

1. UNDE ELASTICE

Prin undă elastică înțelegem propagarea într-un mediu, cu viteză finită, a unei perturbații variabile în timp.

Mărimea perturbată, indiferent de natura ei, variază în funcție de coordonatele spațiale și timp, și o reprezentăm printr-o funcție $\Psi(x, y, z, t)$, numită funcție de undă.

Clasificarea undelor:

- după natura perturbației
 - unde elastice – perturbația este o deformare mecanică și mediul este elastic
 - unde electromagnetice – propagarea în orice mediu a câmpului electromagnetic
 - unde termice – datorită variației de temperatură
 - unde de Broglie – asociate microparticulelor aflate în mișcare
- după caracterul matematic al mărimii fizice care este perturbată
 - unde scalare – asociate cu variații de densitate, presiune, temperatură
 - unde vectoriale – asociate cu variații de deplasare, viteză, intensitate a câmpului electric, inducție magnetică
- după modul de oscilație:
 - unde longitudinale – vibrațiile au loc de-a lungul direcției de propagare a undei (unda sonoră)
 - unde transversale – vibrațiile au loc perpendicular pe direcția de propagare (unda luminoasă)

Undele elastice se propagă printr-un mediu.

Mediile în care se propagă unda elastică pot fi:

- **medii omogene** – dacă proprietățile fizice sunt aceleași în orice punct, adică sunt independente de coordonatele spațiale. În caz contrar mediul este neomogen.
- **medii izotrope** – dacă proprietățile fizice sunt aceleași în orice direcție, adică sunt independente de direcția după care se face măsurarea lor. În caz contrar mediul este anizotrop.
- **medii liniare** – dacă pentru mai multe perturbații $\Psi_i(x, y, z, t)$ ajunse simultan în același punct, perturbația rezultantă satisface relația de suprapunere:
$$\Psi(x, y, z, t) = \sum_i \Psi_i(x, y, z, t)$$
. În caz contrar, mediul este neliniar.

BIOFIZICĂ ȘI BIOINGINERIE - Note de curs

- **medii dispersive** – dacă viteza de propagare a undei depinde de caracteristicile undei pe lângă faptul că depinde de caracteristicile mediului. În caz contrar mediul este nedispersiv.
 - **medii conservative** – dacă procesele ondulatorii sunt reversibile, adică mediul nu absoarbe energie de la undă. În caz contrar mediul este neconservativ.
- Un mediu omogen, izotrop, liniar, nedispersiv și conservativ este un mediu ideal. Un astfel de mediu este infinit.

1.1. Ecuația generală a undei. Unda armonică plană.

Se demonstrează că **orice undă produsă de o sursă de mici oscilații într-un mediu ideal, se supune unei ecuații diferențiale de forma:**

$$\frac{\partial^2 \Psi(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi(x, y, z, t)}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \Psi(x, y, z, t)}{\partial t^2} \quad 1.1.1.$$

unde v este o constantă cu dimensiuni de viteză care depinde de caracteristicile mediului și de cele ale undei. Aceasta este **ecuația generală a undei**.

Unda plană

Dacă valorile funcției de undă sunt constante într-un plan perpendicular pe direcția de propagare (pe care o alegem ca fiind direcția Ox), atunci unda se numește plană. În acest caz:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial y} = 0 \quad \frac{\partial \Psi}{\partial z} = 0$$

Ecuația undei devine unidimensională:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} \quad 1.1.2.$$

a cărei soluție trebuie să fie funcția de undă de forma: $\Psi(x, t)$

Această funcție de undă poate reprezenta diferite mărimi fizice care au valori diferite la momente și în puncte diferite.

Unda armonică plană

Acest tip de undă corespunde situației în care **sursa este un oscilator armonic ale cărui oscilații se propagă din aproape în aproape într-un mediu ideal, deci în orice punct avem oscilații armonice, adică sinusoidale de o anumită frecvență unghiulară, ω** . Soluția ecuației undelor în acest caz poate fi scrisă în una din formele:

$$f_c(x, t) = A \cos \left[\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) + \varphi_0 \right] \quad \text{sau} \quad f_s(x, t) = A \sin \left[\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) + \varphi_0 \right] \quad 1.1.3.$$

Dar și o combinație liniară a acestora este tot o soluție, care scrisă explicit folosind formulele Euler este:

$$\Psi(x,t) = A \exp \left\{ i \left[\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) + \varphi_0 \right] \right\} \quad 1.1.4.$$

Mărimi caracteristice unei armonice plane

1. **Amplitudinea undei**, A , este valoarea maximă a mărimii care se propagă

2. **Faza undei** $\varphi(x,t) = \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) + \varphi_0$ 1.1.5.

3. **Faza inițială** $\varphi(0,0) = \varphi_0$ 1.1.6.

4. **Frecvența unghiulară sau pulsația undei**, ω se poate afla din expresia fazei prin derivare în raport cu timpul $\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \omega$, deci exprimă viteza de variație a fazei.

5. **Suprafața de undă sau suprafața echifază** este suprafața pe care faza are aceeași valoare la un moment dat (locul geometric al punctelor în care faza este constantă). În cazul undei plane, această suprafață este un plan perpendicular pe direcția de propagare. Prima suprafață de undă în sensul de propagare se numește **front de undă**. Dacă notăm cu \vec{u}_k versorul direcției de propagare, acesta este perpendicular pe suprafața de undă.

6. **Viteza de fază**, v , este viteza de deplasare a suprafeței de undă pe direcția normalei sale.

7. **Vectorul de undă**, \vec{k} , are direcția și sensul normalei la suprafața echifază, iar modulul său se definește prin relația: $k = -\frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{\omega}{v}$ 1.1.7.

8. **Intensitatea undei** se definește prin expresia $I = \Psi \Psi^*$, iar în cazul undei armonice plane descrise de forma exponențială 1.4., $I = A^2$. În acest caz, amplitudinea se poate afla din:

$$A = (\Psi \Psi^*)^{1/2} \quad 1.1.8.$$

9. **Perioada undei** exprimă periodicitatea în timp a funcției de undă $\Psi(x,t) = \Psi(x,t+T)$, adică timpul după care fenomenul se repetă.

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad 1.1.9.$$

10. **Frecvența undei** este inversul perioadei $\nu = 1/T$ 1.1.10

11. **Lungimea de undă** exprimă periodicitatea în spațiu a funcției de undă $\Psi(x,t) = \Psi(x+\lambda,t)$, adică distanța după care fenomenul se repetă, fiind totodată și distanța parcursă de suprafața de undă în timp de o perioadă:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\omega} v = \nu T = \frac{2\pi}{k} \quad 1.1.11.$$

Folosind această nouă mărime introdusă putem scrie funcția de undă:

$$\Psi(x,t) = A \exp \{ i [\omega t - kx + \varphi_0] \} = A \exp \left\{ i 2\pi \left[\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right] + \varphi_0 \right\} \quad 1.1.12.$$

Numai partea reală a acestei expresii are sens fizic.

Dacă alegem un sistem de coordonate arbitrar față de direcția de propagare a undei, atunci expresia funcției de undă se scrie:

BIOFIZICĂ ȘI BIOINGINERIE - Note de curs

$$\Psi(\vec{r}, t) = A \exp\{i[\omega t - \vec{k}\vec{r} + \varphi_0]\} \quad 1.1.13.$$

unde produsul scalar $\vec{k} \cdot \vec{r} = k_x x + k_y y + k_z z$.

Ecuatia atemporală a undelor

În general, mediile în care se propagă undele sunt limitate de o suprafață bine definită care le separă de exterior. În medii limitate se formează unde staționare. În acest caz se demonstrează că **soluția ecuației undelor se poate scrie ca produsul dintre o funcție care depinde doar de timp și una care depinde doar de spațiu**: $\Psi(x, t) = f(x)e^{i\omega t}$. Derivând de două ori această funcție și introducând-o în ecuația undelor, obținem o ecuație pentru funcția $f(x)$:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\omega^2}{v^2} f = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + k^2 f = 0 \quad 1.1.14.$$

unde $k = \omega/v$ este modulul vectorului de undă. Aceasta este **ecuația atemporală a undelor** în cazul unidimensional. Din punct de vedere matematic, aceasta este o ecuație cu valori proprii ale cărei soluții sunt de forma: $f(x) = A \sin(kx) + B \cos(kx)$ unde A și B sunt constante care se determină din condițiile la limită specifice problemei practice.

1.2. Fenomene caracteristice undelor

Suprapunerea a două sau mai multe unde coerente. Interferența

Dacă într-un punct al unui mediu ajung simultan mai multe unde de aceeași natură, atunci particula aflată în acel punct va simți suprapunerea tuturor undelor $\Psi = \sum_i \Psi_i$. Numai dacă

aceste unde sunt coerente, fenomenul observat este fenomenul de interferență care are ca rezultat formarea de maxime și minime (franje de interferență). Pentru a se observa acest fenomen trebuie ca undele care se suprapun să aibă aceeași pulsație și diferență de fază constantă în timp. Dacă undele nu sunt coerente, atunci are loc pur și simplu sumarea lor. **Interferența este fenomenul de suprapunere a două sau mai multe unde coerente cu formarea de maxime și minime de interferență.**

Difracția undelor

Fenomenul care se petrece atunci când o undă întâlnește un obstacol cu dimensiuni comparabile cu lungimea de undă sau un ecran în care este un orificiu cu dimensiuni comparabile cu lungimea de undă, este numit **difracția undelor**. În spatele acestor tipuri de obiecte se observă o distribuție a intensității luminoase cu maxime și minime specifice tipului de obiect întâlnit (obstacol sau orificiu) și dimensiunilor acestuia. Pare că există o ocolire a obstacolului respectiv sau o deformare a frontului de undă (nu mai este plan, sferic sau cilindric).

Interferența și difracția sunt două fenomene tipic ondulatorii. Construcția frontului de undă se face conform **principiului lui Huygens** (1690):

Fiecare punct al mediului la care a ajuns frontul de undă constituie o nouă sursă de oscilații care se propagă înainte. Înfășurătoarea tuturor acestor suprafețe de undă elementare dă noul front de undă.

Reflexia și refracția

Considerăm o undă care se propagă într-un mediu cu indicele de refracție n_1 și întâlnește la un moment dat, suprafața de separare față de un alt mediu, cu indicele de refracție n_2 . La această limită de separare, vor avea loc două fenomene importante asupra undei.

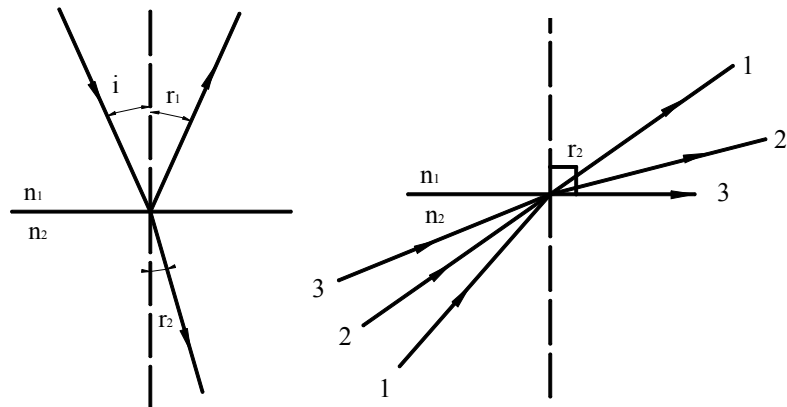


Fig. 1.2.1.

Reflexia este fenomenul prin care unda se întoarce în mediul din care a venit, la un unghi de reflexie egal cu unghiul de incidență. $i = r_1$, atunci când întâlnește suprafața de separare dintre două medii cu indici de refracție diferiți (vezi Fig. 1.2.1.)

