7 Acustica

7.1. Acustica: Unde sonore
7.2. Sunetele şi percepția lor
7.3. Efectul Doppler
7.4. Intensitatea şi tăria undelor: Presiunea undelor
7.5. Calitățile sunetului
7.6. Absorbția sunetelor
7.7. Ultrasunetele

7.1 Acustica: Unde sonore

*Definiție: **Acustica** este acea parte a fizicii care se ocupă cu studiul producerii, propagării şi proprietățile sunetelor.*

Undele sonore sunt unde longitudinale, viteza lor are toate caracteristicile vitezei de propagare a undelor longitudinale. Viteza de propagare a undelor sonore în substanțe solide şi lichide este dată de relația:

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho_0}}, \tag{7.1}$$

unde *B* este modulul de compresibilitate care în cazul corpurilor solide este tocmai modulul de elasticitate al lui Young, E, iar ρ_0 este densitatea corpului în lipsa compresiei. În cazul gazelor, viteza este dată de relația:

$$v = \sqrt{\frac{C_p}{C_v}\frac{RT}{M}}, \tag{7.2}$$

unde prin C_p şi C_v s-au notat căldurile specifice la presiune şi volum constant, R –constanta universală a gazelor, prin T – temperatura absolută şi prin M – masa molară. Viteza cea mai mare o are sunetul care se propagă prin Hidrogen şi creste cu creşterea temperaturii. Experimental s-a măsurat viteza sunetului în aer la 0^o C care este v_s = 332 m/s.

7.2 Sunetele şi percepția lor

*Definiție: Numim **sunete**, oscilațiile mecanice capabile să impresioneze organul auditiv al omului care este urechea (receptorul).*

Condițiile care trebuie îndeplinite de undele sonore pentru a fi percepute de ureche:

Fig. 7.1 Sursele sonore produc unde mecanice capabile să impresioneze, urechea, organul auditiv uman.

- Să fie emise de o sursa de sunete.
- Să existe un mediu elastic între sursa de sunete şi receptor.
- Frecvența de oscilație să fie cuprinsă între 16 Hz şi 20 000 Hz.
- Puterea undelor sonore trebuie să fie suficientă pentru a produce o senzație auditivă. Sau cu alte cuvinte să aibă o intensitate mai mare decât aşa numitul prag auditiv (aproximativ 10^{-12} W/m^2 la o frecvență de 1 kHz).
- Sunetul trebuie să depăşească durata minimă pentru ca organul auditiv să-l sesizeze (≥ 0.05 s).

*Definiție: Oscilațiile mecanice care au frecvența de oscilație deasupra limitei de audibilitate (peste 20 kHz) se numesc **ultrasunete**.*

*Definiție: Oscilațiile mecanice care au frecvența de oscilație dedesubtul limitei de audibilitate (sub 16 Hz) se numesc **infrasunete**.*

În afară de ureche sunetele mai pot fi recepționate şi de dispozitive ca de exemplu microfonul.

Producerea şi propagarea sunetelor

Sunetele sunt produse de corpuri sau medii elastice aduse în stare de oscilație. Corpurile capabile să emită sunete în condiții determinate se

numesc surse sonore. Sunetele se pot produce în corzi vibrante (vioara, corzi vocale, etc.), coloane de aer vibrante (orga, clarinet, etc.) şi plăci şi membrane vibrante (xilofon, difuzor, toba, etc.). Oricare ar fi mediul elastic în care se propagă sunetul nu implică transport de substanță ci doar transport de energie. Acest transfer se realizează prin intermediul particulelor mediului străbătut. De aici rezultă că sunetul nu se poate produce în vid. De obicei corpurile care emit sunete se găsesc în spațiu iar dacă nu sunt împiedicate sunetele se vor răspândi in toate direcțiile.

De exemplu, într-o coardă fixată la ambele capete se produc unde sonore staționare dacă este îndeplinită următoarea condiție:

$$l = n\frac{\lambda}{2}, \tag{7.3}$$

unde l este lungimea corzii. In acest caz frecvența oscilațiilor emise de coardă este:

$$\nu_n = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{\frac{2l}{n}} = n\frac{c}{2l} = n\nu_0, \tag{7.4}$$

unde c este viteza sunetului iar:

$$\nu_0 = \frac{c}{2l}, \tag{7.5}$$

este frecvența fundamentală.

