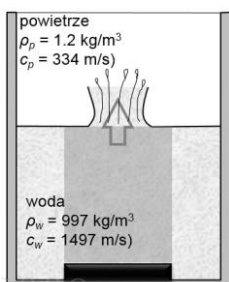
Zjawiska biologiczne**S22-24. Ciśnienie promieniowania** (Talarczyk E. Podstawy techniki ultradźwięków, Wrocław, 1990)

$$p_r = \frac{1}{T} \int_0^T p dt \quad p_r = w = \frac{I}{c}$$

$$p_r = w_1 - w_2 = \frac{I_1}{c_1} - \frac{I_2}{c_2}$$

Kierunek działania: od większej do mniejszej gęstości energii

$$p_r = w_1 - w_2 = \frac{I_1}{c_1} - \frac{I_2}{c_2} \approx I \left(\frac{1}{c_1} - \frac{1}{c_2} \right)$$



$$p_r = w_1 - w_2 = \frac{I_1}{c_1} - \frac{I_2}{c_2}$$

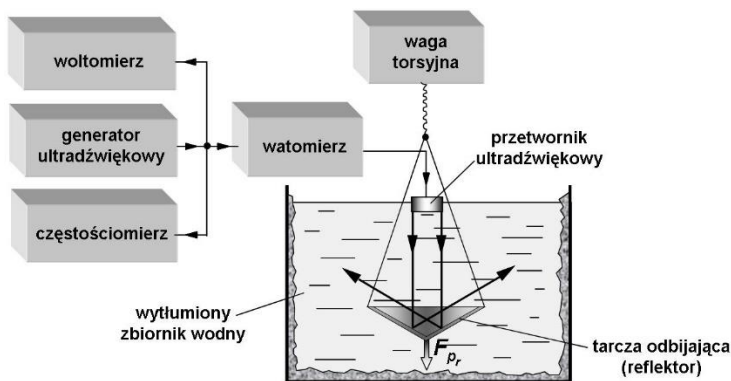
S25. Ciśnienie promieniowania (Talarczyk E. Podstawy techniki ultradźwięków, Wrocław, 1990)

Wzór ogólny

$$p_r = I \left(\frac{(1+R) \cdot \cos^2 \alpha}{c_1} - \frac{1-R}{c_2} \sqrt{1 - \frac{c_2^2}{c_1^2} \cdot \sin^2 \alpha} \cdot \cos \alpha \right)$$

S26-27. Ciśnienie promieniowania (Talarczyk E. Podstawy techniki ultradźwięków, Wrocław, 1990)

Zastosowanie



$$p_r = \frac{2I}{c_1} \cdot \cos^2 \alpha$$

$$F_{p_r} = \frac{2P_a}{c_1} \cdot \cos^2 \alpha$$

Ciśnienie promieniowania jest niezależne od częstotliwości.

Mierząc p_r określamy energię przeniesioną przez wiązkę przez daną powierzchnię → natężenie dźwięku.

Znając moc elektryczną można wyznaczyć sprawność przetwornika.

S28. Kawitacja ultradźwiękowa (Talarczyk E. Podstawy techniki ultradźwięków, Wrocław, 1990)

Rozrywanie sprężystej cieczy poddanej działaniom dynamicznym:

- powstawanie jam kawitacyjnych;
- wymaga pokonania sił kohezji (spójności) cząstek cieczy;
- w czystej potrzebne ciśnienia rzędu MPa;
- zarodniki kawitacji – obszary o zmniejszonej spójności (tam siły przylegania – adhezji są mniejsze niż siły spójności);
- fazy kawitacji (ciśnienie hydrostatyczne, lepkość cieczy, zawartość i promienie pęcherzyków gazu, inne).

S29-31. Kawitacja ultradźwiękowa (Talarczyk E. Podstawy techniki ultradźwięków, Wrocław, 1990)

Pęcherzyki gazu w cieczy

$$R_{rez} > R > R_{kr}$$

$$R_{kr}^3 + \frac{2\sigma}{P_o} R_{kr}^2 - \frac{32\sigma^3}{27P_o(P_o - p)} = 0$$

$$f = \frac{1}{2\pi R_{rez}} \sqrt{\frac{3\kappa}{\rho} \left(P_o + \frac{2\sigma}{R_{rez}} \right)}$$

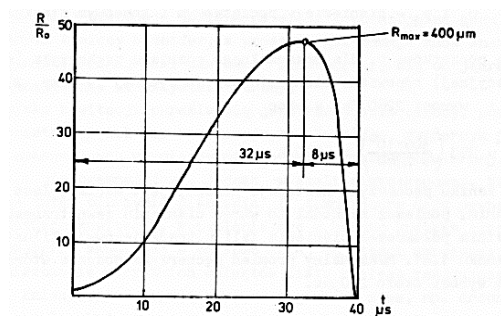
$$f \approx \frac{0.0136 \cdot c_w}{2\pi a_p} \quad f \approx \frac{3.3 \text{ [Hz/m]}}{a_p}$$

S32-34. Kawitacja ultradźwiękowa (Talarczyk E. Podstawy techniki ultradźwięków, Wrocław, 1990)