Refracția este fenomenul prin care unda se va propaga în mediul al doilea, sub un unghi care respectă următoarea regulă:

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r_2 \quad 1.2.1.$$

unde i este unghiul de incidență (dintre normala la suprafață și unda incidentă), r_1 este unghiul de reflexie (dintre normala la suprafață și unda reflectată), r_2 este unghiul de refracție (dintre normala la suprafață și unda refractată). Normala este dreapta perpendiculară pe suprafața de separare. (vezi Fig. 1.2.1.)

REGULI

Dacă indicele de refracție al mediului al doilea este mai mare decât indicele de refracție al primului mediu, atunci unda refractată se apropie de normală.

Dacă, indicele de refracție al mediului al doilea este mai mic decât indicele de refracție al primului mediu, atunci unda refractată se depărtează de normală.

În acest caz, există un unghi de incidență limită pentru care unda refractată va forma un unghi de 90° cu normala. În acest caz spunem că se petrece fenomenul **de reflexie totală**. La unghiuri de incidență mai mari decât acest unghi limită, nu mai există undă refractată. (vezi Fig. 1.2.1.)

1.3. Unde elastice longitudinale și transversale

Un mediu elastic este un mediu continuu format din particule care interacționează. Dacă una din ele începe să oscileze, atunci perturbația se transmite și celorlalte. **Unda elastică reprezintă propagarea unei perturbații mecanice într-un mediu elastic, fenomenul fiind descris de variația în timp și spațiu a unor mărimi fizice caracteristice punctelor mediului** (presiune, densitate, deplasare, viteză de oscilație).

Unda elastică poate fi longitudinală sau transversală.

Undele elastice nu se propagă în vid.

Undele transversale nu se propagă în lichide sau gaze (vezi ca exemplu structura internă a Pământului).

Viteza de propagare a undelor elastice longitudinale: $v_{long-solid} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$. 1.3.1.

În lichide viteza de propagare a undelor longitudinale este: $v_{long-lichid} = \sqrt{\frac{K}{\rho_{lichid}}}$ 1.3.2.

unde K este coeficientul de compresibilitate adiabatică.

În gaze viteza de propagare a undelor longitudinale este:

$$v_{long-gaze-izoterm} = \sqrt{\frac{RT}{\mu}}$$
 1.3.3.

dacă frecvența undei este mică și putem spune că temperatura rămâne constantă, unde μ este masa molară a gazului

$$v_{long-gaze-adiab} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\mu}}$$
 1.3.4.

dacă frecvența undei este mare și putem spune că nu are loc un transfer de căldură între gaz și mediul înconjurător.

Viteza de propagare a undelor elastice transversale este:

$$v_{transv} = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}}$$
 1.3.5.

unde τ este efortul unitar tangențial, iar ρ este densitatea. Undele transversale se propagă doar în medii solide.

Mărimi energetice în unda elastică longitudinală

Propagarea undei elastice într-un mediu dat presupune un transfer continuu de energie de la sursă la mediu.

Energia astfel transferată se regăsește în mediu ca energie de mișcare a particulelor mediului în jurul pozițiilor lor de echilibru și ca energie potențială de deformare.

Se definesc următoarele mărimi fizice care caracterizează propagarea undelor elastice într-un mediu:

1. **Energia totală** a unui element de volum considerat: suma dintre energiile cinetică și potențială a elementului de volum considerat:

$$\Delta W = E_c + E_p \quad (1.3.6)$$

2. **Densitatea volumică de energie**: energia cuprinsă în unitatea de volum $w = \frac{\Delta W}{\Delta V}$
(7.9.15)

3. **Fluxul energetic**: energia transferată printr-o suprafață oarecare în unitatea de timp:

$$\Phi = \frac{\Delta W}{\Delta t}, [\Phi]_{SI} = Watt \quad (1.3.7)$$

4. **Densitatea fluxului energetic**: energia transferată în unitatea de timp prin unitatea de suprafață ΔS_n dispusă normal pe direcția de transfer a energiei:

$$J_{en} = \frac{\Delta W}{\Delta S_n \Delta t} = w \cdot v, \text{ iar vectorial:}$$

$$\vec{J}_{en} = w \cdot \vec{v} \quad (1.3.8)$$

5. **Intensitatea undei**: media pe o perioadă a modului densității fluxului de energie: $I = \langle J_{en} \rangle = \langle w \rangle \cdot v$. Calculând media pe o perioadă a densității volumice de energie, obținem:

$$I = \frac{\rho \omega^2 A^2 v}{2} \quad (1.3.9)$$

6. **Impedanța acustică a mediului**: $Z = \rho v$ atunci intensitatea devine:

$$I = \frac{Z \omega^2 A^2}{2} \quad (1.3.10)$$

După cum se vede din relațiile anterioare, intensitatea undei depinde atât de caracteristicile sursei (A, ω) cât și de cele ale mediului.

1.4. Efectul Doppler

Mișcarea sursei care produce undele elastice determină modificarea suprafețelor (fronturilor) de undă și modificarea frecvenței recepționate de un observator.

Când există o viteză relativă între sursa sonoră S și receptorul R, atunci frecvența ν' a sunetului detectat de către receptor este diferită față de frecvența ν a sunetului măsurată în sistemul de referință al sursei. Acesta se numește **efect Doppler**.

Considerăm cazul particular în care sursa și receptorul se apropie, vitezele lor fiind pe aceeași direcție (afect Doppler longitudinal). Pentru demonstrația care urmează folosim următoarele notații:

v_S - viteza sursei;

v_R - viteza receptorului;

v - viteza sunetului;

$T = 1/\nu$ - perioada sunetului emis de sursă în sistemul de referință propriu;

BIOFIZICĂ ȘI BIOINGINERIE - Note de curs

$T' = 1/\nu'$ - perioada sunetului înregistrat de receptor;

S - poziția sursei când emite primul sunet;

S' - poziția sursei când emite al doilea sunet;

R - poziția receptorului când aude primul sunet;

R' - poziția receptorului când aude al doilea sunet;

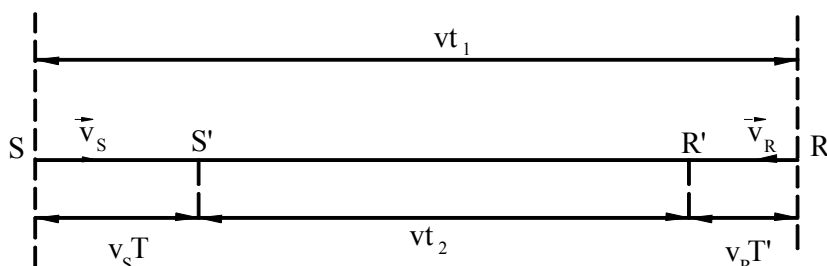


Fig. 1.4.1.

Din Fig. 1.4.1 se observă că există următoarea relație între segmentele existente $SR = SS' + S'R' + R'R$, ceea ce, scris cu viteze și timpi, duce la:

$$v_s T + vt_2 + v_R T' = vt_1 \quad (1.4.1)$$

Iar pentru duratele de timp, există egalitatea următoarelor două intervale temporale:

1. timpul de când a plecat primul semnal din S, ajunge în R și apoi R' $\rightarrow T' + t_1$

este egal cu

2. timpul de când pleacă semnalul din S, trece prin S' și ajunge apoi tot în R' $\rightarrow T + t_2$

rezultă: $T + t_2 = T' + t_1$.

Din aceste ecuații rezultă că: $T' = T \frac{v - v_s}{v + v_R}$, iar pentru frecvențe obținem:

$$\nu' = \nu \frac{v + v_R}{v - v_s} \quad (1.4.2)$$

Atunci când sursa și receptorul se depărtează pe aceeași direcție, avem:

$$\nu' = \nu \frac{v - v_R}{v + v_s} \quad (1.4.3)$$

Se observă că în cazul apropierii dintre sursă și receptor frecvența recepționată crește, $\nu' > \nu$, iar în cazul depărțării, frecvența recepționată scade, $\nu' < \nu$.

De exemplu, pentru un observator fix aflat într-o gară prin care trece un tren fără să oprească, a cărei sirenă funcționează se constată că:

1. când trenul se apropie, sunetul este mai acut;
2. când trenul se depărtează, sunetul este mai grav.

1.5. Sunete

Acustica este cea ramură a fizicii care se ocupă cu **producerea, propagarea detecția și proprietățile** sunetelor în gaze, lichide, solide..

Proprietăți. Clasificarea sunetelor

Din punct de vedere spectral, undele elastice se clasifică în:

infrasunete cu frecvența sub 16 Hz

sunete cu frecvența cuprinsă între 16Hz și 20kHz

ultrasunete cu frecvența cuprinsă între 20kHz și 10^6 kHz

hipersunete au frecvența între 10^6 kHz și 10^{11} kHz.

Undele acustice sunt unde elastice care au nevoie de un mediu pentru a se propaga, nu se pot propaga prin vid. Prin medii solide ele pot fi atât unde longitudinale cât și transversale. Ele se transmit ca o alternare a tensiunii interioare. Prin medii gazoase sau lichide, nu se pot propaga decât undele longitudinale, numite și unde de compresie. Ele se transmit prin lichide sau gaze, ca oscilații ale presiunii în interiorul acestor medii; se creează regiuni cu acumulări sau rarefierii de particule (particulele oscilează).

Vitezele cu care se propagă aceste unde depind de proprietățile mediului prin care are loc propagarea, cât și de condițiile de presiune și temperatură la care are loc propagarea.

Sunet este tot ceea ce noi auzim, de la plăcutele note muzicale și până la zgomotele deranjante ale străzii unei metropole. Sunetele sunt un important mod de comunicare între noi, oamenii, dar și între animale.

Sunetele sunt unde elastice care respectă anumite condiții de audibilitate și au frecvența cuprinsă între 16Hz și 20kHz

Perturbațiile mediului aerian, produse de cauze diverse, se propagă în mediul pe care-l străbat sub forma unor variații de presiune în mediul respectiv.

Sunetul reprezintă o vibrație mecanică (undă elastică) produsă într-un mediu solid, lichid sau gazos. Noi auzim când aceste vibrații mecanice lovesc timpanul ("eardrum" în engleză) și apoi dezvoltă un impuls în nervii auditivi. Regiunea din spațiu în care se propagă sunete se numește **câmp sonor**.

De exemplu, când este lovită o toabă, mișcările membranei sale devin perturbații mecanice în mediu, sursă de unde mecanice, care se vor propaga în mediul înconjurător. Fiecare particulă din mediu va simți perturbația și se va mișca după ea în sus și jos sau înainte și înapoi, dar rămânând în jurul aceluiași punct de echilibru.

Ca o consecință putem spune că perturbația se propagă fără a purta materie după ea, dar transferă energie dintr-un loc în altul în mediul în care se propagă.

Dacă perturbația este armonică, atunci și unda este o undă armonică.

Când astfel de unde din domeniul undelor sonore ajung la ureche, ele provoacă vibrația particulelor de aer din apropierea timpanului și dau naștere unui sunet atunci când sunt îndeplinite următoarele

BIOFIZICĂ ȘI BIOINGINERIE - Note de curs

Condiții de audibilitate

Presiunea trebuie să fie mai mare de 20 μPa (*limita de audibilitate* sau *pragul auzului*) și mai mică de 20 Pa (*pragul durerii*). Pentru a putea fi perceput de ureche, sunetul trebuie să aibă o durată mai mare de 0.05s. **Pentru a ajunge la ureche, trebuie să existe un mediu între sursă și ureche; sunetul nu se propagă în vid.** Sunetele au frecvența cuprinsă între 16Hz și 20kHz. Intensitatea sonoră să fie cuprinsă între o valoare minimă și una maximă, ambele dependente de frecvență. Această condiție scrisă în funcție de nivelul de intensitate sonoră, este: $N_s \in [0, 140] \text{dB}$. Urechea omenească este "neliniară", adică la amplitudini mari ale sunetelor, pe lângă două tonuri cu ν_1 și ν_2 , mai auzim și tonul cu $\nu_1 + \nu_2$, $2\nu_1 + \nu_2$, $\nu_1 + 2\nu_2$.

