

**ВЪПРОС 19. ЗВУКОВИ ВЪЛНИ.
ИНТЕНЗИВНОСТ НА ЗВУКОВАТА
ВЪЛНА.**

**СКОРОСТ НА ЗВУКА В ТРЪРДО
ТЯЛО И ГАЗОВА СРЕДА.**

**ПСИХОФИЗИЧНИ
ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ЗВУКА.**

**ЗАКОН НА ВЕБЕР-ФЕХНЕР.
УЛТРАЗВУК И ПРИЛОЖЕНИЕТО
МУ. ПИЕЗОЕЛЕКТРИЧЕН ЕФЕКТ.**

I. ЗВУКОВИ ВЪЛНИ

- 1.Определение:** Механични вълни с честота от **20Hz до 20kHz** наричаме звук. За честоти под 20Hz говорим за инфразвук. За честоти над 20kHz говорим за ултра звук.
- 2.Горна граница на механичните вълни.** Телата съставени от частици. За твърдите тела разстоянието между частиците е 10^{-10}m . Това означава, че не може да се разпространява трептене с $\lambda < 10^{-10}\text{m}$. При средна скорост на една надлъжна вълна в твърдо тяло от $v=10^3\text{m/s}$ максималната честота на една звукова вълна е $\nu=(v/\lambda)=10^{12}-10^{13}\text{Hz}$.
- 3. Значение на звуковите вълни.**
 - а/** за тях ние имаме сензорен орган който превръща механичното трептене достигнало до ухото в електрохимичен сигнал достигащ до мозъка и предизвикващ слухово възприятие.
 - б/** обменяме вербална речева информация - условия за социализация и извършване на общи и съгласувани действия.
 - в/** по тембъра можем да определим обекта който е излъчил дадения звуков сигнал, посоката и приблизителното разстояние до него.
 - г/** дава ни възможност да определим връзка между чисто физичните характеристики на звука: амплитуда, честота, интензивност и др. с т.нар. психофизични характеристики: гърмкост, височина и тембър.

II. Интензивност на звуковите ВЪЛНИ

1.Обемна плътност на енергията на звукова вълна.

а/ определение: **Под обемна плътност W_p на енергията на звукова вълна разбираме енергията което се съдържа в единица обем от средата, в която се разпространява звука**

б/ Извод: За средната енергия на трептене на една частица от средата имаме:

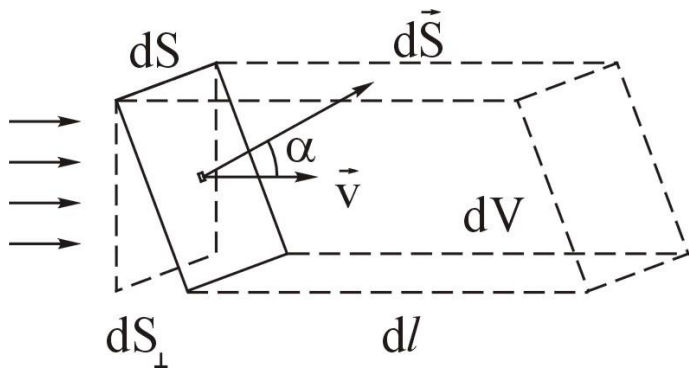
$$E = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2$$

Ако с n -означим броя на частиците в единица обем от средата то $nm = \rho$ където ρ е плътността на средата. Тогава за обемната звукова плътност имаме:

$$W_p = nE = \frac{1}{2} (nm) \omega^2 A^2 \rightarrow W_p = \frac{1}{2} \rho \omega^2 A^2 \quad [\text{J/m}^3]$$

б/Под поток на звуковата енергия ще разбираме **ЕНЕРГИЯТА ПРЕНЕСЕНА ЗА ЕДИНИЦА ВРЕМЕ ПРЕЗ ПРОИЗВОЛНА ПОВЪРНОСТ dS ОТ ВЪЛНАТА**

$$d\Phi = \frac{dE}{dt} \left[\frac{\text{J}}{\text{s}} \right]$$



Обаче

$$dE = W_{\rho} dV = W_{\rho} v dS dt$$

Тогава:

$$d\Phi = W_{\rho} v \cos \alpha dS = W_{\rho} \vec{v} \cdot d\vec{S}$$

в/Плътност на потока на енергията: Това е потока енергия, пренасяна от вълната през единица елементарна повърхнина dS_{\perp} , разположена перпендикулярно на разпространението на вълната.

