

## MATERIAŁY POMOCNICZE DO WYKŁADU Z PODSTAW ZASTOSOWAŃ ULTRADŹWIĘKÓW W MEDYCYNIE

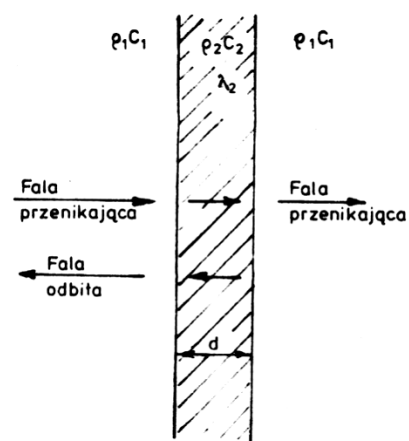
(wyłącznie do celów dydaktycznych – zakaz rozpowszechniania)

### 3. Przenikanie ultradźwięków przez ośrodki warstwowe. Fala stojąca. Systematyka zjawisk. Ciśnienie promieniowania. Kavitacja.

\*\*\*\*\*

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

Energetyczne (natężeniowe) wsp. odbicia i przenikania



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

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

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

dla ctg min i max

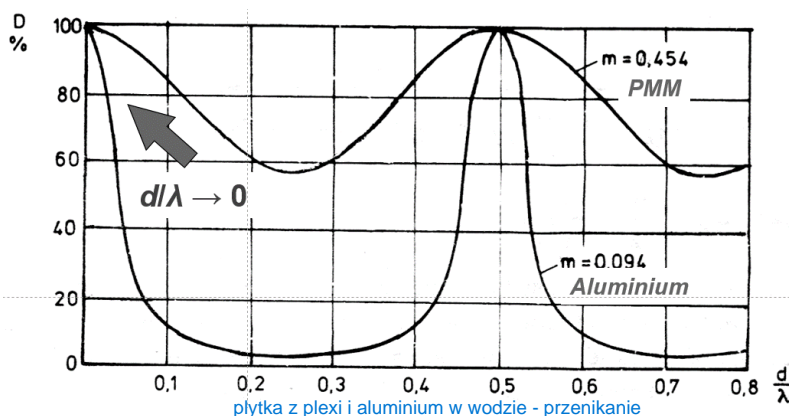
$$\text{wtedy: } \frac{2\pi d}{\lambda_2} = (2n+1) \cdot \frac{\pi}{2} \quad \text{czyli } d = (2n+1) \cdot \frac{\lambda_2}{4} \quad \text{dla } n = 0, 1, 2, \dots$$

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

wielokrotność połowy długości fali

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

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

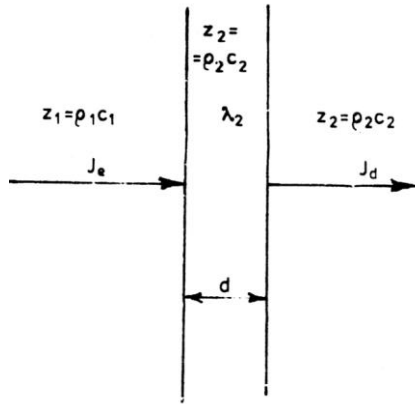


szczelina powietrzna w ciele stalum (1MHz) d = 3.4um, wtedy fala przejdzie bez problemu  
(np przy badaniu pacjenta kiedy pojawia sie bąble powietrza)