Ele sunt unde elastice și se propagă prin orice tip de mediu (solid, lichid, gazos), dar viteza lor este diferită

în aer, la 20°C, 343m/s,
în apă dulce 1435m/s,
în oțel 5100m/s
în oase 3360m/s
în mușchi 1570m/s
în grăsime 1440m/s

O clasificare de bază a sunetelor, după frecvența semnalului sonor, se poate face în felul următor:

16Hz < ν < 150 Hz - grave extreme;
150 Hz $\leq \nu \leq$ 400 Hz – grave;
400 Hz $\leq \nu \leq$ 1.500 Hz – medii;
1.500 Hz $\leq \nu \leq$ 3.500 Hz – înalte;
3.500 Hz < ν < 20kHz - înalte extreme;

Această împărțire nu ține seama de capacitatea de discriminare în frecvență a urechii umane.

Sunetul în aer are frecvența audibilă cuprinsă între 20 Hz. și 20.000 Hz (aproximativ), viteza de propagare de 340 m/s, iar lungimea de undă între 1,7 cm și 17 m.

1. **PRESIUNEA SONORĂ** Deoarece propagarea undei se efectuează într-un timp scurt, presupunem că ea este un proces adiabatic, adică nu există schimb de căldură între diferitele porțiuni ale mediului, fapt confirmat și de experiență. În acest caz, variația presiunii în raport cu densitatea, $\partial p / \partial \rho$, trebuie calculată în condițiile unui proces adiabatic:

Se obține pentru viteza undei într-un fluid, expresia:

$$v_{uf} = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_{ad}} \rho_0 \quad (1.5.1.)$$

și
$$\Delta p = v_{uf}^2 \Delta \rho \quad (1.5.2.)$$

Variațiile de presiune în unda sonoră sunt proporționale cu variațiile de densitate ale fluidului, constanta de proporționalitate fiind pătratul vitezei de propagare a undei.

Există domenii în care undele longitudinale se numesc unde de presiune. Vibrațiile longitudinale ale particulelor mediului produc oscilații ale presiunii. Presiunea are valori mari în regiunile unde particulele se deplasează strângându-se (compresiune) și are valori mici în regiunile unde particulele se deplasează depărtându-se (rarefiere).

Putem scrie legea de variație a presiunii într-un tub în care se propagă o undă armonică, ca descrisă de o funcție de forma:

$$p(x,t) = p_{\max} \sin \left[2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \right] = \rho \omega A v_u \sin \left[2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \right] \quad (1.5.3.)$$

Presiunea acustică este o mărime variabilă; valoarea ei la un moment dat se numește **presiune instantanee**. Valoarea maximă a presiunii instantanee în intervalul de timp considerat se numește **presiune maximă sau de vârf**.

Presiunea efectivă este:
$$p = \frac{\sqrt{2}}{2} p_{\max} = 0.707 p_{\max} \quad (1.5.4.)$$

2. INTENSITATEA SONORĂ reprezintă energia acustică transportată de undă, în unitatea de timp, prin unitatea de suprafață perpendiculară pe direcția de propagare. Cu alte cuvinte, intensitatea este puterea medie transportată prin unitatea de suprafață.

Se știe că puterea dezvoltată de o forță F este egală cu produsul scalar dintre forță și viteză:

$P = \vec{F} \cdot \vec{v}$. Într-un punct al spațiului, la un moment dat, intensitatea instantanee, i , va fi dată de raportul dintre puterea P și suprafața S :

$$i = \frac{P}{S} = \frac{F v_i}{S} = p_i v_i$$
, unde p_i și v_i sunt, respectiv, presiunea și viteza acustică, ambele ca valori momentane.

Intensitatea instantanee se măsoară în Watt/m².

Prin definiție, intensitatea este valoarea medie a intensităților instantanee.

Pornind de la expresia intensității undei care este proporțională cu pătratul frecvenței și cu

cel al amplitudinii undei, $I = \frac{\rho \omega^2 A^2 v_u}{2}$, și ținând cont de expresia presiunii maxime

$p_M = \omega A \rho v_u$, intensitatea acustică se scrie:

$$I = \frac{p_M^2}{2 v_u \rho} \quad (1.5.5.)$$

Atunci când o undă se propagă într-un mediu, acesta exercită o forță rezistivă care se opune mișcării. Această forță este proporțională cu impedanța caracteristică a mediului. Pentru undele sonore, avem impedanța sonoră: $Z = \rho \cdot v_u$.

Această mărime are un rol important atunci când unda sonoră întâlnește suprafața de separare a două medii.

Dacă impedanțele acustice ale celor două medii se potrivesc exact, atunci nu are loc nicio reflexie.

Dacă impedanțele acustice ale celor două medii nu sunt egale, atunci există și undă reflectată și undă transmisă (refractată) și se pierde energie în unda transmisă.

De această constatare teoretică se ține cont în ecografie, unde se folosește un gel ca adaptor de impedanță între capul sondei generatoare de ultrasunete și piele (rolul gelului este și acela de a nu lăsa formarea de goluri de aer unde ultrasunetele ar fi absorbite foarte mult).

BIOFIZICĂ ȘI BIOINGINERIE - Note de curs

Reflexia la suprafața de separare a două medii este caracterizată prin **coeficientul de reflexie** R : $R = E_r/E_i$, (1.5.6.)

unde E_r este energia unei reflectate, iar E_i energia unei incidente. În funcție de impedanța acustică caracteristică, Z , a mediului, coeficientul de reflexie va fi:

$$R = ((Z_1 - Z_2)/(Z_1 + Z_2))^2 \quad (1.5.7.)$$

Producerea undelor acustice într-o coardă vibrantă

Fie o coardă elastică, omogenă, absolut flexibilă întinsă de o forță \vec{F} tangentă la coardă (fără forțe transversale). Neglijăm forțele de frecare cu mediul exterior și neglijăm greutatea proprie a coardei. În coardă va apare o forță de tensiune \vec{F}' . Lăsată liberă, coarda începe să vibreze.

Presupunem oscilațiile tuturor punctelor coardei ca fiind în același plan fix $Ox\xi$ (Fig. 1.5.1.). În acest caz, vibrațiile care se vor propaga în coardă vor fi transversale și nu avem accelerație și forță rezultantă în direcția Ox (longitudinal la coardă):

Considerăm doar micile oscilații, astfel încât amplitudinea este puțin deasupra și dedesubtul axei orizontale Ox .

Adică într-o primă aproximație tensiunea este aceeași de-a lungul coardei, independent de poziția față de punctul de aplicație al forței.

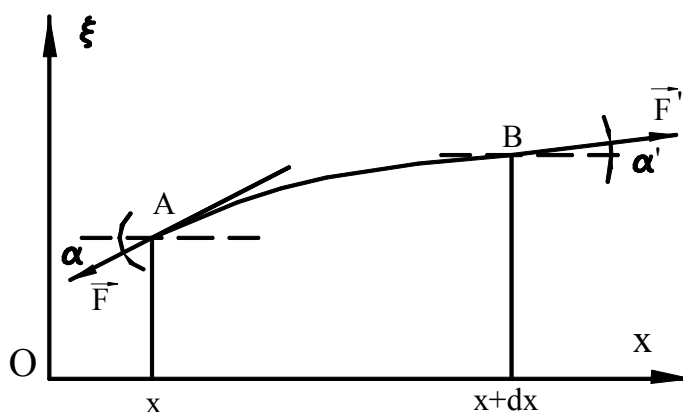


Fig. 1.5.1.

Ecuția diferențială a vibrațiilor transversale ale coardei, de tipul ecuației undelor:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{1}{v_u^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \quad (1.5.8.)$$

Aceasta este ecuația unidimensională generală a unei unde care se propagă de-a lungul unei singure direcții (în acest caz axa Ox).

În continuare vom presupune cunoscută situația în care se află coarda la capete (liberă sau prinsă de legături). Matematic, spunem că se cunosc condițiile la limită care se impun ecuației undelor. În acest caz, spunem că ecuația (1.5.8.) are ca soluție **undele staționare** care iau naștere din suprapunerea unei directe cu cea reflectată la capătul opus sursei de unde.

Pentru undele staționare caracteristică este **separarea fazei** $\omega t - kx$ de la unda progresivă într-un factor cosinusoidal spațial și unul cosinusoidal temporal defazate între ele:

$$\xi(x, t) = A \cos(kx + \varphi_1) \cos(\omega t + \varphi_2) \quad (1.5.9.)$$

unde se păstrează definițiile pentru modulul vectorului de undă și al pulsației, din capitolul anterior.

Constantele se determină din condițiile inițiale și de frontieră. De exemplu, pentru o coardă fixată la capătul $x = 0$, acolo va fi mereu $\xi(0, t) = 0$, adică **un nod**, soluția devine:

$$\xi(x, t) = A \sin(kx) \cos(\omega t) \quad (1.5.10.)$$

Dacă și celălalt capăt este fix, atunci $\xi(L, t) = 0$. Introducând în ecuația anterioară, se obține relația dintre lungimea corzii, L , și lungimea de undă λ :

$$\sin(kL) = 0 \Rightarrow kL = n\pi \Rightarrow L = n \frac{\lambda}{2} \quad \text{unde } n \in N \quad (1.5.11.)$$

Lungimea corzii este egală cu un număr întreg de jumătăți din lungimea de undă.

În acest caz, frecvențele care satisfac aceste condiții sunt:

$$v_n = \frac{v_u}{\lambda} = n \frac{v_u}{2L} = n v_1, \quad \text{unde } v_1 = \frac{v_u}{2L} \quad (1.5.12.)$$

și se numesc **frecvențele proprii ale corzii**.

Frecvența v_1 este **frecvența fundamentală** (prima armonică), iar frecvențele v_n reprezintă **frecvențele armonicilor superioare** și sunt egale cu un multiplu întreg al frecvenței fundamentale.

Tuburile sonore

Un **tub sonor** este de obicei un tub cilindric în interiorul căruia se află un gaz și care are la unul din capete o sursă, sub forma unei lamele care este pusă în vibrație prin suflarea aerului (Fig. 1.5.2.).

Analog coardei vibrante, și în cazul tuburilor sonore există o frecvență fundamentală și un șir de frecvențe proprii care se obțin din condițiile la limită. La capătul cu lamelă, trebuie să avem un ventru (maxim) și soluția ecuației undelor din interiorul tubului este de tip staționar:

$$\xi(x, t) = A \cos(kx) \cos(\omega t) \quad (1.5.13.)$$

Celălalt capăt poate fi închis (tub sonor închis) și acolo se va forma un nod sau deschis (tub sonor deschis) și atunci acolo se va forma un ventru

La tuburi deschise:

$$\cos(kL) = \pm 1, \quad kL = n\pi, \quad L = n \frac{\lambda}{2}, \quad n \in N \quad (1.5.14.)$$

Rezultă: lungimea tubului deschis este egală cu un număr întreg de semiunde, iar frecvențele proprii sunt:

$$v_n = n \frac{v_u}{2L} = n v_1, \quad \text{unde } v_1 = \frac{v_u}{2L} \quad (1.5.15.)$$

și se pot forma toate armonicile.

La tuburi închise:

$$\cos(kL) = 0, \quad kL = (2n-1)\pi/2, \quad L = (2n-1) \frac{\lambda}{4}, \quad n \in N \quad (1.5.16.)$$

Se observă că lungimea tubului închis este egală cu un număr întreg impar de sferturi de lungime de undă, iar frecvențele proprii sunt:

BIOFIZICĂ ȘI BIOINGINERIE - Note de curs

$$v_n = (2n-1) \frac{v_u}{4L} = (2n-1)v_1, \text{ unde } v_1 = \frac{v_u}{4L} \quad (1.5.16.)$$

și se pot forma doar armonicile impare: frecvențele proprii sunt multipli impari ai frecvenței fundamentale.

Frecvența fundamentală a unui tub sonor închis este jumătate din frecvența fundamentală a aceluiași tub sonor deschis.