$$\vec{j} = W_{\rho} \vec{v} \left[\frac{J}{m^2 s} \right]$$

г/Интензитет на звуковата вълна: Средната стойност по времето на плътността на потока енергия се нарича интензитет на вълната.

$$I = \bar{j} = \bar{w} v = \frac{1}{2} \rho A^2 \omega^2 v \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Ако средата поглъща енергия то имаме:

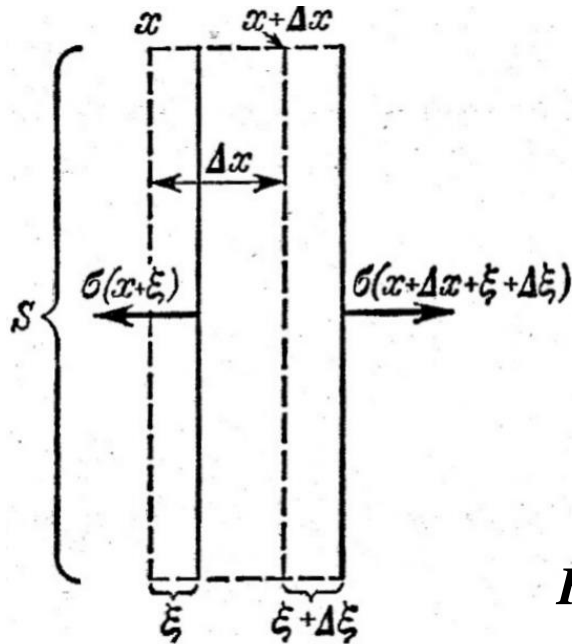
$$I = \frac{1}{2} \rho A_0^2 e^{-2\alpha x} \omega^2 v = I_0 e^{-2\alpha x}$$

III. СРОРОСТ НА ЗВУКА В ТВЪРДИ ТЕЛА

1. Деформация на твърдо тяло при разпространение на **надлъжна** механична вълна. Надлъжната вълна е вълна на свиване и разтягане на материалната среда. Имаме свиване и разтягане т.е. деформиране на средата.

Разглеждаме един правоъгълен сегмент от средата с напречно сечение S и дебелина Δx . Вълната създава от слой в слой от сегмента различно

отместване на частиците. Възниква деформация която променя надлъжния размер на сегмента с $\Delta \xi$ относно Δx . Ако $\Delta \xi > 0$ имаме разтягане на средата, ако $\Delta \xi < 0$ свиване. По определение за деформацията имаме:



$$\varepsilon = \frac{\Delta \xi}{\Delta x} \quad \text{отнесено към слой:} \quad \varepsilon = \frac{d\xi}{dx}$$

Силата предизвикваща деформацията е:

$$F = S[\sigma(x + \Delta x + \xi + \Delta \xi) - \sigma(x + \xi)] = S \frac{d\sigma}{dx} dx$$

Обаче:
$$\sigma = E\varepsilon = E \frac{d\xi}{dx}$$

За силата получаваме:
$$F = SE \frac{d^2\xi}{dx^2} dx$$

От втория закон на Нютон имаме:

$$m \frac{d^2\xi}{dt^2} = \rho \Delta V \frac{d^2\xi}{dt^2} = \rho S \Delta x \frac{d^2\xi}{dt^2} = F = SE \frac{d^2\xi}{dx^2} dx$$

Окончателно получаваме:

$$\rho \frac{d^2\xi}{dt^2} = E \frac{d^2\xi}{dx^2} \rightarrow \frac{d^2\xi}{dx^2} = \frac{\rho}{E} \frac{d^2\xi}{dt^2} = \frac{1}{v^2} \frac{d^2\xi}{dt^2}$$

Това е вълновото уравнение от което директно определяме скоростта на надлъжната звуковата вълна.

$$v_{long} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

където: E - модула на Юнг.