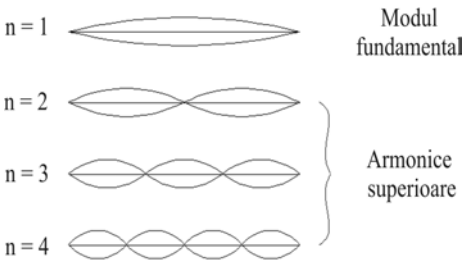

Fig. 7.2 Modul fundamental şi primele trei armonice superioare în care poate sa vibreze o coardă fixată la capete.

Sunetele produse de o coardă au frecvențele multiplu întreg al frecvenței fundamentale.

Definiție: Sunetul care are frecvența egală cu ν_0 se numeşte ***sunet fundamental****.*

Definiție: Sunetul care are

frecvența egală cu un multiplu întreg al frecvenței fundamentale, v_0 se numeşte ***armonică****.*

Definiție: ***Zgomotul*** *reprezintă o suprapunere de unde periodice dacă numărul componentelor este foarte mare.*

7.3 Efectul Doppler

Enunț: Dacă o sursă se mişcă față de un receptor atunci frecvența cu care se recepționează undele depinde de viteza relativă a receptorului față de sursa. Există doua cazuri particulare:

I Receptorul fix şi sursa mobilă

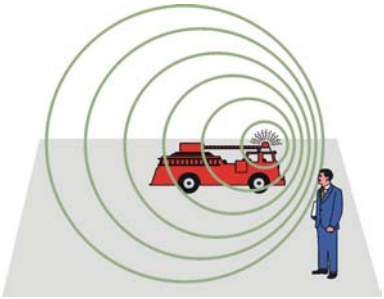

Fig. 7.3 Sunetul recepționat de către un observator fix are o frecvență diferită față de frecvența sursei.

Fie un receptor situat într-un punct B şi care recepționează undele emise de o sursă situată într-un punct A. Timpul în care ajung acestea la receptor dacă distanța dintre sursă şi receptor este o lungime de undă este:

$$T = \frac{\lambda}{c}. \qquad (7.6)$$

Dacă sursa ar fi în repaus distanța AB ar rămâne egală cu lungimea de undă, λ dar dacă sursa se găseşte în mişcare cu viteza, **v** atunci distanța sursă observator se micşorează in timp de o perioadă cu:

$$AA' = v \cdot T, \qquad (7.7)$$

astfel in mediul imobil se va propaga o undă cu lungimea de undă:

$$\lambda' = \lambda - v \cdot T, \qquad (7.8)$$

care se va propaga cu viteza c intr-o perioadă T':

$$T' = \frac{\lambda'}{c}, \qquad (7.9)$$

de unde dacă împărțim ecuația (C7.26) cu c avem:

$$\frac{\lambda'}{c}=\frac{\lambda}{c}-\frac{v\cdot T}{c}\quad\Rightarrow\quad T'=T-\frac{v\cdot T}{c}=T\frac{c-v}{c}, \tag{7.10}$$

iar frecvența care este inversul perioadei este :

$$\nu'=\nu\frac{c}{c-v}, \tag{7.11}$$

care este frecvența (mai înaltă decât în cazul static) dacă sursa se apropie de receptor, şi care se transformă în mod evident în:

$$\nu'=\nu\frac{c}{c+v}, \tag{7.12}$$

(mai joasă decât în cazul static) dacă sursa se îndepărtează de observator.

II Receptorul mobil şi sursa fixă

Fie ν frecvența cu care emite sursa A. În punctul B aceste unde emise de A sunt recepționate. Dacă receptorul B se mişcă spre sursa A cu viteza **v,** atunci în unitatea de timp numărul undelor recepționate este mai mare cu:

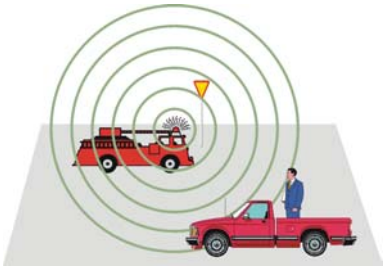

Fig. 7.4 Sunetul recepționat de către un observator mobil de la o sursa fixă are o frecvență diferită față de frecvența sursei.

$$\Delta\nu=\frac{BB'}{\lambda}=\frac{v\cdot 1s}{\lambda}=\frac{v}{\lambda}=\frac{v}{\frac{c}{\nu}}=\frac{v}{c}\nu, \tag{7.13}$$

de unde frecvența cu care se recepționează unda este:

$$\begin{aligned}\Delta\nu&=\nu'-\nu=\frac{v}{c}\nu\\ \nu'&=\frac{v}{c}\nu+\nu=\frac{v+c}{c}\nu\end{aligned}, \tag{7.14}$$

dacă receptorul se apropie de sursă şi:

$$\nu'=\frac{v-c}{c}\nu, \tag{7.15}$$

dacă receptorul se îndepărtează de sursă.