Undele sonore complexe periodice pot fi descrise, pe baza teoremei lui Fourier, ca o sumă de unde sonore pure ale căror frecvențe, numite armonice, sunt multipli întregi ai unei frecvențe numită frecvență fundamentală.

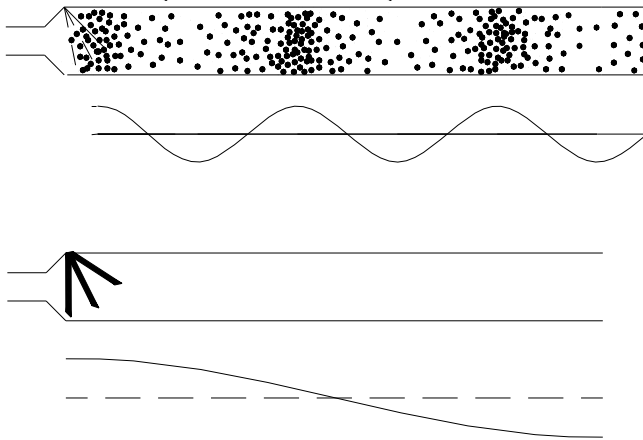


Fig. 1.5.2.

În Fig. 1.5.2., pentru tubul închis am figurat (la o scară exagerată) și distribuția moleculelor de gaz din interiorul tubului.

Se observă că acestea se deplasează formând regiuni cu densități mai mari sau mai mici de molecule.

Aceste rarefierii și compresii de particule corespund cu valorile presiunii care se stabilesc la propagarea undei (care este tot o funcție sinusoidală în timp și spațiu).

Pentru tubul deschis s-a figurat lamela care generează sunetele la un capăt al său.

Legea WEBER-FECHNER

Această lege stabilește o legătură între proprietățile undei și efectele pe care acestea le produc în urechea umană:

variația intensității senzației este proporțională cu logaritmul raportului dintre intensitățile respective ale excitației:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \Gamma \lg \frac{I_2}{I_1} \quad (1.5.17.)$$

Dacă luăm ca referință senzația produsă de intensitatea minimă, atunci

$$\Delta S = S - S_0 = \Gamma \lg \frac{I}{I_0} \quad (1.5.18.)$$

unde Γ este o constantă de proporționalitate.

Așadar, intensitatea excitației crește în progresie geometrică, atunci intensitatea senzației crește în progresie aritmetică. De aici rezultă necesitatea introducerii în acustică a unor mărimi corespunzătoare intensității senzației.

Nivelul de intensitate sonoră se definește: $N_s = \lg \frac{I_s}{I_{s,\min}}$ (1.5.19.)

unde I_s este intensitatea sonoră cu definiția generală dată mai sus, iar $I_{s,\min}$ este intensitatea sonoră minimă care mai poate fi percepută de ureche, pentru sunetul de referință cu frecvența 1kHz, numit și sunet normal.

Pentru o ureche normală, $I_{s,\min} = 10^{-12} \text{ W/m}^2$.

În Sistemul Internațional se folosește unitatea de măsură Bel, dar în practică, mai des se folosește decibelul $[N_s]_{SI} = 1\text{bel} = 1B = 10\text{dB}$.

Un bel reprezintă nivelul sonor al unui sunet cu $I_s = 10I_{s,\min}$.

mărimi fizice caracteristice undei de excitație-
presiunea sonoră, intensitatea sonoră,
nivelul de intensitate sonoră

mărimi fizice caracteristice senzației produsă în
urechea umană -
tăria sunetului, înălțimea sunetului,
timbrul sunetului

Mărimi fizice legate de senzația auditivă

Intensitatea sunetului este proporțională cu pătratul presiunii sonore, rezultând pentru nivelul de intensitate sonoră:

$$N_s = 10 \lg \frac{I_s}{I_{s,\min}} = 20 \lg \frac{\Delta p_s}{\Delta p_{s,\min}} = 20 \lg \frac{p_s}{p_{s,\min}} \text{ în dB}$$

unde presiunea sonoră minimă este $p_{s,\min} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2$ și corespunde pragului minim de intensitate sonoră: $I_{s,\min} = 10^{-12} \text{ W/m}^2$.

Intensitatea senzației auditive depinde nu numai de intensitatea sonoră a undei ci și de frecvența sa, fiind maximă între 1 și 3 kHz. În acest caz, legea Weber-Fechner se scrie:

$$\Delta S = S(I, \nu) - S_0(I, \nu) = \Gamma(\nu) \lg \frac{I(\nu)}{I_0} \quad (1.5.20.)$$

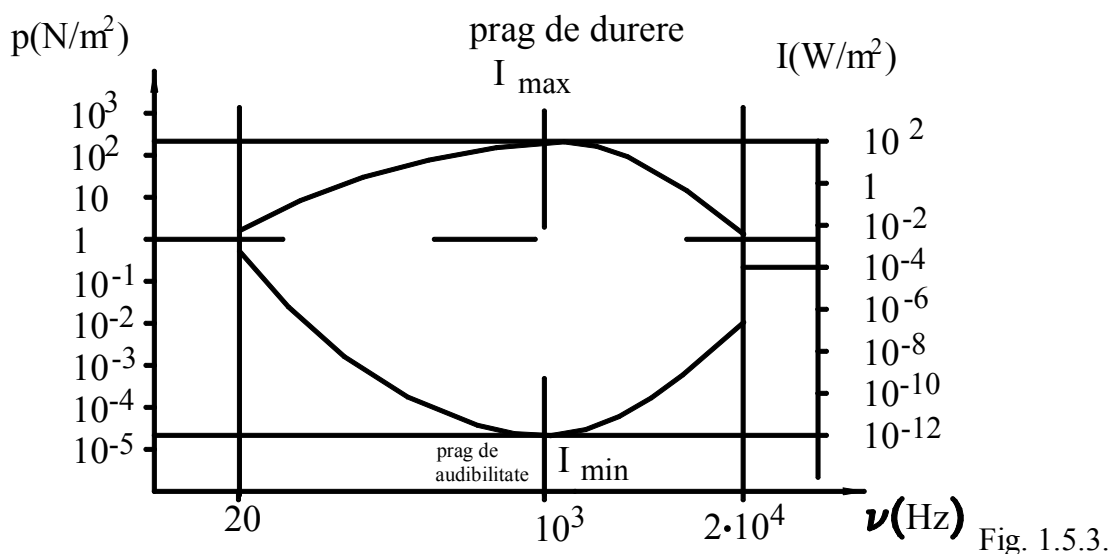
unde constanta depinde de frecvența sunetului, având un maxim la 2kHz, adică pentru sensibilitatea maximă a urechii. (Această constantă se determină experimental, iar în afara domeniului auzibil, ea este zero).

BIOFIZICĂ ȘI BIOINGINERIE - Note de curs

Dacă alegem intensitatea sonoră de referință I_0 variabilă cu frecvența, corespunzătoare pragului auditiv inferior, obținem expresia intensității senzației în funcție de intensitatea excitației:

$$S(I, \nu) = \Gamma(\nu) \lg \frac{I(\nu)}{I_0(\nu)} \quad (1.5.21.)$$

unde $I_0(\nu)$ descrie curba pragului auditiv inferior (Fig. 1.5.3.)



Pentru o anumită valoare a constantei Γ , ($\Gamma = 10$ pentru $\nu = 1$ kHz) ultima formulă definește mărimea fizică denumită *tăria sunetului* cu unitatea ei de măsură **phoni** (phon).

Tăria sunetului exprimată în phoni este egală cu nivelul sonor exprimat în decibeli al sunetului de referință de 1kHz care produce aceeași intensitate a senzației auditive.

Presiunea acustică este o mărime de excitație asupra urechii.

Acesteia îi corespunde mărimea de senzație în interiorul urechii, numită **tărie sonoră**. Prin definiție, *tăria sonoră reprezintă intensitatea subiectivă a sunetelor*.

Un phon corespunde aproximativ puterii de rezoluție a urechii relativ la tăria sunetului.

Pentru a măsura practic în phoni tăria unui sunet, se procedează prin comparație.

Se reglează intensitatea sunetului de referință la 1kHz până obținem aceeași intensitate a senzației auditive cu cea a sunetului de măsurat (aceeași tărie subiectivă a sunetului). Atunci nivelul sonor în decibeli al sunetului de referință ne dă tăria în phoni a sunetului măsurat.

O altă mărime care este legată de perceperea sunetelor de către ureche este **înălțimea tonală**. După valoarea acesteia, sunetele sunt împărțite în sunete acute (înalte - frecvențe mari) sau joase (grave - frecvențe mici).

Înălțimea este legată de frecvența undei sonore. Analizatorul auditiv normal percepe sunete cu frecvențe între 16 și 20 000Hz.

Unitatea de înălțime tonală care permite descrierea intervalelor muzicale este **Savart-ul**. Valoarea, exprimată în Savart, a unui interval între două note de frecvențe ν și ν' este dată de relația:

$$I_t = 10^3 \log \frac{\nu'}{\nu} \text{ Savart} \quad (1.5.22.)$$

Sunetele care produc în analizatorul auditiv o senzație de înălțime tonală sunt sunete complexe și periodice sau cvasiperiodice (vocalele, multe dintre sunetele produse de instrumentele muzicale). Un sunet complex de frecvență fundamentală ν are aceeași înălțime tonală ca un sunet pur de aceeași frecvență (sau, cu alte cuvinte, înălțimea tonală a unui sunet complex este determinată de frecvența sa fundamentală).

O altă calitate a sunetelor prin care se diferențiază însă un sunet complex de sunetul pur de aceeași înălțime tonală este o **caracteristică a senzației** numită **timbru**, care permite deosebirea sunetelor, chiar dacă unda fundamentală are aceeași amplitudine și frecvență.

Timbrul poate fi definit ca reprezentând acea componentă a senzației auditive care permite să se diferențieze două sunete care au aceeași înălțime tonală și aceeași tărie sonoră.

Astfel, două note interpretate de două instrumente muzicale diferite, la un nivel de intensitate identic, vor produce senzații diferite; se poate spune că au **sonoritate** diferită. Nu numai în cazul instrumentelor muzicale, dar și în cazul vocii umane se poate vorbi de timbru sonor, care permite recunoașterea vocii unei persoane.

Producerea sunetelor în corzile vocale

Observațiile deduse la coardele și tuburile sonore se folosesc pentru a explica producerea sunetelor în cazul organismelor superioare, pentru care organele specializate în producerea sunetelor se găsesc în gât, în partea superioară a aparatului respirator.

Organismele superioare folosesc aerul pentru generarea sunetelor, la acest proces contribuind întregul sistem al căilor respiratorii superioare, controlat de sistemul nervos.

La păsări, de exemplu, aparatul vocal se găsește în partea superioară a traheei. Aceasta are capacitatea de a se lungi sau a se scurta, acționând pe principiul tubului de orgă, ceea ce explică și deosebita frumusețe a cântecului unor specii de păsări.

La om, formarea sunetelor se realizează în procesul de expirație. Tractul vocal este o cavitate deschisă care include cavitatea nazală, bucală, faringele, laringele. Traheea este asemenea unui tub sonor, laringele formează cutia de rezonanță, iar coardele vocale din glotă au rol de modulator.

Aceste procese formează intonația și generează înălțimea și tonul sunetului produs. În final, aerul modulat este filtrat în gură, nas, gât, proces numit articulare.

Laringele se află în partea superioară a traheei; în el se află cele patru coarde vocale, între care există o deschizătură (diferită la femei și bărbați).

Coardele vocale sunt formate din țesuturi asemănătoare pielii dar foarte fine; ele sunt învelite într-o membrană mucoasă, cu proprietatea de a se micșora sau de a se întinde. La formarea sunetelor participă și mușchiul lingual, bolta, vâlul, incisivii.

Aerul este forțat de către plămâni să se miște în sus prin trahee, apoi trece pe lângă coardele vocale care încep să vibreze. Ele au o lungime de aproximativ 2cm.

Pentru o voce puternică, trebuie să crească curentul de aer, în consecință va crește și amplitudinea oscilațiilor coardelor vocale.