Аналогично за напречните звукови вълни имаме:

$$v_{tr} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

G - модул на еластичност при хлъзгане

IV. СКОРОСТ НА ЗВУКА В ГАЗОВА СРЕДА

1. Механизъм на разпространение на звукова вълна в газова среда: Тъй като във газовете втория модул на еластичност $G=0$ т.е. еластична връщаща сила при деформация на хлъзгане е нула, в тях могат да се разпространяват само надлъжни вълни. Частиците от материалната среда трептят в направление на разпространение на вълната. В средата имаме области на разбягване на частиците една от друга (ОБЛАСТ НА РАЗРЕЖДАНЕ) и области на сближаване на частиците една към друга (ОБЛАСТ НА СГЪСТЯВАНЕ). Ако разгледаме един произволен обем от газа в който се разпространява звуковата вълна ще установим че той е подложен на непрестанно бързо свиване и разтягане. Поради голямата скорост на разпространение на звука във газовата среда 340m/s от термодинамична гледна точка той е подложен на последователно адиабатно свиване и разширение. Това е термодинамичен изо-процес при който газа не обменя топлина с околната среда и се подчинява на закона на Поасон $pV^\chi = \text{const.}$, p -налягането на газа, а V -обема му. χ - наричаме адиабатна константа на газа и зависи от какъв вид частици е изграден той.

Нека с p_0 означим налягането на несмутения газ (когато в него не се разпространява вълна). В произволен обем от смутената област при разширение налягането на газа ще намалее с $-\Delta p(t)$ докато при свиване ще нараства с $\Delta p(t)$. ПРИ РАЗПРОСТРАНЕНИЕТО НА ВЪЛНА В ГАЗОВА СРЕДА НАЛЯГАНЕТО ЩЕ СЕ МЕНИ С ВРЕМЕТО ОКОЛО РАВНОВЕСНАТА СТОЙНОСТ НА НАЛЯГАНЕТО p_0 .

Така налягането при разпространение на механична звукова вълна в газова среда налягането ще се мени по закона $p(t)=p_0+\Delta p(t)$. Часта зависи от налягането наричаме АКУСТИЧНО НАЛЯГАНЕ. Именно то е отговорно затова че ние чуваме. Звукът оказва променливо налягане на ушната мембрана която започва да трепти. Това механично трептене се превръща електро-химичен импулс които създава в нашия мозък определено звуково възприятие.

2.3а характеризират на звуковата вълна от физична гледна точка ние се интересуваме от амплитудата на трептене, от плътността на енергията която пренася звуковата вълна от интензивността и. Това не са директно измеряеми величини. Например отместването на една частица от равновесното и положение при разпространение на механична вълна в средата е от порядъка на 10^{-7} - 10^{-8} m. Акустичното налягане е макроскопична проява на вълновите характеристики. То може да се измерва много лесно като превърнем механичното трептене в електричен сигнал, който може да бъде усилян, измерван и изобразяван. Затова е нужно да познаваме връзките между акустичното налягане и величините характеризиращи вълновия процес.

Разглеждаме един правоъгълен сегмент от газовата средата с напречно сечение S и дебелина Δx . Вълната създава от слой в слой от сегмента различно налягане Силата която ще кара този обем да се свива и разширява има вида:

$$F = S[p(x + \xi) - p(x + \Delta x + \xi + \Delta \xi)]$$

Така ако измерим максималната стойност на акустичното налягане ще можем да определим **максималното отклонение** на частица при разпространение на звукова вълна в среда:

$$\xi_m = \frac{P_m}{\omega \rho C_0}$$

Където C_0 е скоростта на звуковата вълна в газовата среда.

За **скоростта на трептенето на частиците** от средата можем да запишем:

$$v(x,t) = \dot{\xi}(x,t) = -\omega \xi_m \sin(\omega t - kx + \varphi_0)$$

$$v_m = \omega \xi_m \rightarrow v_m = \frac{p_m}{\rho C_0}$$

Аналогично за **ускорението** на частиците от средата можем да запишем:

$$a(x,t) = \ddot{\xi}(x,t) = -\omega^2 \xi_m \cos(\omega t - kx + \varphi_0)$$

$$a_m = \omega^2 \xi_m \rightarrow a_m = \frac{\omega p_m}{\rho C_0}$$

В началото на лекцията за обемната плътност на енергията на звуковата вълна записахме:

$$W = \frac{1}{2} \rho \omega^2 \xi_m^2 \rightarrow W = \frac{1}{2} \frac{p_m^2}{\rho C_0^2}$$