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

3 środowiska

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



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

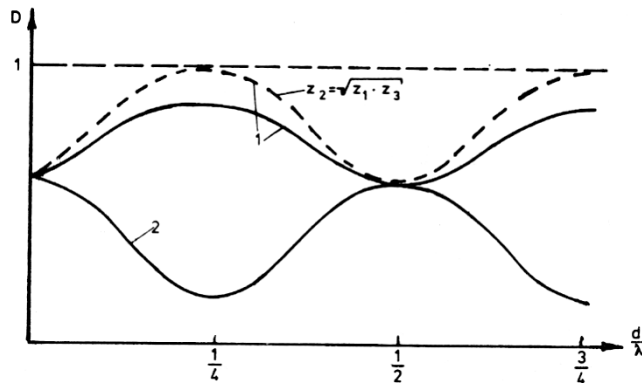
$$D_{\max} = \frac{4}{2 + \frac{Z_1 Z_3}{Z_2^2} + \frac{Z_2^2}{Z_1 Z_3}} \quad \text{dla } d = (2n+1) \frac{\lambda_2}{4}$$

$$D_{\max} = 1$$

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

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

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



pytania - dl fali, parzysta/nieparzysta dla max przejścia itd.

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

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

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

Obie fale interferują ze sobą.

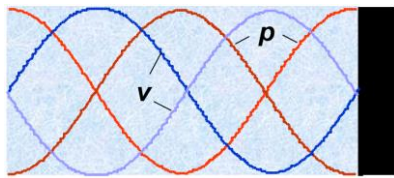
Powstaje pole o nierównomiernym rozkładzie ciśnienia:

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

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

Gdy  $R = 1 \rightarrow$  tylko fala stojąca

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



$\rho_1 c_1 \ll \rho_2 c_2 \quad m \approx 0 \Rightarrow$  cisnienie odbija się w fazie  $R' = \frac{1-m}{1+m} \approx 1$  prędkość w przeciwną fazę?  $R'' = -\frac{1-m}{1+m} \approx -1$   
dużo większa impedancja (np. beton)

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

podwójne ciśnienie, zerowa prędkość = zerowa energia

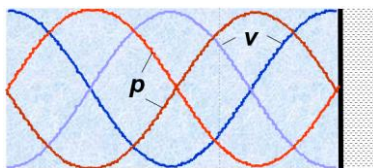
W głąb przeszkody doskonale sztywnej wnika fala ciśnienia o podwójnej amplitudzie.

$P_d = P_e + P_r \Rightarrow P_d \approx 2P_r$

$V_d = V_e + V_r \Rightarrow V_d \approx 0$

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

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



$\rho_1 c_1 \gg \rho_2 c_2 \quad m \rightarrow \infty \Rightarrow$  cisnienie odbija się w przeciwną fazę  $R' = \frac{1-m}{1+m} \approx -1$  prędkość odbija się w fazie  $R'' = -\frac{1-m}{1+m} \approx 1$   
z betonu do powietrza

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

cisnienie nie wnika

podwójna amplituda prędkości

energia za przeszkodą = 0

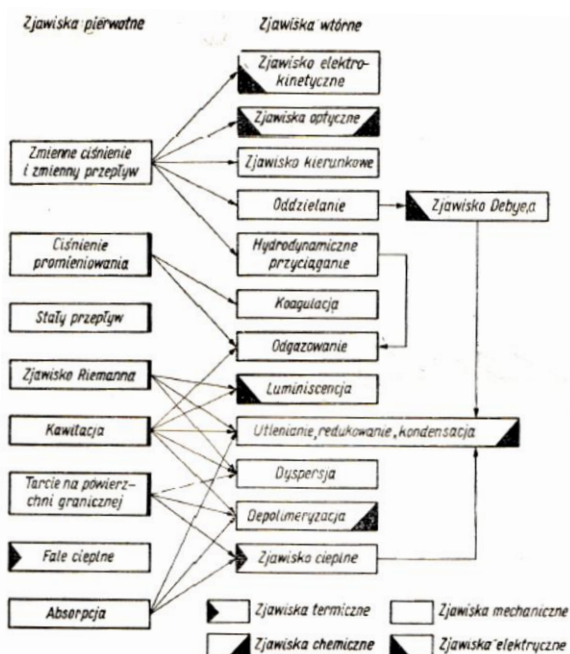
W głąb przeszkody doskonale podatnej wnika fala prędkości o podwójnej amplitudzie.