BIOFIZICĂ ȘI BIOINGINERIE - Note de curs

Frecvența oscilațiilor coardelor vocale depinde de lungimea lor: cu cât coardele vocale sunt mai lungi, cu atât sunt mai puțin întinse și cu atât oscilațiile sunt mai lente (perioade mari, frecvențe mici). Ca urmare, vocea va fi mai joasă, profundă, gravă. La femei coardele vocale sunt mai scurte iar vocea mai acută, înaltă.

Cavitatea nazală – are rol în producerea sunetelor *nazale*: “m” și “n”. Curentul de aer intră în cavitatea nazală, când vălul palatin este în poziție coborâtă. Dacă vălul palatin este ridicat, întreg curentul de aer intră în cavitatea bucală și prin rostire se obțin sunete *orale*.

1.6. Analizatorul auditiv

Urechea umană este un receptor excepțional, analizează sunetul ca un aparat spectral, descompunându-l în spectrul oscilațiilor armonice simple.

Ea poate fi considerată ca un *detector de sunete sensibil atât la frecvența acestora, cât și la intensitatea lor*.

De exemplu, pentru $\nu \approx 1\text{kHz}$, **intensitatea minimă** a pragului auditiv inferior este $I_{\text{inf}} = 10^{-12} \text{ W/m}^2$, iar **intensitatea maximă** este $I_{\text{sup}} = 10^2 \text{ W/m}^2$. Dacă ținem seama că suprafața timpanului este sub 1cm^2 , atunci **energia** incidentă pe secundă, la pragul auditiv inferior este de 10^{-16} J .

În cazul urechii umane, pe baza mai multor măsurători, la diferite persoane, se obțin curbele mediate. Pe ele se observă că întreaga **scală a tărilor sonore cuprinde 140phoni** indiferent de frecvența audibilă.

Amplitudinea de vibrație a moleculelor mediului în care se propagă sunetul, la frecvența de 1kHz , se poate calcula astfel:

$$I = \frac{1}{2} \rho_0 v_u \omega^2 A^2 \Rightarrow A = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{2I}{\rho_0 v_u}} = \frac{1}{2\pi \cdot 10^3} \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-12}}{428}} = 10^{-11} \text{ m} = 0.1 \text{ \AA}$$

adică o zecime din diametrul atomului de hidrogen. Același calcul, dar pentru pragul auditiv sonor superior ne dă o valoare a amplitudinii de 0.1mm . În concluzie, putem spune că urechea este un aparat care măsoară mărimi de la nivelul atomic până la cel macroscopic.

Structura generală și construcția aparatului auditiv al omului este reprezentată schematic în Fig. 1.6.1. Părțile principale ale sale sunt: urechea externă, medie și internă.

- **URECHEA EXTERNĂ** cu rolurile:

recepție și
direcționare a undelor sonore.

Părți componente: pavilion, canal auditiv extern, timpan

Ea se află între exterior și membrana timpanică (inclusiv). În recepție, rolul principal îl are pavilionul, care, prin forma sa, permite și stabilirea foarte precisă a direcției din care provine sunetul (eroare de $3-4''$).

Sunetele care intră prin pavilion sunt direcționate prin canalul auditiv extern, spre membrana timpanică care are o formă conică cu secțiune elipsoid, cu vârful spre interior.

Forma conică dă posibilitatea utilizării întregii suprafețe, spre deosebire de membranele plane unde este utilă doar 1/3 din suprafață.

Timpanul vibrează sub acțiunea sunetelor, frecvența lui de rezonanță fiind în jur de 1400Hz.

El are și o masă foarte mică, ceea ce înseamnă o inerție mică, proprietate care îi conferă posibilitatea de a se opri din vibrație foarte repede (aproximativ. 10^{-3} s), astfel încât distingem separat fiecare sunet dintr-o succesiune. Putem spune că timpanul este un oscilator amortizat cu un factor de amortizare foarte mare.

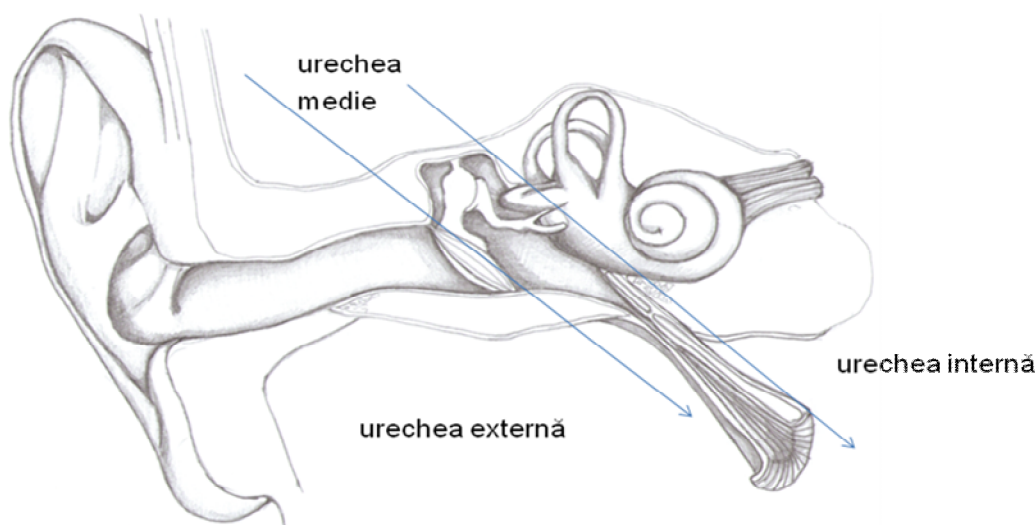


Fig. 1.6.1

Posibilitatea de a aprecia spațialitatea și direcția de proveniență a undelor sonore este condiționată de prezența sistemului auditiv în număr par - efectul binaural. Senzația de direcție a undelor sonore apare datorită capacității centrilor creierului de a aprecia diferența de fază a oscilațiilor ajunse la ureche. La sunetele de înaltă frecvență aprecierea direcției sunetului se datorează diferenței de amplitudine între sunetele recepționate de fiecare ureche.

- URECHEA MEDIE cu rolurile

transmiterea undelor sonore dinspre urechea externă spre cea internă

atenuare sau amplificare a vibrațiilor

egalizare a presiunilor, internă și externă, asupra timpanului

Ea se află între membrana timpanică și peretele intern, fiind o cavitate în osul temporal. Cu urechea internă comunică prin două orificii: **fereastra ovală** (în partea superioară) și **fereastra rotundă** (în partea inferioară).

Părțile componente (Fig. 1.6.2.) sunt:

- cele trei oscioare (ciocan, nicovală, scăriță) cu articulații și mușchi proprii

- trompa lui Eustachio.

Comunicarea cu cavitatea nazofaringiană este asigurată prin intermediul unui tip de valvă, trompa lui Eustachio, care se află în partea inferioară a urechii medii. Ea asigură egalizarea presiunilor de o parte și de alta a timpanului. În mod obișnuit, ea stă închisă, nedeschizându-se decât în cazul când înghițim sau căscăm, ceea ce face

BIOFIZICĂ ȘI BIOINGINERIE - Note de curs

să nu se transmită la timpan propria voce sau zgomotul respirației. De aceea, în cazul variațiilor rapide de presiune (urcarea cu telefericul, zborul cu avionul) trebuie să înghițim în sec. Dacă trompa e înfundată (afecțiuni), aerul e absorbit în țesuturi, egalizarea presiunilor nu se mai produce (urechea medie se videază), ceea ce duce la o funcționare incorectă a timpanului.

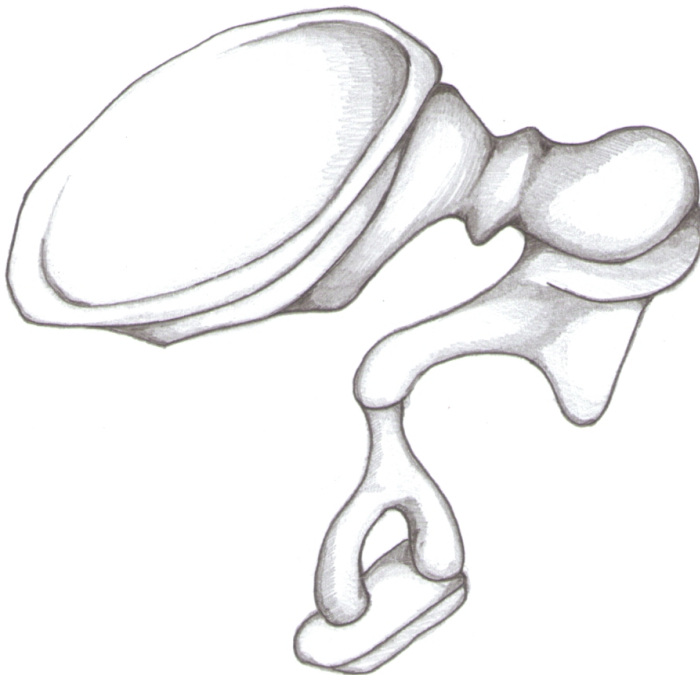


Fig. 1.6.2.

Sistemul de oscioare: ciocanul, nicovala și scărița sunt articulate între ele și puse în mișcare de mușchii proprii.

Ciocanul stă sprijinit de timpan (stânga), iar scărița de fereastra ovală (dreapta sus). Ele funcționează ca niște pârghii și au rolul de a transmite undele sonore de la timpan la urechea internă și de a le atenua sau amplifica.

Contractia mușchiului ciocanului duce la diminuarea amplitudinii vibrațiilor, iar contractia mușchiului scăriței duce la amplificarea oscilațiilor. Acest mecanism intervine în adaptarea urechii la intensități diferite ale sunetelor (putem auzi și zgomote foarte puternice, dar și șoapte cu intensități foarte mici).

Tot prin intermediul celor trei oscioare se realizează și fenomenul numit ”adaptarea impedanțelor”, deoarece cele două medii (aerul din care vin undele sonore și perilimfa, endolimfa în care se vor transmite undele), au proprietăți elastice diferite. Transferul de energie de la mediul gazos la cel lichid trebuie să se facă cu eficiență maximă, ceea ce se realizează dacă raportul presiunilor sonore între fereastra ovală și timpan, este de 61. La pisică, acest raport este de 60, iar la om de 29, ceea ce explică auzul fin al pisicii.

Creșterea presiunii la nivelul urechii interne se datorează dimensiunii mici a suprafeței ferestrei ovale (de exemplu 55mm^2 la timpan și doar $2,5\text{mm}^2$ la nivelul ferestrei ovale).

- **URECHEA INTERNĂ** cu rolurile de
 - transmitere a undelor sonore
 - orientare spațială și menținere a echilibrului
 - transformare a vibrațiilor mecanice în potențiale de acțiune în nervul auditiv și codificarea caracteristicilor undelor sonore.

Ea este formată din (Fig. 1.6.3.)

- **labirintul osos umplut cu perilimfa.** În centrul labirintului osos se află **vestibulul osos** care comunică cu **trei canale semicirculare** perpendiculare între ele și cu **melcul osos**.
- **labirintul membranos umplut cu endolimfa.**
 - vestibulul mai umflat în dreptul ferestrelor și cu două cavități rotunjite
 - utricula (superior),
 - sacula (inferior),
 - trei canale membranoase și
 - melcul membranos
 - endolimfa
 - organul Corti pe membrana bazilară conține un spațiu triunghiular - tunelul Corti - traversat de fibrele dendritice ale neuronilor din ganglionul spiral Corti
 - » celule de susținere, iar deasupra lor
 - » celule ciliate interne și externe care pătrund în membrana reticulată secretată de celulele de susținere, iar deasupra lor
 - » membrana tectoria
- **1. labirintul osos umplut cu perilimfa** În centrul labirintului osos se află **vestibulul osos** care comunică cu cele 3 canale semicirculare (perpendiculare între ele) și melcul osos. Vestibulul osos comunică prin intermediul ferestrelor ovală și rotundă cu urechea medie. Canalele semicirculare prezintă o extremitate mai dilatată (ampula).
- Rolul de orientare spațială și menținere a echilibrului este îndeplinit cu ajutorul canalelor semicirculare din labirintului membranos. Diferite accelerații ale capului (gravitaționale, de inerție) modifică dinamica fluidelor din canale care acționează asupra cililor celulelor senzitive prezente atât în canalele semicirculare cât și în utriculă și saculă. Acestea se transmit cerebelului care le transformă în cunoștințe pe baza cărora omul ia decizii de păstrare a echilibrului (vezi capitolul 3 - analizatorul vestibular).