За **интензитета** аналогично получаваме:

$$I = W C_0 = \frac{1}{2} \rho \omega^2 \xi_m^2 C_0 \rightarrow I = \frac{1}{2} \frac{p_m^2}{\rho C_0}$$

При разпространение на звук в реална среда амплитудата на трептене намалява поради сили на дисипация които превръщат механичната енергия на вълната във вътрешна за средата. Затихването на звуковите вълни става по експоненциален закон $\xi_m(r) = \xi_m(0)e^{-\alpha r}$. Имайки пред вид установената връзка между отместването на частицата от равновесното положение и акустичното налягане за последното може да запишем:

$$p_m(r) = p_m(0)e^{-\alpha r}$$

Ако измерим акустичното налягане за две произволни разстояния то източника r_1 и r_2 ние намираме израз за определяне **коэффициента на затихване на средата α** .

$$\alpha = \frac{\ln p_m(r_1) - \ln p_m(r_2)}{r_2 - r_1}$$

ВЕЛИЧИНАТА $C_0\rho_0$ наричаме акустично съпротивление на средата. То количествено характеризира как средата се съпротивлява на разпространението на звуковата вълна. Обикновено се бележи с $Z_A = C_0\rho_0$. В термините на акустичното съпротивление можем за скоростта на трептене на частиците и интензитета можем да запишем

$$v_m = \frac{p_m}{Z_A} \quad \text{-Закон на Ом;} \quad I = \frac{1}{2} \frac{p_m^2}{Z_A} \quad \text{-ефективна мощност}$$

3. Скорост на звука в газова среда

скорост на надлъжна вълна:

$$C_0 = \sqrt{\frac{\chi RT}{\mu}}$$

Където R- универсална газова константа

μ -моларната маса на газа

T-абсолютната термодинамична температура

χ – адиабатна константа

При даден газ или смесица от газове единствения фактор от който зависи скоростта на звука е температурата. С нарастване на температурата нараства и скоростта на звука в дадения газ.

What Does Sound Look Like - YouTube



WHAT DOES
SOUND
LOOK LIKE?

V. ПСИХОФИЗИЧНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ЗВУКА. ЗАКОН НА ВЕБЕР-ФЕХНЕР

Това е дял от науката което се занимава със описание на субективния начин на възприятие на звукови сигнали.

От психофизична гледна точка звукът се характеризира с ВИСОЧИНА, ТЕМБЪР и СИЛА(ГРЪМКОСТ).

1. Сила (гръмкост) на звука. Звукът с различен интензитет предизвиква различно усещане в човешкото ухо за сила на звука. Тази връзка се определя от закона на ВЕБЕР-ФЕХНЕР които е експериментално установен.

ЗАКОН НА ВЕБЕР-ФЕХНЕР: КОГАТО ЕДИН ДРАЗНИТЕЛ НА ЧОВЕШКОТО УХО СЕ ИЗМЕНЯ В ГЕОМЕТРИЧНА ПРОГРЕСИЯ, УСЕЩАНЕТО ЗА НЕГО СЕ ИЗМЕНЯ В АРИТМЕТИЧНА ПРОГРЕСИЯ.

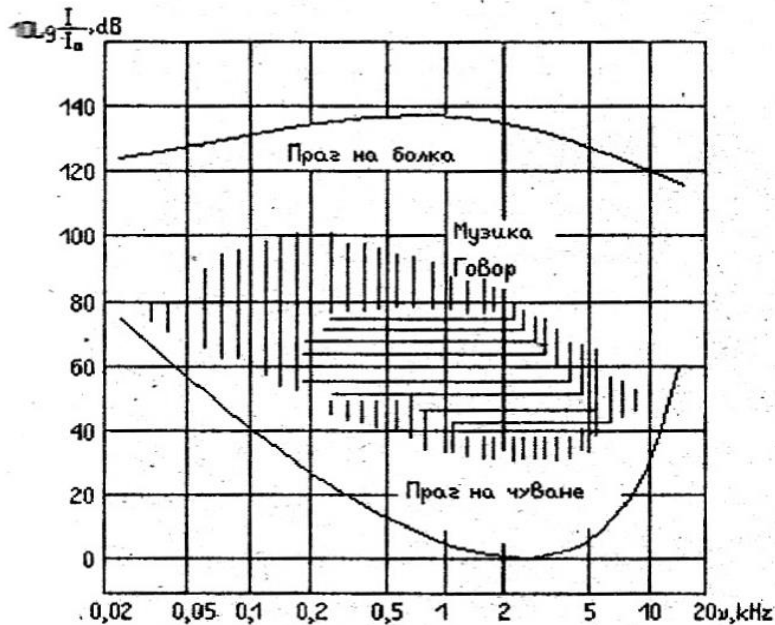
На базата на този закон гръмкостта се дефинира като:

$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_0}$$

Където I_0 -наричаме долен праг на чуване. Той зависи от честотата на звука, от възрастта на човека. Въвеждаме долен стандартен праг на чуване праг на чуване се създава: **ТОВА Е ЗВУК С ИНТЕНЗИВНОСТ 10^{-12} [W/m²] ПРИ ЧЕСТОТА 1000Hz ВОДЕЩ ДО ЗВУКОВО ВЪЗПРИЯТИЕ У ЧОВЕКА.**

Дефинира се и ПРАГ НА БОЛКА: **ТОВА Е МАКСИМАЛНИЯ ИНТЕНЗИТЕТ НА ЗВУКА, НАДМИНАВАНЕТО НА КОЙТО ВОДИ ДО БОЛЕЗНЕНО УСЕЩАНЕ В УХОТО. ТОЗИ ПРАГ СЪЩО ЗАВИСИ ОТ ЧЕСТОТАТА И Е НАЙ-ГОЛЯМ ПРИ 1000 Hz И ИНТЕНЗИТЕТ $10[W/m^2]$.**

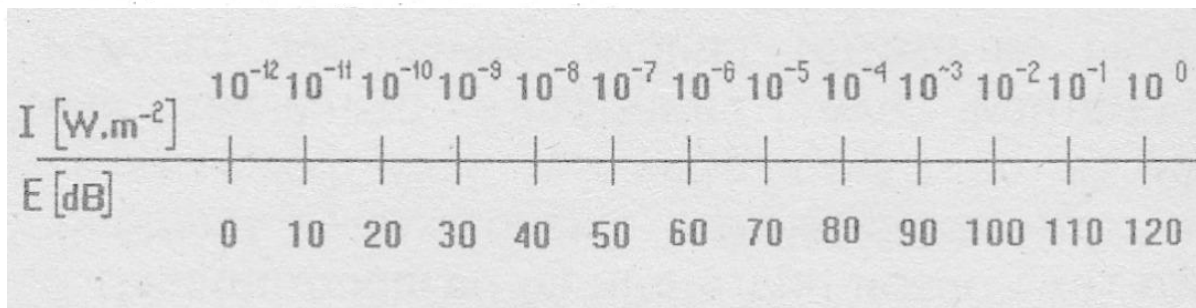
Изследването на силата на звука като функция на честотата определя следната крива:



Областта дефинирана от кривите “праз на чуване” и “праз на болка” определя **“ОБЛАСТТА НА ЧУВАНЕ”**

Ухото е най-чувствително при честота 1000Hz и може да приема звук който се мени $10^{13}[W/m^2]$

Единиците за измерване на силата на звука е 1В(бел): **Това е промяната на силата на звуково възприятие когато интензитета на звука се мени 10 пъти. Единицата е голяма и се използва кратната dB(децибел)**



Източник на звук	Ниво на интензитета, dB
Сърдечни тонове регистрирани със стетоскоп	10
Шепот	20
Тих разговор	40
Нормален разговор	50
Силен разговор	60
Уличен шум	70 - 80
Мотоциклет	100
Дискотека	100 - 130
Самолетен двигател	110-130

2. Тембър на звука: Повечето звуци са нехармонични и както казахме те могат да се представят като безкраен ред от хармонични звуци. Съвкупността от тези звуци определят **тембъра** на източника излъчил този звук който се определя от честотния спектър на звука.



