



МЕДИЦИНСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ПЛЕВЕН
ФАКУЛТЕТ „Фармация“
ЦЕНТЪР ЗА ДИСТАНЦИОННО ОБУЧЕНИЕ

Лекция №4

Физика и биофизика

Механични трептения и вълни. Звук - естество, източници, основни характеристики, видове и разпространение. Процеси и ефекти при взаимодействие на звуковите вълни с веществата. Акустични методи в медицината. Ултразвук - същност, източници и методи за получаване. Основни свойства, физични, химични и биологични ефекти. Приложения на ултразвука във фармацията, хомогенизиране, емулгиране, диспергиране, стерилизиране. Лекарствена сонофореза.

Проф. Константин Балашев, дхн

МЕДИЦИНСКА ФИЗИКА

Лекция №4

Механични трептения и вълни. Звук - естество, източници, основни характеристики, видове и разпространение. Процеси и ефекти при взаимодействие на звуковите вълни с веществата. Акустични методи в медицината. Ултразвук - същност, източници и методи за получаване. Основни свойства, физични, химични и биологични ефекти. Приложения на ултразвука във фармацията, хомогенизиране, емулгиране, диспергиране, стерилизиране. Лекарствена сонофореза.

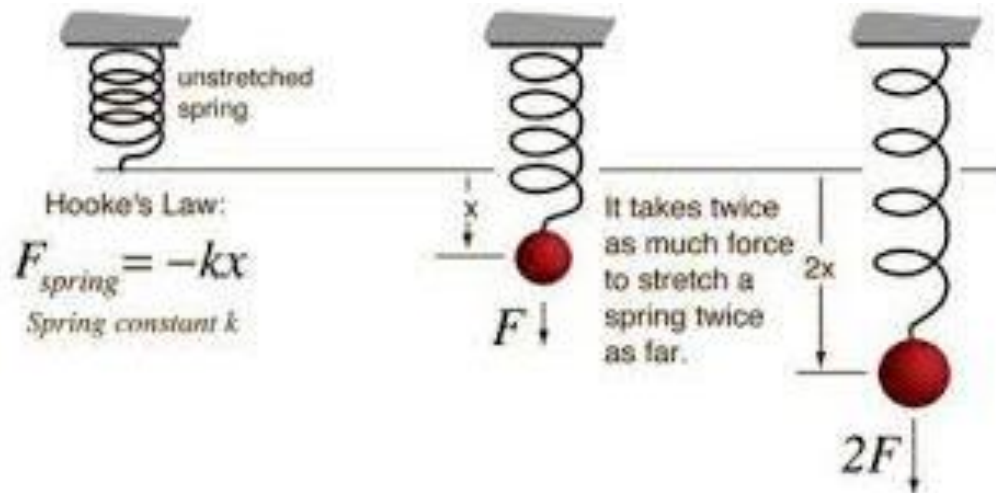
ЗВУК

Механични трептения и вълни



Трептения са движения или изменения в състоянието на телата, които се повтарят във времето. Трептенията са *периодични*, ако се описват с физични величини, чиито стойности се повтарят през равни интервали от време. Най-малкият от тези интервали T се нарича *период*, а броят на трептенията за единица време – *честота* на трептенията ν :

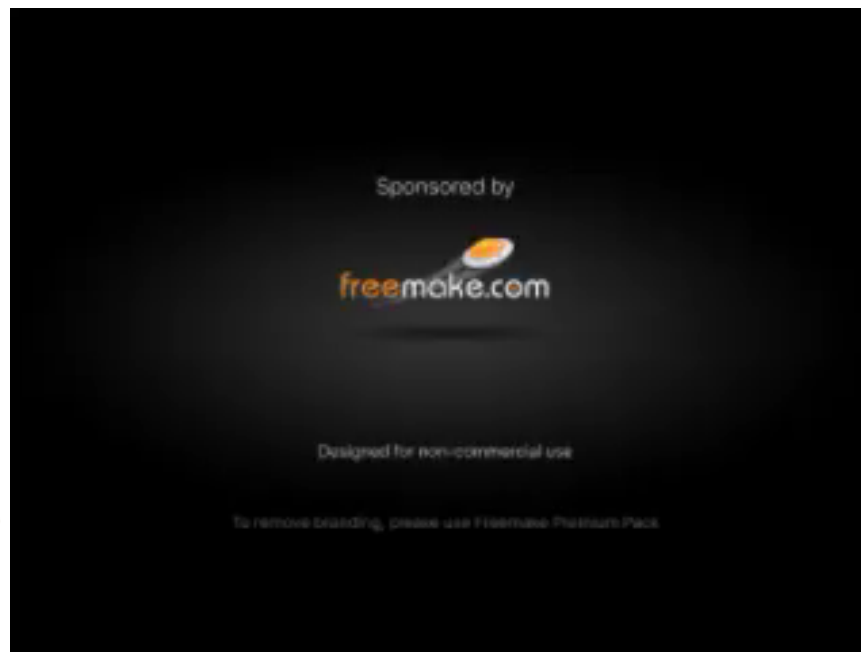
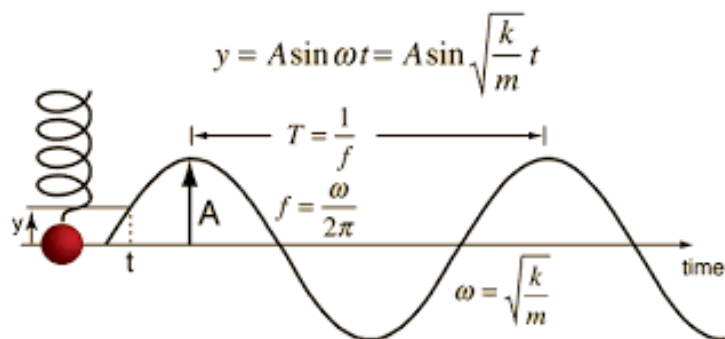
$$\nu = \frac{1}{T} \quad . \quad (3.1)$$