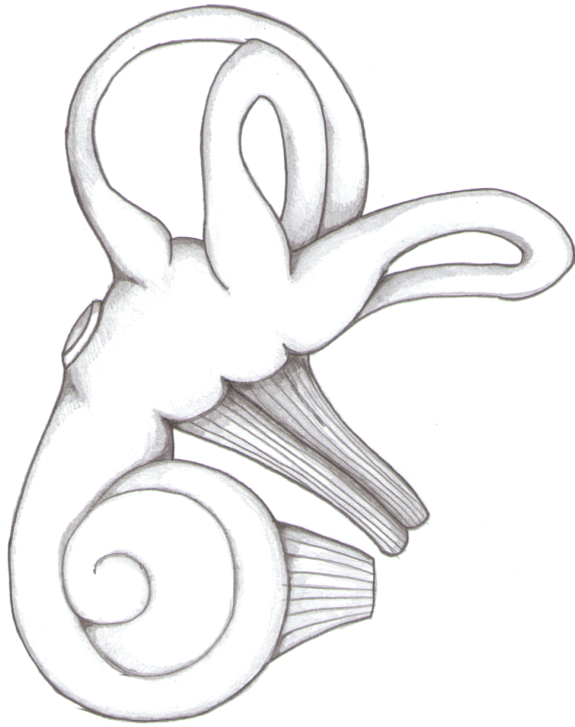


Fig. 1.6.3.

Melcul osos este situat anterior față de vestibul și este format dintr-un canal osos de aproximativ 3 cm lungime, spiralat și din ce în ce mai subțire, având 2,75- 3,5 spire în jurul unui ax central - **columela**. Pe columelă se prinde membrana (lama) osoasă, care este așezată orizontal.

Aceasta este întregită de **membrana bazilară** și, împreună, împart canalul melcului în două rampe: **vestibulară** spre fereastra ovală (sus) și **timpanică** spre fereastra rotundă (jos).

Cele două rampe conțin perilimfa și comunică între ele la vârful melcului osos printr-un orificiu (spațiu liber) – **helicotrema**.

2. labirintul membranos umplut cu endolimfa. În alcătuirea lui intră: utricula, sacula, 3 canale semicirculare membranoase și melcul membranos. Utricula și sacula se află în vestibulul osos și comunică între ele. Utricula comunică cu cele 3 canale semicirculare membranoase și sacula comunică cu melcul membranos. Melcul membranos este de fapt canalul cohlear și este împărțit pe aproape toată lungimea lui de membrana bazilară. El conține endolimfa și organul Corti fixat pe toată lungimea membranei bazilare.

Organul Corti conține celule ciliate și celule de susținere.

Celulele ciliate sunt de două tipuri: interne și externe. Cilii celulelor interne sunt liberi în endolimfă. Principalul rol în transformarea vibrațiilor mecanice în potențiale de acțiune revine celulelor ciliate externe care au cilii în contact cu membrana tectoria. Fiecare celulă ciliată este conectată prin intermediul sinapselor chimice cu mai multe fibre nervoase ale nervului auditiv.

Potențialul de acțiune este o depolarizare trecătoare a membranei celulare prin care interiorul celulei devine mai puțin negativ decât în stare de repaus și diferența de potențial de-o parte și de alta a membranei celulare scade.

Membrana bazilară (Fig. 1.6.4.) este formată dintr-o parte osoasă, în interiorul căreia se găsește *ganglionul spiral al lui Corti*, și o parte elastică, formată din aproximativ 24.000 de fibre elastice transversale. Ea are o lățime variabilă de-a lungul întregii cochilii 0,01 mm la nivelul ferestrei ovale și 0,065 mm la nivelul helicotreței (la vârf).

Frecvența proprie de vibrație a membranei bazilare diferă de la punct la punct.

Astfel, undele sonore de frecvențe mari (20 kHz) vor produce vibrații de amplitudine mare la baza membranei bazilare și pe măsura scăderii frecvenței, maximul amplitudinii de oscilație se va realiza mai aproape de vârf.

În cazul acțiunii unui sunet compus vor vibra mai multe regiuni ale membranei bazilare. Fiecare regiune comunică cu anumite extremități nervoase. Deci în cazul sunetului compus, sunt excitate mai multe extremități nervoase, încât omul poate percepe componentele sunetului compus în mod separat.

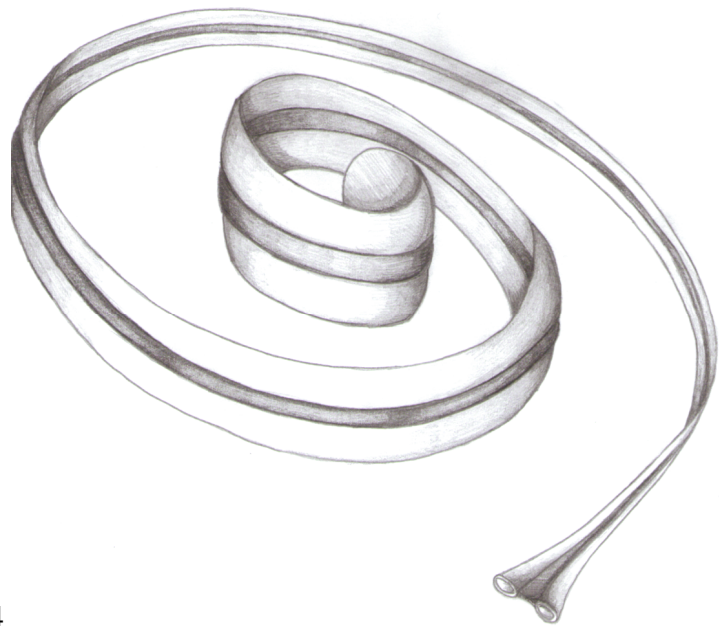


Fig. 1.6.4.

O altă împărțire a urechii interne după roluri, este:

- partea vestibulară cu rol de traductor de poziție: vestibulul membranos cu cele două cavități rotunjite (utricula și sacula) și cele trei canale semicirculare (vezi capitolul 3)
- partea auditivă cu rol de traductor al mișcării mecanice de vibrație în impuls nervos: melcul osos și melcul membranos

Mecanisme biofizice Transformarea vibrațiilor mecanice în impulsuri nervoase

Potențialul de acțiune este o depolarizare trecătoare a membranei celulare prin care interiorul celulei devine mai puțin negativ decât în stare de repaus și diferența de potențial de-o parte și de alta a membranei celulare scade.

Pavilionul urechii dirijează undele sonore spre canalul auditiv, unde acestea își schimbă frontul de undă din formă sferică în formă plană (păstrându-și densitatea de energie).

Apoi, deși trece prin mai multe sisteme, unda sonoră își păstrează toate caracteristicile inițiale până la membrana bazilară. Deoarece aceasta are o secțiune variabilă, unda sonoră se descompune în componentele ei (analiză Fourier). La nivelul celulelor ciliate are loc și transformarea naturii informațiilor din informații de tip mecanic în informații de tip electric apoi chimic și în final din nou electric (potențiale de acțiune) la nivelul nervului auditiv.

Deoarece aria membranei timpanice este de circa 65 mm^2 , iar cea a ferestrei ovale de circa $2,5 \text{ mm}^2$, presiunea poate fi amplificată de aproximativ 29 de ori, la forțe sensibil egale

transmise prin sistemul de oscioare $\frac{P_{\text{timpan}}}{P_{\text{ferestra}}} = \frac{S_{\text{ferestra}}}{S_{\text{timpan}}} = 1/29$.

Nivelul amplificării poate fi controlat prin intermediul mușchilor care acționează ciocanul și scărița.

Acestea pot modifica forța de acțiune asupra ferestrei ovale.

Vibrațiile ferestrei ovale sunt în antifază cu cele ale aerului din urechea medie și cu cele ale ferestrei rotunde (când fereastra ovală este deformată maxim spre interior fereastra rotundă este deformată maxim spre exterior). Aceasta duce la o deformare mai mare a membranei bazilare, echivalentă cu o amplificare suplimentară (de circa 6 dB).

Prin fereastra ovală undele pătrund în urechea internă prin canalul superior (rampa vestibulară) și sunt transmise prin lichidul limfatic către canalul inferior (rampa timpanică) și, de aici, la fereastra rotundă cu rol de supapă.

Prin geometria sa, membrana bazilară este mai rigidă la bază decât la vârf.

Pentru o presiune constantă, deformarea datorată oscilațiilor acesteia, la vârf este de 10^5 ori mai mare decât la bază. Aceasta face ca oscilațiile de presiune de la nivelul rampei vestibulare să se traducă la nivelul membranei bazilare printr-o undă care se propagă progresiv de la bază către vârf. În funcție de frecvența undei, amplitudinea acesteia atinge o valoare maximă într-un anumit punct al membranei, după care scade rapid la zero.

Vibrațiile fibrelor elastice ale membranei bazilare excită cea parte a organelor Corti cu care sunt în contact, rezultând un influx nervos. Frecvența semnalului este „determinată” de către sistemul nervos, în funcție de punctul de pe membrană în care amplitudinea semnalului este maximă.

Frecvențele înalte sunt „traduse” în partea inferioară a membranei, în timp ce frecvențele joase sunt percepute în partea superioară.

Amplitudinea minimă de vibrație a membranei bazilare la care apare răspunsul nervos (potențialul de acțiune) este mai mică de 0.35nm.

Localizarea amplitudinii maxime de vibrație pe membrana bazilară are loc, prin rezonanță, acolo unde frecvența undei sonore coincide cu frecvența proprie de vibrație a membranei.

Vibrațiile din endolimfă și deformarea membranei bazilare determină îndoirea cililor celulelor ciliate interne cu precădere a celor situate în regiunea de deformare maximă a membranei bazilare.

Deformarea cililor determină deschiderea unor canale de potasiu și pătrunderea ionilor K^+ (din endolimfa bogată în potasiu) în celula ciliată al cărei interior este la potențial negativ. Ca urmare, are loc depolarizarea membranei celulare și eliberarea neurotransmițătorului (glutamat) în capătul celulei dinspre membrana bazilară unde se găsesc sinapsele cu fibrele nervoase asociate celulei respective.

Mediatorul chimic produce stimularea neuronilor și apariția potențialelor de acțiune.

Se pare că intensitatea sunetelor este codificată prin frecvența potențialelor de acțiune din fibrele nervoase, iar tonalitatea este obținută din ambele codificări pentru fiecare armonică.

Celulele ciliate au cili dispuși pe trei rânduri, cu mărimi diferite. Ele se formează până în a zecea săptămână de sarcină și nu se refac niciodată de-a lungul vieții nici natural, nici forțat. De aceea organul auditiv trebuie protejat față de intensități mari ale undei incidente.

1.7. Ultrasunete

infrasonete cu frecvența sub 16 Hz

sunete cu frecvența cuprinsă între 16Hz și 20kHz

ultrasunete cu frecvența cuprinsă între 20kHz și 10^6 kHz

hipersunete au frecvența între 10^6 kHz și 10^{11} kHz.

Proprietățile ultrasunetelor:

nu sunt percepute de urechea umană;

pot transporta o cantitate mare de energie;

sunt puternic absorbite în gaze și puțin în lichide;

directivitate → se pot obține și sub forma unor fascicule înguste;

Intensitățile ultrasunetelor pot fi până la 10^5 W/m², iar presiunea sonoră până la 10 atm. Ca și sunetele, ultrasunetele se propagă cu viteze care depind numai de proprietățile mediului prin care se propagă. Toate fenomenele specifice undelor sunt valabile și în acest caz: reflexia, refracția, dispersia, difracția, interferența, absorbția, difuzia.