Fazy kawitacji

I – wstępna faza kawitacji: stopniowy wzrost pęcherzyka przez kilkadziesiąt okresów

II – krytyczna faza kawitacji: asynchroniczny przebieg wzrostu i kurczenia pęcherzyka do zmian ciśnienia



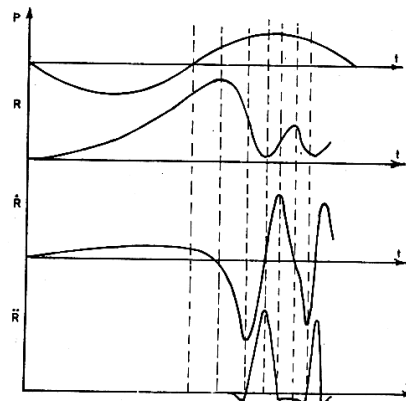
Rys. 1.40. Przebieg wzrostu i zaniku jamy kawitacyjnej

przy zaniku pęcherzyka (implozji)

↓
fala udarowa (energia)

↓
niszczenie obiektów stałych
organizmów żywych (bakterie, drobnoustroje)

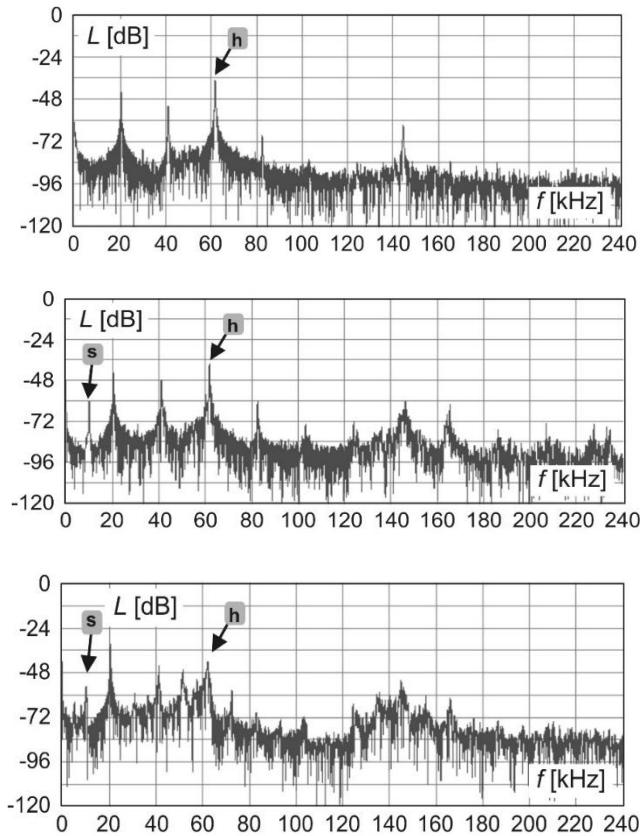
$$p_{\max} \approx \frac{3}{2} R_{\max}^2 \rho \kappa^{\kappa/(\kappa-1)}$$



Rys. 1.41. Przebieg ciśnienia p , promienia pęcherzyka R , prędkości \dot{R} , przyspieszenia \ddot{R} podczas kawitacji

S35-36. Kawitacja ultradźwiękowa (Talarczyk E. Podstawy techniki ultradźwięków, Wrocław, 1990)

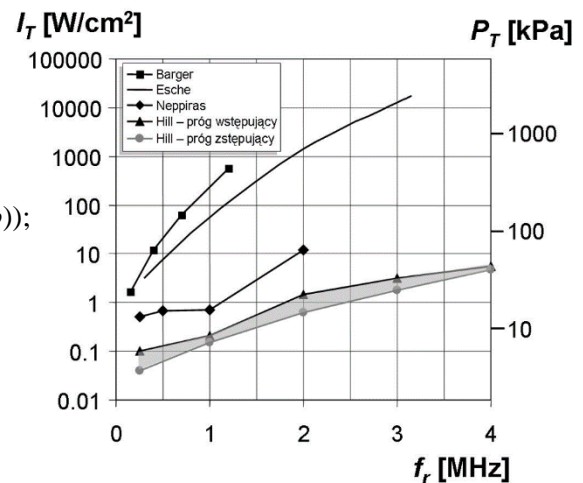
Oscylacje i implozje pęcherzyków (niszczące działanie, mikro-wybuchy, widmo kavitacji – szum kavitacyjny)



S37-38. Kawitacja ultradźwiękowa (Talarczyk E. Podstawy techniki ultradźwięków, Wrocław, 1990)

Próg kavitacji

- Rodzaj cieczy (niewielki wpływ);
- Czystość cieczy (duży wpływ);
- Ciśnienie hydrostatyczne cieczy P_o (wzrost → większa efektywność kavitacji);
- Ciśnienie akustyczne p (ma wpływ);
- Czas nadźwiękawiania (związany z I (czyli z p));
- **Częstotliwość ultradźwiękowa (decydujący wpływ, nieliniowy):**
 - 20 kHz → 1 W/cm²
 - 200 kHz → 10 W/cm²
 - 500 kHz → 200 W/cm²
 - 3 MHz → 50 kW/cm²



Dotychczas nie udało się wytworzyć kavitacji dla $f > 5$ MHz.