Prin combinarea celor două cazuri se obține:

$$\nu' = \frac{v_r \pm c}{c \mp v_s}\nu, \tag{7.16}$$

unde v_r este viteza receptorului iar v_s viteza sursei. Primul semn fiind considerat la apropierea relativă dintre sursă şi receptor iar semnul de jos fiind folosit la îndepărtarea relativă dintre sursă si receptor.

7.4 Intensitatea şi tăria undelor. Presiunea undelor. Intensitatea undelor

Procesul de propagare a undelor mecanice şi deci şi cele sonore, înseamnă propagarea mişcării, ceea ce semnifică o propagare a energiei. Fie o undă sonoră (longitudinală) ce se propagă intr-un mediu elastic (aerul). Să considerăm funcția de undă ca fiind $\Psi(x,t)$ se consumă o energie pentru învingerea forței elastice care se opune deformării. Puterea consumată este:

$$P = -F \cdot v \quad \Leftrightarrow \quad \frac{\partial W}{\partial t} = -F\frac{\partial \Psi}{\partial t}, \tag{7.17}$$

unde s-a considerat că viteza de deformare este $v = \frac{\partial \Psi}{\partial t}$. Pentru o undă sinusoidală:

$$\Psi(x,t) = A \cdot sin\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)\right] = A \cdot sin\left(\frac{2\pi}{T}t - \frac{2\pi}{\lambda}x\right) = A \cdot sin(\omega \cdot t - k \cdot x), \tag{7.18}$$

unde s-a definit vectorul de undă:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda}\frac{\nu}{\nu} = \frac{\omega}{\frac{\lambda}{T}} = \frac{\omega}{v}. \tag{7.19}$$

Forța se poate exprima din legea lui Hooke:

$$\frac{F}{S}=E\frac{\Delta l}{l_0}\quad\Rightarrow\quad\frac{F}{S}=E\frac{\partial\Psi}{\partial x}\quad\Rightarrow\quad F=ES\frac{\partial\Psi}{\partial x}. \tag{7.20}$$

Derivata parțială a funcției de undă in funcție de timp este:

$$\frac{\partial\Psi(x,t)}{\partial t}=A\omega\cos(\omega\cdot t-k\cdot x). \tag{7.21}$$

Iar derivata parțială a funcției de undă în funcție de spațiu este:

$$\frac{\partial\Psi(x,t)}{\partial}=-Ak\cos(\omega\cdot t-k\cdot x)=-A\frac{\omega}{v_s}\cos(\omega\cdot t-k\cdot x). \tag{7.22}$$

Iar din (7.1):

$$v=\sqrt{\frac{E}{\rho_0}}\quad\Rightarrow\quad E=\rho_0 v_s^2. \tag{7.23}$$

Puterea transmisă secțiunii vecine de către secțiunea deformată este atunci:

$$\frac{\partial W}{\partial t}=-ES\frac{\partial\Psi}{\partial x}\frac{\partial\Psi}{\partial t}=\rho_0 v_s^2 SA\frac{\omega}{v_s}\cos(\omega\cdot t-k\cdot x)A\omega\cos(\omega\cdot t-k\cdot x)$$
$$\frac{\partial W}{\partial t}=\rho_0 v_s SA^2\omega^2\cos^2(\omega\cdot t-k\cdot x) \tag{7.24}$$

care este întotdeauna o mărime pozitivă.

Valoarea medie a puterii este dată de relația generală:

$$\left\langle\frac{\partial W}{\partial t}\right\rangle=\frac{1}{T}\int_0^T\frac{\partial W}{\partial t}dt=\frac{1}{T}\int_0^T\rho_0 v_s SA^2\omega^2\cos^2(\omega\cdot t-k\cdot x)dt, \tag{7.25}$$

care devine

$$\left\langle\frac{\partial W}{\partial t}\right\rangle=\rho_0 v_s SA^2\omega^2\frac{1}{T}\int_0^T\cos^2\left(\frac{2\pi}{T}\cdot t-k\cdot x\right)dt=\frac{1}{2}\rho_0 v_s SA^2\omega^2. \tag{7.25'}$$