- v_0 -**основен тон**, а останалите наричаме **обертони**. По тембъра на звука ние разпознаваме без да виждаме вида на музикалния инструмент, гласа на любимия човек и т.н.
3. Височина на звука: свързана в честотата на звука. Основната единица за промяна на височината на тона е **ОКТАВА** и **съответства на промяна на честотата два пъти**.
4. Биануален ефект: **СПОСОБНОСТТА НА ЧОВЕКА ДА ОПРЕДЕЛЯ ПО СЛУХОВО ВЪЗПРИЯТИЕ ПОСОКАТА ОТ КОЯТО ИДВА ЗВУКА НАРИЧАМЕ БИАУАЛЕН ЕФЕКТ.**

VI. УЛТРАЗВУК И ПРИЛОЖЕНИЕТО МУ

1.Определение: Ултразвук е механична вълна с честоти от 20kHz до 10⁷kHz.

2.Основни характеристики:

а/ има малка дължина на вълната максимум 17mm.

б/ скоростта и ускорението на трептящите частици от средата са големи

в/ тъй като енергията е пропорционална на квадрата на честотата ($E \approx v^2$) то дори и при малки амплитуди на трептене интензитета на ултразвука е твърде голяма

г/ поради малката дължина на вълната ултразвуковите вълни могат да се насочват и фокусират. При фокусиране интензитетът на звуковата вълна може да достигне 10⁶W/m²

д/ действащите сили отговорни за разтрептяване на частиците са огромни и това може да доведе до разкъсване на връзките между отделните молекули и атоми на средата.

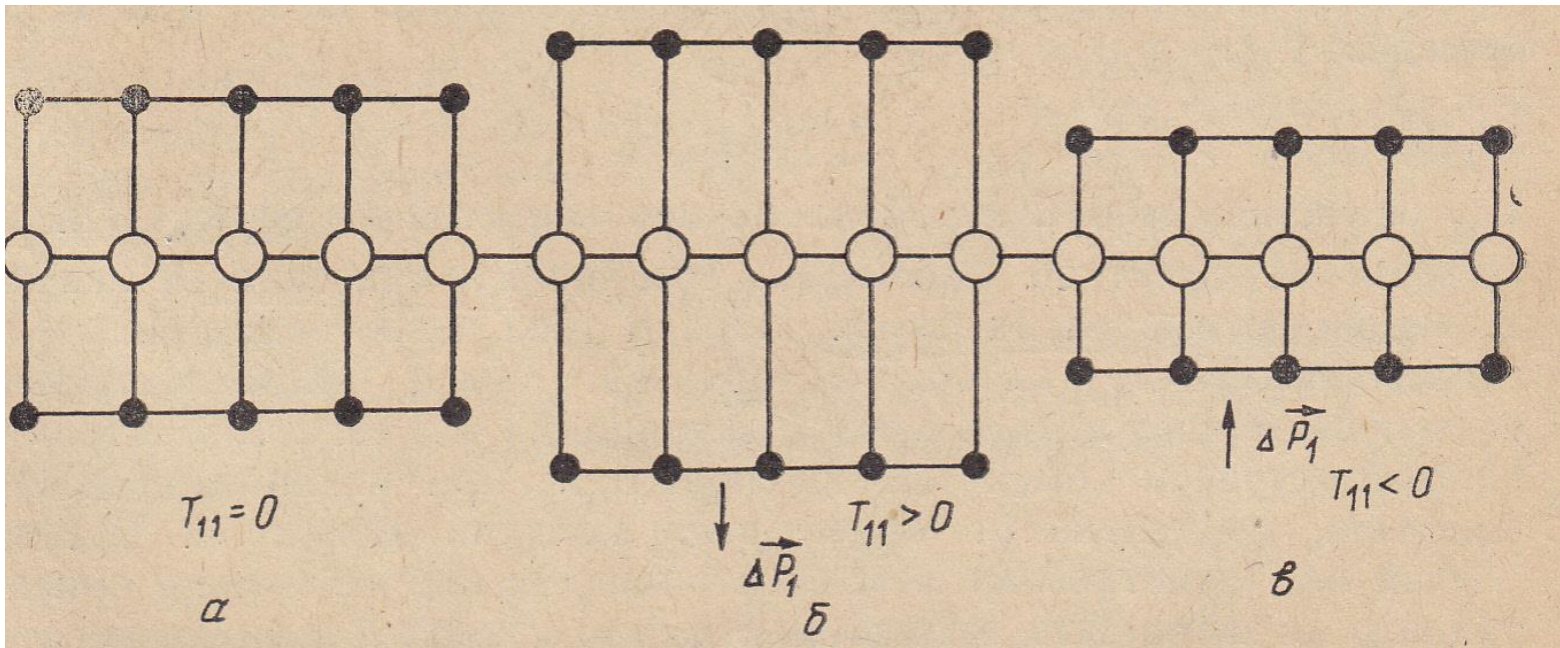
е/ В полупериода на разреждане на течност настъпва разкъсване и създаване на празнини, към които мигрират разтворените газови молекули. В полупериода на свиване се получава налягане до стотици атмосфери. Концентрира се колосална енергия която предизвиква разрушаване. **ТОЗИ ЕФЕКТ СЕ НАРИЧА КАВИТАЦИЯ**