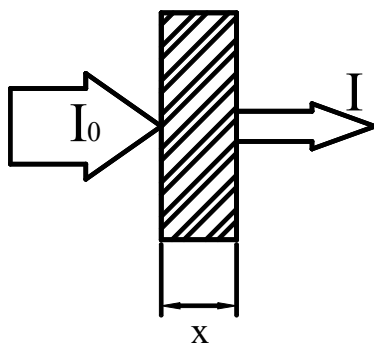


Fig. 1.7.1.

Ultrasunetele sunt puternic absorbite în gaze și slab absorbite în lichide și solide (1.7.1.). Scăderea valorii intensității incidente este exponențială, conform legii Lambert:

$$I = I_0 \exp(-\mu x) \quad (1.7.1)$$

μ - coeficientul de atenuare, proporțional cu v^2 ;

I_0 – intensitatea undei incidente;

BIOFIZICĂ ȘI BIOINGINERIE - Note de curs

I – intensitatea undei emergente;

x – grosimea stratului de substanță străbătut;

Energia absorbită în mediul în care se propagă unda ultrasonoră este transformată în căldură.

În același mediu, ultrasunetele vor disipa cu atât mai multă căldură cu cât frecvența lor este mai mare.

Deoarece ultrasunetele sunt folosite în medicină, atât în explorări funcționale, cât și în terapie, trebuie să se țină seama de acest efect important.

Deoarece lungimile lor de undă sunt de ordinul milimetrilor, pentru obstacole obișnuite, fenomenul de difracție a ultrasunetelor este slab și, de aceea, se pot obține fascicule înguste, bine dirijate. Acestea se pot folosi în tehnica hidrolocației ultrasonore (detectarea obiectelor submarine). Și comunicația submarinelor se bazează pe ultrasunete.

Efectele ultrasunetelor

1. Efecte fizice
2. Efecte chimice și electrochimice
3. Efecte biologice

1. Efectele fizice pot fi: mecanice (cavitație, omogenizare, precipitare, coagulare, dispersie), termice (provoacă încălziri locale), electrice (formarea dublului strat ionic la suprafața de separare dintre două medii cu apariția unor diferențe de potențial, ionizări), optice (modificarea indicelui de refracție al substanței).

Cavitația. La intensități mari ale ultrasunetelor, datorită frecvențelor mari, se produc rarefieri ale lichidelor atât de puternice încât se formează goluri sau cavități (ruperi locale) care conțin vapori de lichid sau gaze rarefiate. Acestea au timp de viață scurt (10^{-6} s), dar în care se pot produce diferite fenomene: excitarea și ionizarea unor molecule, apariția unor diferențe de potențial electric între pereții cavității, care pot duce la descărcări electrice în gazele rarefiate din cavitate, emisii de radiații luminoase (ultrasonoluminescență), formare de radicali liberi foarte activi și nocivi. Imediat are loc creșterea presiunii (mii de atmosfere) în interiorul cavității care rămâne la volum aproximativ constant. Acestea pot avea ca efect ruperea unor structuri sau a unor macromolecule aflate în apropiere.

Fenomenul de cavitație poate fi utilizat la prepararea suspensiilor (particule solide fine dispersate în lichide) și emulsiilor (amestecuri de două substanțe lichide diferite). Aceste fenomene își găsesc aplicații în obținerea unor aliaje omogene sau a unor plăci fotografice sau holografice de mare sensibilitate, cu granulație fină (ceea ce duce la rezoluții mari).

Ultrasunetele sunt folosite și la depistarea unor defecte de tipul fisuri, goluri în interiorul pieselor metalice (metodă nedistructivă). Această tehnică numită defectoscopie sonoră se bazează pe faptul că aceste defecte conțin gaze care absorb puternic ultrasunetele.

O altă proprietate a ultrasunetelor folosită în defectoscopie este direcționalitatea lor. Practic, se poate plimba piesa între un generator și un receptor de ultrasunete, sau se emite un impuls scurt în piesă, se măsoară timpul în care el se întoarce și se compară acesta cu timpul necesar propagării în același material omogen.

În navigație, ultrasunetele sunt folosite pentru studiul reliefului submarin, detectarea vapoarelor, submarinelor, icebergurilor, bancurilor de pești. Această tehnică se numește locație ultrasonoră și se bazează pe faptul că ultrasunetele sunt slab absorbite în apă. Măsurătorile implică determinarea timpului scurs de la emiterea undei până la receptarea celei reflectate, deducându-se apoi valorile distanțelor dintre sursă și obiectele pe care s-a realizat reflexia.

2. Efectele chimice și electrochimice pot fi de oxidare, reducere, polimerizare, depolimerizare, sinteză, modificare a conductibilității electrice a lichidelor. Pot accelera și chiar provoca unele reacții chimice (explozia unor explozivi instabili). Cu ajutorul ultrasunetelor se pot scoate din lichide anumite gaze dizolvate acolo.

3. Efectele biologice ale ultrasunetelor sunt consecința efectelor fizico-chimice asupra structurilor vii. În funcție de intensitatea ultrasunetelor, există trei categorii de efecte:

a. Ultrasunetele de intensitate mică, $< 0,5 \text{ W/cm}^2$, produc modificări funcționale.

b. Ultrasunetele de intensitate medie, $0,5 < I < 5 \text{ W/cm}^2$, produc modificări structurale reversibile.

c. Ultrasunetele de intensitate mare, $> 5 \text{ W/cm}^2$, produc modificări structurale ireversibile. Pot fi utilizate la distrugerea bacteriilor, prepararea vaccinurilor și distrugerea tumorilor, sterilizarea și conservarea alimentelor.

Efectele termice (încălziri locale) pe care le produc atunci când sunt incidente pe anumite țesuturi, se pot folosi la tratarea unor nevralgii. La frecvențe de peste 8000kHz, se folosesc pentru masaj.

Efectele sunt produse datorită faptului că se excită puternic protoplasma celulelor. Efectele cele mai puternice se produc atunci când acestea au lungimi de undă de același ordin de mărime cu al diametrelor celulelor. În acest caz se pot observa modificări importante în respirație, funcțiile sângelui, ficatului, splinei.

Ultrasonoterapia

Ultrasunetele se pot utiliza atât în terapie cât și în diagnostic. **Ultrasonoterapia reprezintă toate metodele care folosesc ultrasunetele în terapia diferitelor afecțiuni:**

Ultrasunetele din categoriile a și b de intensitate pot fi folosite în tratamentul stărilor reumatismale, afecțiunilor sistemului nervos periferic, nevralgiilor, nevritelor (diatermie cu ultrasunete), în afecțiuni ale aparatului locomotor, nervilor periferici, aparatului circulator, în tratamentul bolii ulceroase, spasme pilorice, intestinale etc

Ultrasunetele de înaltă frecvență sunt puternic absorbite și produc efecte locale. Ultrasunetele de joasă frecvență produc efecte generale.

Dozele mijlocii produc vasodilatație, cele mari vasoconstricție, iar cele mijlocii sunt folosite pentru a mări permeabilitatea pielii la trecerea medicamentelor.

Frecvențele optime de utilizare sunt cuprinse între 800-1200 kHz, iar adâncimea de pătrundere în țesuturi este de 5-7 cm.

Producerea și detecția ultrasunetelor

Generarea și detecția ultrasunetelor se poate face prin metode: mecanice, termice, electromecanice (efect piezoelectric) sau magnetomecanice (efectul magnetostrictiv).

Producerea ultrasunetelor se bazează pe fenomenul de electrostricțiune - efectul piezoelectric invers. Efectul piezoelectric se produce în anumite cristale (cuarț, turmalină, sare Seignette, fosfat de amoniu, etc).

BIOFIZICĂ ȘI BIOINGINERIE - Note de curs

Efectul piezoelectric direct constă în apariția unei diferențe de potențial între două fețe ale unei plăcuțe cristaline atunci când acesteia i se aplică o deformare mecanică pe direcția respectivă sau pe una perpendiculară. Acest efect e folosit pentru detectarea ultrasunetelor.

Efectul piezoelectric invers constă în apariția unei deformări mecanice dacă între două fețe ale plăcuței se aplică un câmp electric. Acest efect e folosit pentru generarea ultrasunetelor.

Aparatele care funcționează pe baza acestor efecte sunt folosite ca **generatoare de ultrasunete, receptoare sau traductoare** (transformă un semnal electric într-unul mecanic sau invers).

Cristalele care prezintă aceste proprietăți sunt tăiate după anumite plane geometrice. Atunci când sunt supuse unor câmpuri electrice alternative, ele se comprimă și se dilată, producând vibrații cu frecvențe în domeniul corespunzător ultrasunetelor. Amplitudinea vibrațiilor produse în cristal este maximă pentru o frecvență egală cu frecvența proprie de rezonanță a cristalului. De aceea, grosimea ei se alege astfel încât să vibreze în rezonanță cu câmpul exterior (aplicat de obicei prin intermediul unui condensator).

De obicei, lama care generează ultrasunetele poate funcționa și ca receptor, datorită efectului invers. Ea este atinsă de către unda ultrasonoră și intră în vibrație. Datorită contracțiilor și dilatațiilor lamei, vor apărea sarcini electrice pe fețele sale, care vor fi apoi colectate, amplificate și interpretate.

MATERIALE Traductoarele electrostrictive folosesc dielectrici (ex. titanat de bariu) în loc de cristale. Materialul piezoelectric care este folosit în cele mai multe aplicații de diagnosticare medicală, ca traductor de ultrasunete, este titanatul de zirconiu și plumb PbZrTi, cunoscut și sub numele de PZT.

Cuarțul cristalizează în sistemul hexagonal. Acesta are cele trei axe: optică, mecanică, electrică, reciproc perpendiculare. Pentru a-l folosi la generarea ultrasunetelor, acesta se taie paralel cu axele.

O comprimare pe axa electrică produce sarcini electrice pe fețele perpendiculare pe axă, acesta fiind **efectul piezoelectric longitudinal**.

O tracțiune pe axa mecanică produce un efect similar, iar efectul se numește **efect piezoelectric transversal**. Deformarea în primul caz este $\Delta l_l = K_l V$ unde K_l este modulul piezoelectric longitudinal, iar V este diferența de potențial dintre cele două fețe.

Deformarea în al doilea caz este $\Delta l_t = K_t V \frac{l_m}{l_e}$ unde K_t este modulul piezoelectric

transversal, iar l_m și l_e sunt grosimile axelor mecanică și electrică. Aceste relații sunt valabile până la 2500V. Cel mai des, grosimea plăcuței de cuarț este egală cu o jumătate de lungime de undă. De exemplu, pentru a genera un sunet de 2 kHz, grosimea ei trebuie să fie de aproximativ 1.3mm.

În ambele efecte este necesar ca dimensiunile plăcuțelor să fie alese astfel încât frecvența lor proprie să coincidă cu frecvența de excitație (frecvența câmpului electric sau magnetic). În acest caz, aceste generatoare lucrează în regim de rezonanță.

De exemplu, pentru un condensator de cuarț, acesta vibrează cu frecvența $v_t = \sqrt{E_t / \rho} / (2l_e)$ în cazul efectului transversal și $v_l = \sqrt{E / \rho} / (2l_m)$ în cazul efectului longitudinal.

Constantele sunt: E_t modul de forfecare și E modul de elasticitate.

Practic, se folosesc ambele tipuri de vibrații: pentru frecvențe mari se folosesc lame de grosime mică, iar pentru frecvențe mici se folosesc bare de grosime mare.