Definiție: Fluxul de energie prin unitatea de suprafață, adică energia transportată de undă în unitatea de timp prin unitatea de suprafață se numeşte ***intensitatea undei.***

$$I = \frac{1}{S}\left\langle \frac{\partial W}{\partial t} \right\rangle = \frac{1}{2}\rho_0 v_s A^2 \omega^2 . \tag{7.26}$$

Definiție: **Densitatea medie de energie**, *w* transportată de undă în unitatea de timp este:

$$w = \left\langle \frac{\partial W}{\partial V} \right\rangle = \left\langle \frac{\partial W}{\partial (S \cdot l)} \right\rangle = \left\langle \frac{\partial W}{\partial (S \cdot v_s \cdot t)} \right\rangle = \frac{1}{S \cdot v_s}\left\langle \frac{\partial W}{\partial t} \right\rangle = \frac{1}{v_s}\frac{1}{S}\left\langle \frac{\partial W}{\partial t} \right\rangle = \frac{1}{v_s} I , \tag{7.27}$$

de unde:

$$w = \frac{1}{2}\rho_0 A^2 \omega^2 . \tag{7.28}$$

Intensitatea undei este legată de densitatea de energie medie prin viteza de propagare a undei:

$$I = w \cdot v_s . \tag{7.29}$$

Unitățile de măsură ale mărimilor implicate sunt:

$$\begin{aligned} &\left[\left\langle \frac{\partial W}{\partial t} \right\rangle\right] = W \\ &[I] = \frac{\left[\left\langle \frac{\partial W}{\partial t} \right\rangle\right]}{[S]} = \frac{W}{m^2} . \\ &w = \frac{[I]}{[v_s]} = \frac{Ws}{m^3} \end{aligned} \tag{7.30}$$

Deoarece $\omega A = u_{max}$ – viteza maximă de oscilație a elementului de volum, intensitatea undei devine:

$$I = \frac{1}{2}\rho_0 v_s u_{max}^2 . \tag{7.31}$$

Presiunea undelor

Definiție: ***Câmpul sonor*** *constituie regiunea din spațiu învecinată surselor sonore unde se propagă sunetele.*

Undele longitudinale în gaze presupun comprimări si destinderi succesive realizate prin deplasarea oscilatorie a particulelor mediului pe direcția de propagare a undei. Acest fapt se traduce prin mărirea şi comprimarea presiunii statice locale a gazului.

Definiție: Diferența dintre presiunea într-un punct din câmpul sonor în prezența undelor sonore şi valoarea presiunii în absența acestora se numeşte ***presiune acustică****.*

Modulul de compresibilitate se poate defini folosindu-se relația:

$$\chi = -V\frac{dp}{dV} \text{ de unde } dp = -\chi\frac{dV}{V}, \tag{7.32}$$

care este variația finită de presiune datorată oscilațiilor care determină variația volumului $V = Sdx$. Iar variația volumului este dată de $dV = Sd\Psi$. Atunci relația (C7.32) devine:

$$p_s = dp = -\chi\frac{d\Psi}{dx} = \chi Ak\,cos(\omega y - kx), \tag{7.33}$$

care devine:

$$p_s = v^2\rho A\frac{\omega}{v}cos(\omega t - kx) = v\rho A\omega\,cos(\omega t - kx). \tag{7.34}$$

Presiunea sonoră trece prin maxime şi minime. Se poate definii presiunea sonoră maximă ca fiind:

$$p_{s,max} = v\rho A\omega = v\rho u_{max}, \tag{7.35}$$

care este dependentă prin ρ de proprietățile mediului şi de viteza maximă a oscilațiilor elementare. Legătura dintre intensitatea sonoră şi presiunea sonoră maxima:

$$I = \frac{1}{2}\rho_0 v_s u_{max}^2 = \frac{1}{2}\frac{(\rho_0 v_s u_{max})^2}{\rho_0 v_s} = \frac{1}{2}\frac{p_{s,max}^2}{\rho_0 v_s}. \tag{7.36}$$

Se poate defini presiunea efectivă ca fiind valoarea medie a presiunii:

$$p_{s,eff} = \langle p_s \rangle = \langle v_s \rho u_{max} \cos(\omega t - kx) \rangle = v_s \rho u_{max} \langle \cos(\omega t - kx) \rangle = \frac{p_{s,max}}{\sqrt{2}}, \quad (7.37)$$

de unde intensitatea sonoră devine:

$$I = \frac{1}{2} \frac{p_{s,max}^2}{\rho_0 v_s} = \frac{p_{s,eff}^2}{\rho_0 v_s}. \quad (7.38)$$

7.5 Calitățile sunetului

*Definiție: Prin **calitățile sunetului** înțelegem acele mărimi care deosebesc un sunet de alt sunet.*

*Definiție: **Înălțimea** este calitatea sunetului după care el este perceput mai profund (grav) sau mai ascuțit (înalt).*

Înălțimea sunetului depinde de frecvența acestuia, dar şi de amplitudinea şi forma undei sonore.