3. Приложения на ултразвука:

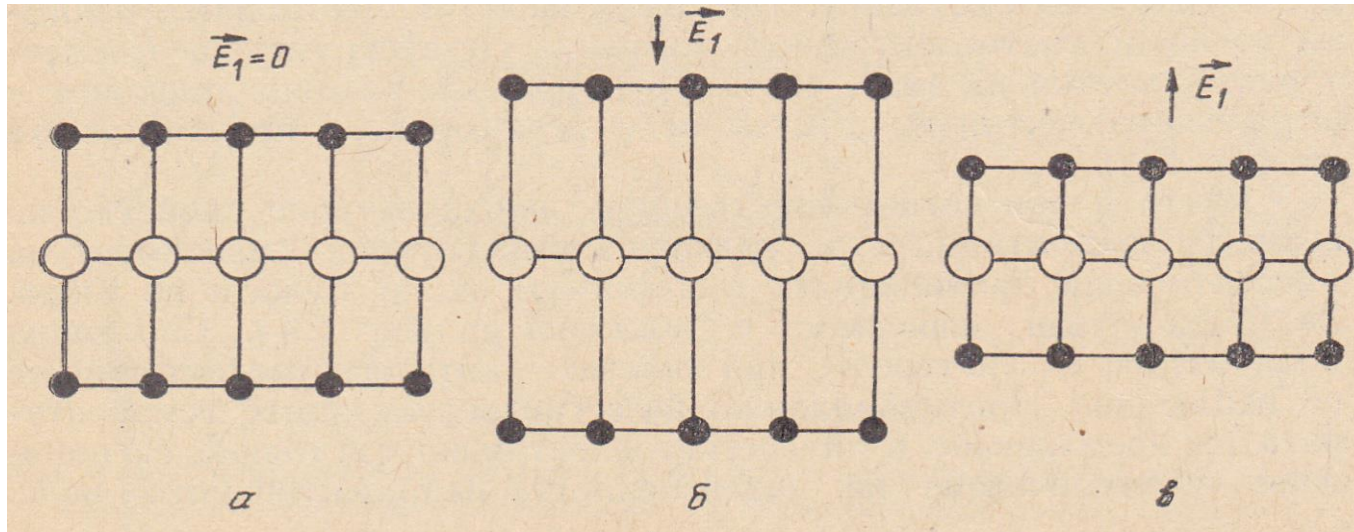
- за пробиване на отвори и обработка на твърди материали**
- за диспергиране (разпръскване) при получаване на суспензии и емулсии, за ускоряване разтварянето на трудно разтворими вещества**
- за ускоряване на химични процеси**
- за ултразвуково почистване на повърхности**
- за ултразвукова локация - ехолот измерва чрез ехо на ултразвукови вълни разстояния до обекти, за мореплаването следи релефа на океана, за откриване на рибни пасажи**
- ултразвукова дефектоскопия за окачествяване на детайли за скрити дефекти**
- ехографи за медицински изследвания**
- лапароскопски безкръвни операционни методи щадящи пациента: разбиване на камъни в бъбреци и злъчка.**