Ecografia

Istoric. Fizicianul scoțian Ian Donald a fost unul dintre primii care a folosit ultrasunetele în medicină "Investigation of Abdominal Masses by Pulsed Ultrasound" 1958. În 1962, după mai mult de doi ani de muncă, Joseph Holmes, William Wright și Ralph Meyerdirk au produs primul sistem de scanare cu ultrasunete. Wright și Meyerdirk au părăsit mediul academic și au înființat Physionic Engineering Inc., care a comercializat pentru prima dată un scanner cu ultrasunete. În 1963. Acesta a fost începutul celui mai popular sistem de scanare cu ultrasunete. Corporația Acuson a investit mult pentru "Coherent Image Formation" și identificarea formelor, creând echipamentul de diagnosticare cu ultrasunete ca un întreg.

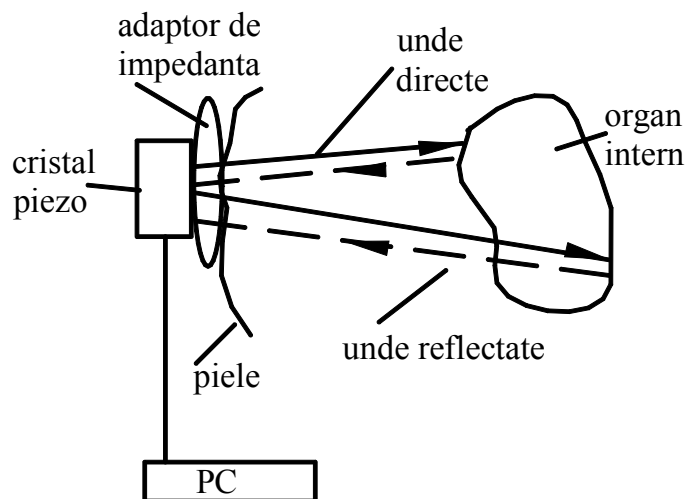


Fig. 1.7.2.

Principiu. Aceste metode de investigare și diagnosticare cu ultrasunete reprezintă o clasă de metode din care fac parte ecografiile de tip 2D, 3D, 4D (3D în timp real), ecografia Doppler și ecografia cu substanță de contrast.

Principiul fizic pe care se bazează toate acestea este simplu: reflexia ultrasunetelor pe suprafețele de separație dintre diferitele regiuni din corpul uman.

Tehnic, acest lucru se realizează prin folosirea unui generator piezoelectric (cel mai frecvent folosit) care emite un puls foarte scurt și unidirecțional de ultrasunete (cu frecvență fixă, de obicei între 2 și 20 MHz).

Undele sunt reflectate de diferitele suprafețe interne (ecou) și recepționate de un detector (în general cristalul care emite ultrasunetele este și detector).

Reflexia nu este totală, de aceea pe traseul ultrasunetelor se văd "în adâncime" diverse țesuturi, fiecare reflectând o parte din semnalul inițial.

BIOFIZICĂ ȘI BIOINGINERIE - Note de curs

Un efect nedorit este reflexia pe suprafața pielii care favorizează pierderea de energie. Pentru a evita acest lucru, se aplică pe corp o substanță (parafină, de exemplu) care asigură, practic, pătrunderea ultrasunetelor în corp fără reflexii (adaptarea de impedanță).

Folosirea substanțelor de ungere a pielii (parafină) mai are un rol → evitarea formării unor bule de aer între piele și sondă (deoarece, așa cum am spus la proprietățile ultrasunetelor, acestea sunt puternic absorbite în gaze).

Pentru a obține același rezultat folosind diferite intensități și timpi de iradiere, efectele ultrasunetelor pot fi:

efect mecanic - iradiem cu debit mare un timp scurt

efect termic - iradiem cu debit mic un timp lung

Practic, în aparatele comerciale se aleg valorile parametrilor, astfel încât se realizează un compromis între aceste efecte.

Pentru a genera o imagine la finalul unui examen ecografic, se parcurg mai mulți **pași**:

1. se trimite un puls de ultrasunete, se recepționează ecoul și se măsoară timpul scurs între cele două momente.

2. cunoscând viteza de propagare a ultrasunetelor în țesuturi moi (1500m/s), se calculează distanța până la punctul în care a avut loc reflexia.

3. se emite al doilea puls pe o direcție la un unghi puțin diferit de prima.

4. se repetă pașii anteriori, scanându-se un arc, iar calculatorul afișează o imagine

Mai multe sonde plasate convenabil produc mai multe imagini 2D, care pot fi combinate de către computer pentru a realiza o imagine 3D. Cu sisteme de calcul mai puternice, aceste imagini 3D pot fi generate practic instantaneu, obținându-se imagini 4D sau 3D real-time

Traductorii ultrasonori medicali au forme și mărimi diferite pentru a fi utilizați în realizarea imaginilor diferitelor părți ale corpului. Aceștia emit ultrasunetele fie prin efect piezoelectric fie prin efect magnetostrictiv (aici intensitățile sunt mai mari).

Capul ecografului este compus dintr-o multitudine de celule piezoelectrice stânga-dreapta în interiorul traductorului care determină ca imaginea să apară ca o felie.

Prin translația traductorului de către operator, se sectionează ce se dorește.

Pentru curățiri se folosesc frecvențe de 20-40 kHz iar pentru imagistică se folosesc frecvențe din domeniul 1-20 MHz.

Frecvențele mai mari corespund la lungimi de undă mai mici și în consecință oferă o rezoluție spațială mai bună.

Limita, ca și în cazul luminii, este dată de fenomenul de difracție - criteriul Rayleigh furnizează unghiul sub care mai pot fi observate două puncte distincte:

→ λ / d în cazul unei singure aperturi dreptunghiulare;

→ $1.22\lambda / d$ în cazul unei aperturi circulare;

Tehnica ecografiei Doppler, utilizează modificarea frecvenței undelor la reflexia pe obiecte aflate în mișcare pentru a determina viteza de deplasare a acestora știindu-se că frecvența undei reflectate pe obiecte depinde de viteza acestora.

A fost inventată în 1958 de către Dr. Edward H. Hon pentru a monitoriza diferite funcții ale viitorului bebeluș. Avantajul său față de stetoscopul clasic este faptul că semnalul care poate fi înregistrat digital, apoi analizat și comparat, oferă mai multe informații.

Pentru a determina viteza sângelui, reflexia trebuie să se producă pe hematii. Pe lângă această mărime fizică, se mai pot determina și altele: regimul de curgere, debitul, viteza de contracție a pereților inimii, insuficiențe ale valvelor.

Folosind această tehnică, în oftalmologie se poate vizualiza fluxul retinian, se poate depista o tromboză, fiind o investigație neinvazivă.

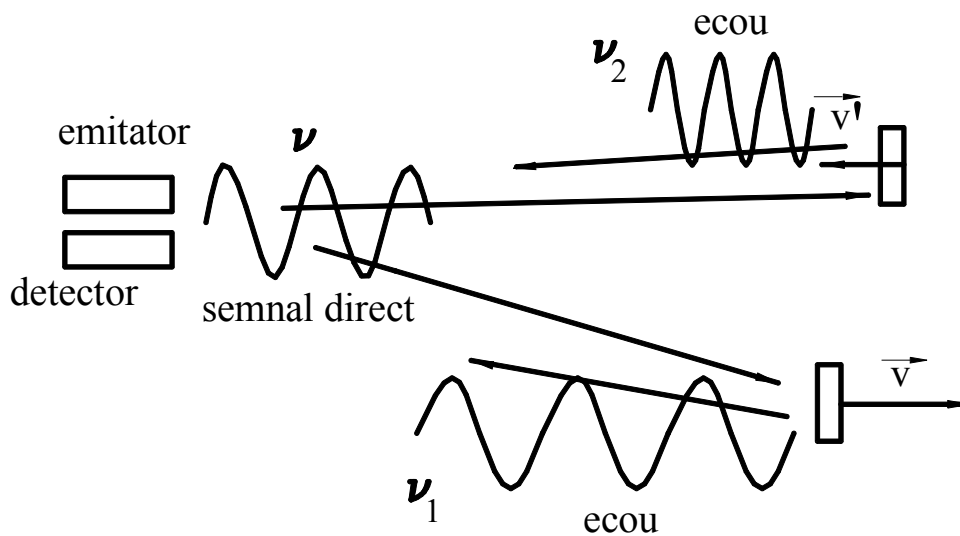


Fig. 1.7.3.

Există două regimuri:

în regim de pulsuri - emițătorul și receptorul sunt același cristal - folosit pentru investigarea inimii cât și a vaselor de sânge (acuratețe)

în regim continuu - emițătorul și receptorul sunt cristale diferite - folosit pentru investigarea inimii (acuratețe) cât și a vaselor de sânge

Locul în care un generator focalizează fascicolul de ultrasunete, depinde de aria sa activă, de forma sa, de frecvența undelor, de viteza lor de propagare prin mediul respectiv

Toate tehnicile ecografice sunt **examene neiradiante, neinvazive, nedureroase** care nu necesită o pregătire prealabilă a pacientului sau internarea acestuia.

Ecografia cu substanță de contrast (CEUS – contrast enhanced ultrasound) este o tehnică imagistică neinvazivă care oferă o mai bună vizualizare a structurilor vasculare prin adăugarea de contrast la imaginea ecografică clasică (mod B, Doppler color).

Necesitatea unui contrast în ecografie a apărut ca urmare a dificultății de a distinge cu acuratețe interfața dintre țesut și sânge, având în vedere că organismul este compus din 70% apă și că diferitele structuri adiacente au **ecogenitate similară** (ecogenitate = proprietatea unor structuri de a produce ecou).

BIOFIZICĂ ȘI BIOINGINERIE - Note de curs

Ecografia cu substanță de contrast are actualmente multiple aplicații în practica clinică: studii de perfuzie a miocardului, ecocardiografie, vizualizarea vaselor mari (intracraniene, periferice) și a vaselor mici (din ficat, rinichi, pancreas, sân).

Ecografia cu substanță de contrast (CEUS) este similară tomografiei computerizate cu substanță de contrast (CECT – contrast enhanced computer tomography), însă în cazul ultrasonografiei, agentul folosit pentru obținerea contrastului nu conține iod și se poate administra și pacienților cu insuficiență renală.

Un alt avantaj al ecografiei cu substanță de contrast este absența iradierii, care poate fi semnificativă în cazul CECT.

Prima aplicație a ecografiei cu substanță de contrast a fost în patologia cardiacă, iar ulterior tehnica a fost extinsă și la patologia hepatobiliară, renourinară, splenică, prostatică, limfatică, mamară și tiroidiană. Actualmente, CEUS este cel mai mult folosită pentru diagnosticul diferențial al leziunilor hepatice. În funcție de vascularizația leziunii, ecografia cu substanță de contrast permite diferențierea cu o mare acuratețe a formațiunilor benigne de cele maligne.

Pentru a putea vizualiza vasele de sânge în modul Doppler, este necesară o anumită viteză a fluxului de sânge care este atinsă doar în vasele de calibru mare și mediu, însă nu și în microcirculație, unde viteza fluxului sangvin este de 1000 ori mai mică decât în aortă.

Pentru a putea evidenția fluxul sangvin în microcirculație, au fost create substanțe de contrast pe bază de **microbule**, care sunt bule de gaz inert încapsulate într-o membrană cu anumite proprietăți pentru stabilitate lipidică/proteică/polimerică.

Microbulele au dimensiuni de 1-5 μm (mai mici decât eritrocitele), ceea ce le permite să aibă aceeași traiectorie ca și hematiile, să pătrundă complet în microcirculație și să genereze contrast.

Microbulele rămân strict intravascular, nu difuzează în țesuturi, iar durata lor de viață este perfect controlabilă de către operator, care le poate distruge prin scăderea frecvenței ultrasunetelor.

Principiul ecografiei cu substanță de contrast constă în **proprietatea microbulelor de a-și modifica dimensiunea ca răspuns la stimularea cu ultrasunete** și pe faptul că ultrasunetele sunt puternic absorbite în gaze.

Oscilația volumului lor generează ecouri de frecvențe diferite către sonda de ecograf și conferă astfel contrastul spațiului vascular cu mediul adiacent.