$P_d = P_e + P_r \Rightarrow P_d \approx 0$

$V_d = V_e + V_r \Rightarrow V_d \approx 2V_r$

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



zjawiska pierwotne

#### Zmienne ciśnienie i zmienny przepływ

zmiany temperaturowe raczej adiabatyczne (bez wymiany ciepła) - dzieją się zbyt szybko i zmiany są zbyt małe rzędu 1 deg.C

#### Fale ciepłe (temperaturowe)

## Stały przepływ ośrodka (wiatr kwarcowy, strumień akustyczny)

ze względu na stałą prędkość strumienia, ośrodek porusza się, np. woda

prędkość przepływu wzrasta z oddalaniem się od źródła

## Zjawisko Riemanna (zniekształcenie czoła fali)

obrazowanie nieharmoniczne pływ

## Tarcie na powierzchni granicznej

zjawiska pierwotne

## Absorpcja (pochłanianie)

wtórne

=====

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

### Zjawiska mechaniczne - wtórne

zależne od częstotliwości, tylko dla dużych

-zjawisko Rayleigha: a, tarcza w wodzie się obraca (małe rozmiary w stosunku do długości fali  $r/\lambda < 0,07$ )

-siła Bjerknessa - separacja pęcherzyków powietrza w cieczy zależy od  $D$  ( $>$  lub  $<$  od  $D_{rez}$ )

umożliwia separowanie cząstek

Zjawiska kierunkowe:

Separacja: ruch cząstek jest funkcją  $f(m, f)$ , dla większych częstotliwości tylko małe drgają, a duże wykonują dziwne ruchy, dla średnich tylko małe drgają

Hydrodynamiczne siły przyciągania: ruch cząstek o różnych masach - układ cząsteczek poruszających się wśród innych cząsteczek - siły Bernoulliego

Koagulacja: rozbijanie rozdrobin, cząstek w hydrozoli, emulsji lub aerozolu (dym, kurz, mgła)

zderzenia cząstek - koagulacja  
tłumienie w gazach - przeciwdziała koagulacji  
kawitacja w cieczach - przeciwdziała koagulacji

Odgazowanie cieczy i stopów: przy natarzeniu odpowiednio dużym, ale na tyle małym aby nie występowała kawitacja podczas drgania pęcherzyki łączą się, i zaczyna działać siła oporu

Dyspersja (hydrozole, emulsje, aerozole): umożliwia wymieszanie

wspomaga

-tarcie powierzchni granicznych - działanie mielące

-kawitacja - sprzyja dyspersji dla  $f < 100\text{kHz}$

-jednostajny przepływ - mieszanie

### Zjawiska cieplne

ultradźwiękowe lutowanie, czyszczenie, drażnienie (erozja)

tkanka mięśniowa i tłuszcz silnie pochłaniają ultradźwięki

## Zjawiska elektryczne

Sonoluminescencja:

Zjawisko elektrokinetyczne:

Zjawisko Debeye'a: tylko w cieczach jonowych, na skutek zmiany odległości jonów występuje zmienne pole elektryczne

## Zjawiska optyczne

w tomografii optycznej przez ognisko przetwornika przepuszcza się wiązkę z lasera, zaobserwujemy modulację amplitudy światła, pofalowane czoło fali parametrem może być rozmycie fali (ała siatka dyfrakcyjna)

Chemiczne,

-zjawisko utleniania (woda + kawitacja) - mikro wyladowania elektryczne - jonizacja wody i powstanie jony H i OH oraz wody utlenionej H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