VII. ПИЕЗОЕЛЕКТРИЧЕН ЕФЕКТ

1. Прав пиезоелектричен ефект: Ако един нецентросиметричен йонен кристал подложим на едностранно свиване или разтягане той се поляризира т.е. в него възниква електрично поле което се дължи на отместването на йоните от равновесните им положения. Това води до нарушаване на електронейтралността и възниква **електрическо поле**. **ТОВА НАРИЧАМЕ ПРАВ ПИЕЗОЕЛЕКТРИЧЕН ЕФЕКТ**



2. Обратен пиезоелектричен ефект: Нецентросиметричен йонен кристал поставяме в външно електрично поле. Това води до отместване на положителните и отрицателните йони в противоположни посоки от равновесните им положения т.е. кристала се **деформира**. **ТОВА НАРИЧАМЕ ОБРАТЕН ПИЕЗОЕЛЕКТРИЧЕН ЕФЕКТ**

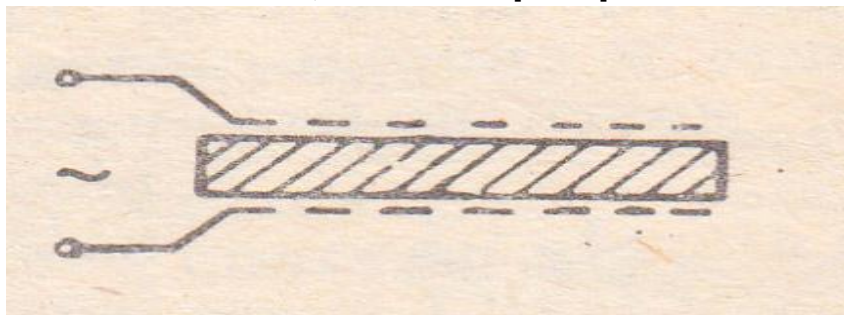


3. Възбуждане на звукови и ултразвукови вълни: **ПРИЛАГАМЕ ОБРАТНИЯ ПИЕЗОЕФЕКТ**: Поставяме йонния кристал в променливо електрично поле

$$E = E_0 \cos \omega t$$

Това определя една променлива във времето повърхнинна сила на деформация. Тя кара частиците да трептят около равновесните си положения и се възбужда механична вълна с честотата на променливото електрично поле което лесно се управлява и променя.

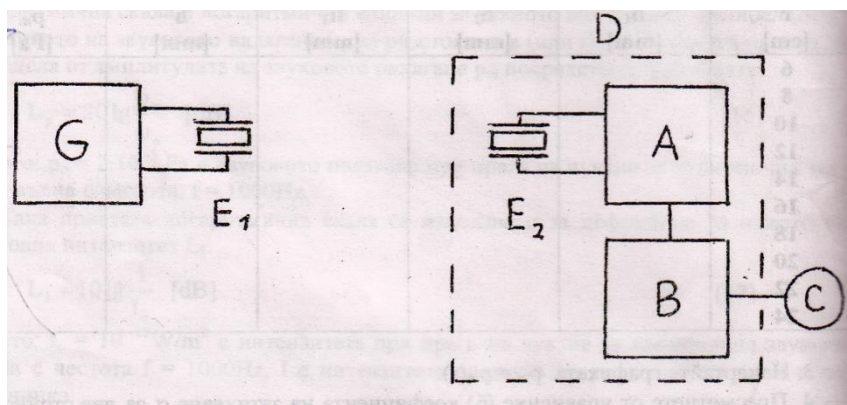
Технически това се постига като върху кристала се нанасят тънки епитаксиални слоеве от метал, който играе роля на електроди.



Ако средата в която искаме да възбудим ултразвукови вълни не е йонен нецентросиметричен кристал то до нея се допира такъв кристал или се израства такъв кристал ако това е възможно

4. Детектиране и определяне характеристиките на една звукова вълна:

ОСНОВАВА СЕ НА ПРАВИЯ ПИЕЗОЕЛЕКТРИЧЕН ЕФЕКТ. Вълната деформира средата и на електродите възниква потенциална разлика която се мени със времето и може да се наблюдава на екрана на осцилоскоп. Така може да се определи честотата и амплитудата на вълната.



G-генератор

E₁-излъчвател

E₂-приемник

A-усилвател

B-изправител

C-регистриращо устройство

D-детектор