*Definiție: **Intensitatea** este calitatea sunetului după care acesta este perceput mai intens sau mai puțin intens.*

Intensitatea sunetului este legată de energia sonoră, deci de amplitudinea undei sonore. Se pot deosebi două intensități ale sunetului.

- Intensitatea sonoră.
- Intensitatea auditivă.

Intensitatea sonoră

$$I_s = \frac{p_{s,max}^2}{2\rho_0 v_s}. \quad (7.39)$$

Sunetele auzite de om pot să varieze într-o gamă foarte largă de ordine de mărime ale intensități sonore $I_s \in [10^{-12}\ W/m^2 \div 10^2\ W/m^2]$. S-a constatat că scala logaritmică este mult mai comodă pentru a măsura intensitatea sunetului:

$$N_s = log\frac{I}{I_0}\ \text{[bel]}, \quad \text{sau} \quad N_s = 10\,log\frac{I}{I_0}\ \text{[dB]}. \qquad (7.40)$$

Unde $I_{s,min} = I_0 = 10^{-12}$ W/m^2 la frecventa ν = 1kHz se numeşte ***prag de audibilitate***. Valoarea maximă a intensităţii sonore care mai poate fi suportată de urechea noastră se numeşte ***prag de senzaţie dureroasă***.

Daca introducem presiunea sonora obţinem:

$$N_s = 20\,log\frac{p}{p_0}\ \text{[dB]}. \qquad (7.41)$$

Intensitatea auditivă

Caracterizează senzaţia auditivă produsă omului de către sunet. Spre deosebire de intensitatea sonoră care este o mărime obiectivă intensitatea auditivă este o mărime subiectivă.

Definiţie: ***Intensitatea auditivă*** *a unui sunet este egală cu intensitatea sonoră a unui sunet normal cu frecventa ν = 1kHz care produce aceeaşi senzaţie auditivă ca şi sunetul dat.*

Nivelul auditiv se poate defini în acelaşi fel ca şi nivelul sonor:

$$N_a = 10\,log\frac{I_a}{I_{a,0}}\ \text{[foni]}. \qquad (7.42)$$

Definiţie: ***Timbrul*** *repezită calitatea prin care se pot distinge sunete de aceeaşi frecvenţă şi intensitate emise de două sunete diferite.*

Definiţie: ***Reverberaţia*** *este fenomenul de prelungire a sunetului în încăpere după ce sursa încetează să emită.*

Definiţie: ***Timpul de reverberaţie*** *este timpul in care nivelul sonor scade de 6 ori sau intensitatea scade de 10^6 ori.*

$$T = 0.16\frac{V}{\alpha S}. \qquad (7.43)$$

unde V este volumul încăperii, S este suprafața încăperii iar α este coeficientul de absorbție în pereții încăperii. Dacă timpul de reverberație este mai mare decât **0.1 s** care este **timpul de inerție al urechii** atunci acustica încăperii este proastă.

7.6 Absorbția undelor

O parte din energia oscilațiilor este absorbită de mediul în care se propagă.

În cazul undelor mecanice se datorează existenței forțelor de frecare. Să considerăm intensitatea undei incidente ca fiind I_0. Se observă că descreşterea intensității acestei unde de-a lungul unei distanțe infinitezimale d***x*** este proporțională cu intensitatea ***I***:

$$\frac{dI}{dx} = -k \quad \Rightarrow \quad dI = -kIdx\,, \tag{7.44}$$

de unde prin integrare obținem:

$$\int_{I_0}^{I} \frac{dI'}{I'} = -k\int_{0}^{x} dx' \quad \Rightarrow \quad \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = -k\cdot x\,, \tag{7.45}$$

iar intensitatea undei care a străbătut o porțiune x de mediu este:

$$I = I_0 e^{-kx}\,. \tag{746.}$$

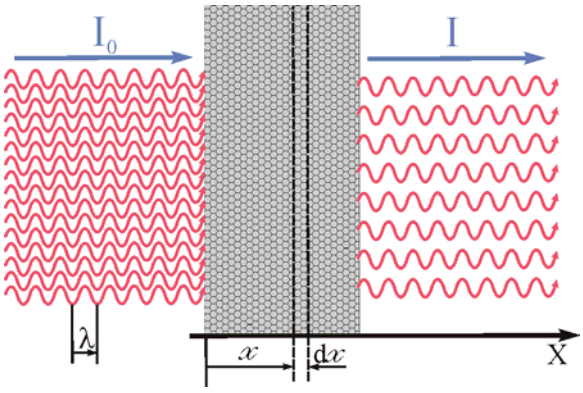

Fig. 7.5 Absorbția undelor mecanice în diverse medii.

Intensitatea undei descreşte exponențial cu distanța parcursă. Constanta k este o măsură a absorbției mediului:

$$k = \frac{\alpha}{\lambda}\,, \tag{7.47}$$

unde α se numeşte coeficient de absorbție. In aceste caz

legea de absorbție devine:

$$I = I_0 e^{-\frac{\alpha}{\lambda}x} = I_0 e^{-\alpha\frac{x}{\lambda}} \qquad (7.48)$$

7.7 Ultrasunetele

Definiție: ***Ultrasunetele*** *sunt vibrații elastice care au frecvența mai mare decât frecvența maximă a oscilațiilor care produc senzația auditivă. Domeniul de frecvență în care avem ultrasunete este între 20 kHz si 10^6 kHz.*

Pentru producerea ultrasunetelor cel mai des se utilizează generatoare electromagnetice care funcționează pe baza fenomenelor piezoelectrice şi magnetostricțiune.

Generatorul piezoelectric

Funcționarea acestui generator se bazează pe proprietatea unui cristal de cuarț de a se deforma în câmp electric. Dacă asupra unei plăcuțe de cuarț tăiată în mod corespunzător se aplică o tensiune alternativă ea începe să vibreze şi poate să devină o sursă de ultrasunete. Pentru o plăcuță de grosime l = 0.055 mm s-a obținut o frecvență de 500 kHz.

Generatorul magnetostrictiv

Funcționarea acestui generator se bazează pe fenomenul de schimbare a dimensiunilor unor substanțe feromagnetice supuse magnetizării. Dacă aceste substanțe se introduc în câmp magnetic variabil pot deveni surse de ultrasunete. În ambele cazuri generatoarele lucrează în regim de **rezonanță,** astfel este necesar ca dimensiunile plăcuțelor oscilante să fie astfel alese încât frecvența proprie să corespundă cu frecvența de excitație.

Proprietățile ultrasunetelor:

- Nu sunt percepute de organul auditiv al omului.
- Ultrasunetele se pot obține şi sub forma unor fascicule înguste.
- Ultrasunetele transportă o cantitate mare de energie.
- Ultrasunetele sunt puternic absorbite de substanțe în stare gazoasă.

Efectele produse de ultrasunete sunt din cele mai diverse astfel pot provoca încălziri locale, sau duc la omogenizarea unor sisteme disperse, pot distruge starea de omogenitate sau pot accelera si chiar provoca unele reacții chimice, ultrasunetele pot favoriza procesele de polimerizare şi invers sau pot produce fenomenul de cavitație, care constă în apariția unor goluri în fluidele în mişcare. Nu în ultimul rând ultrasunetele pot provoca perturbații mecanice în interiorul celulelor vii sau încălzirea locală a țesuturilor biologice.

Aplicațiile ultrasunetelor sunt bazate pe diverse fenomene. Astfel pe baza fenomenului de cavitație se pot prepara suspensii care constau din particule solide fin dispersate în lichide şi a emulsiilor care constau din particule de lichid dispersate în alt lichid. Se pot obține astfel plăci fotografice cu granulație fină sau aliaje omogene. Pe baza fenomenului de cavitație se pot curăța piese metalice, perfora sau tăia metale. Se mai utilizează la prepararea serurilor şi vaccinurilor, la sterilizarea şi conservarea alimentelor, tratamentul unor nevralgii. Una din cele mai cunoscute aplicații este aceea a determinării poziției unor obiecte, folosită în navigație, în studiul reliefului submarin, detectarea vapoarelor, a submarinelor, icebergurilor şi chiar a bancurilor de peşte. În tehnică se utilizează pentru punerea în evidență a defectelor pieselor metalice defectoscopia ultrasonoră, care este ea însăşi o metodă ultrasonoră.