-sono kataliza

-redukcja w roztworach wodnych

-degradacja polimerów

-rozpad związków i reakcje w rozpuszczalnikach organicznych

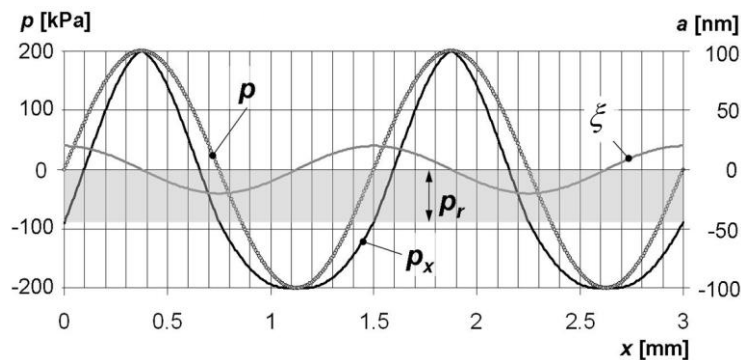
\*\*\*\*\*

## Zjawiska biologiczne

cisnienie promieniowania - oddziaływanie fali na każdą nieciągłość w osrodku

amplitudy przesunień cząstek osiągają skończone wartości - nie są nieskończone małe

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



$$p_r = \frac{1}{T} \int_0^T p dt$$

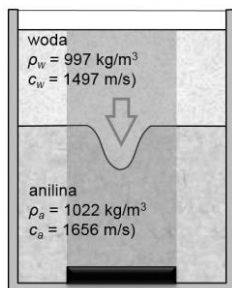
$$p_r = w = \frac{I}{c}$$

w - gęstość energii =  
napięcie/prędkość propagacji

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

kierunek działania, od większej do mniejszej gęstości energii

*Kierunek działania: od większej do mniejszej gęstości energii*



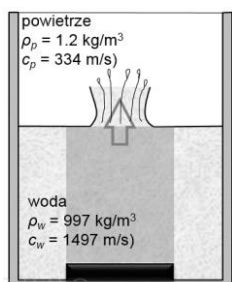
Z<sub>a</sub> ~ Z<sub>w</sub>  
R ~ 0  
I<sub>1</sub> ~ I<sub>2</sub>

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

większa gęstość energii w wodzie

**kolokwium !**

ocenić w którą stronę działa siła



Z<sub>w</sub> >> Z<sub>p</sub>  
R ~ 1 - odbicie  
I<sub>1</sub> ~ I<sub>2</sub>

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

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

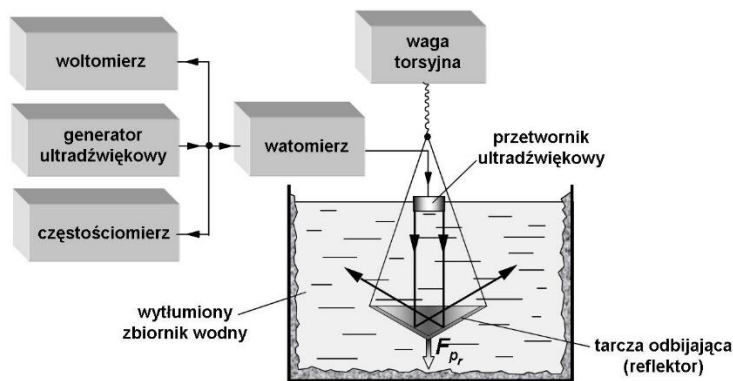
Wzór ogólny

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


---

### 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 przenoszoną 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 spoistości (tam siły przylegania – adhezji są mniejsze niż siły spoistości);
- 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

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

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

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

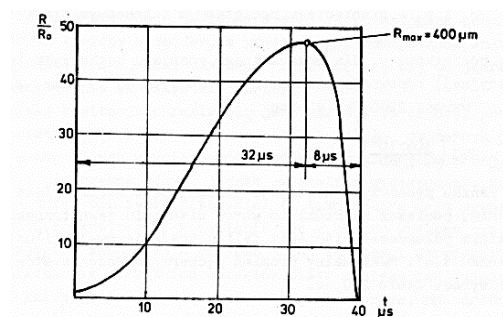
$$f \approx \frac{0.0136 \cdot c_w}{2\pi a_p} \quad f \approx \frac{3.3 \text{ [Hz} \cdot \text{m]}}{a_p}$$

### 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



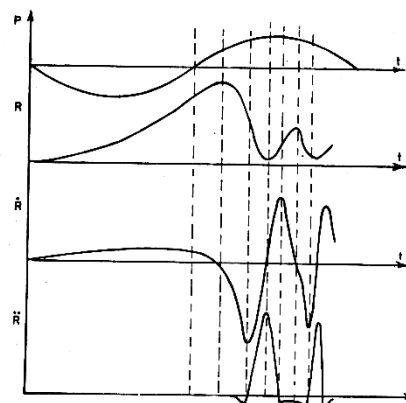
Rys. 1.40. Przebieg wzrostu i zaniku jamy kawitacyjnej

przy zaniku pęcherzyka (implozji)

↓  
fala uderowa (energia)

↓  
niszczenie obiektów stałych  
organizmów żywych (bakterie, drobnoustroje)

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

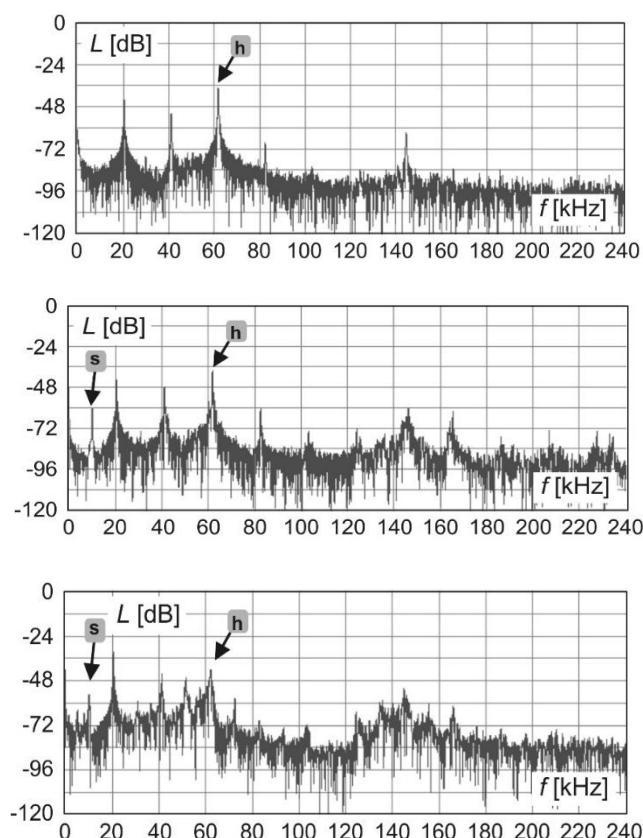


Rys. 1.41. Przebieg ciśnienia  $p$ , promienia pęcherzyka  $R$ , prędkości  $\dot{R}$ , przyspieszenia  $\ddot{R}$  podczas kawitacji



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

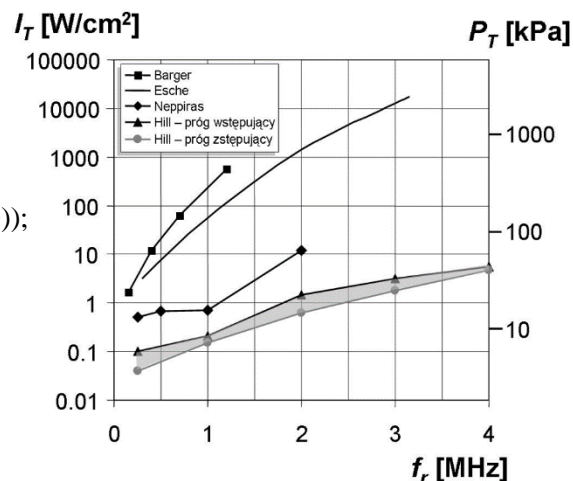
Oscylacje i implozje pęcherzyków (niszczące działanie, mikro-wybuchy, widmo kavitacji – szum kavitacyjny)



### 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/cm<sup>2</sup>
  - 200 kHz → 10 W/cm<sup>2</sup>
  - 500 kHz → 200 W/cm<sup>2</sup>
  - 3 MHz → 50 kW/cm<sup>2</sup>



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