Механични трептения се получават най-често под действието на сила F , която е пропорционална на *отместването* на тялото x от изходното му положение и има посока към това положение:

$$F = -kx$$

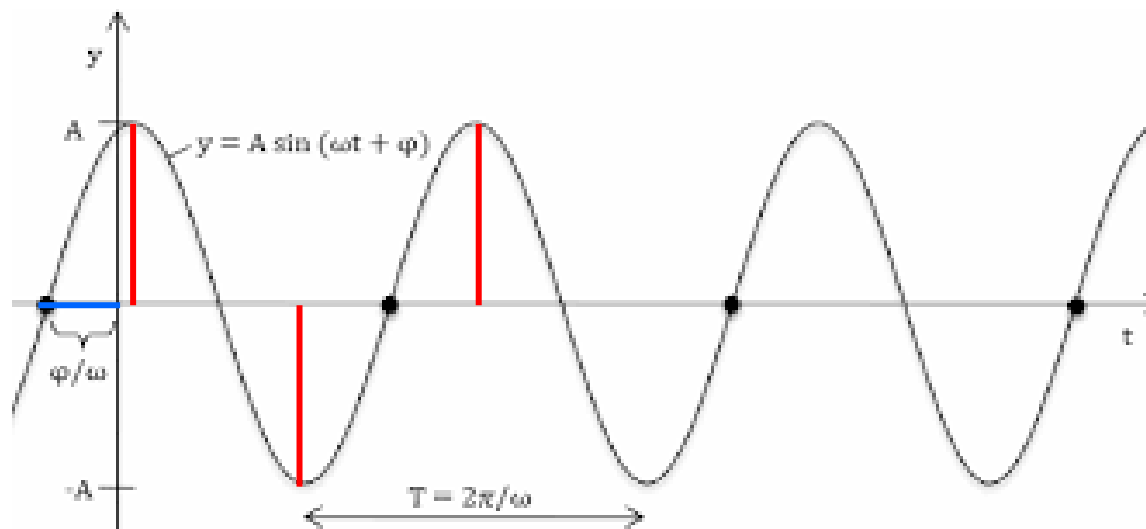
В този случай силата се нарича *еластична*, движението на тялото – *хармонично трептене*, а самото тяло – *хармоничен осцилатор*. Знакът минус пред коефициента на пропорционалност k показва, че силата връща тялото към изходното му положение, т. е. нейната посока е обратна на нарастването на отместването.



Зависимостта на отместването y от времето t се описва със синусова или косинусова функция (фиг. 3.1) и се нарича *уравнение на хармоничното трептене*:

$$y = A \sin(\omega t + \varphi_1) = A \cos(\omega t + \varphi_2) \quad (3.3)$$

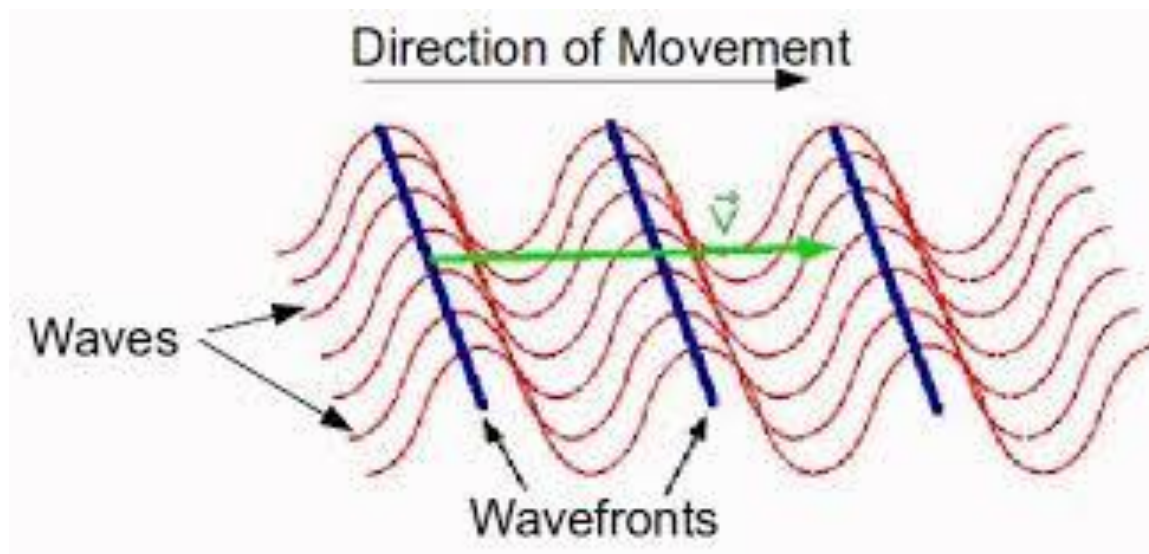
Изразите $\omega t + \varphi_1$ и $\omega t + \varphi_2$ се наричат *фази*, ω – *ъглова честота*, φ_1 и φ_2 – *фазови константи*, а A – *амплитуда*.



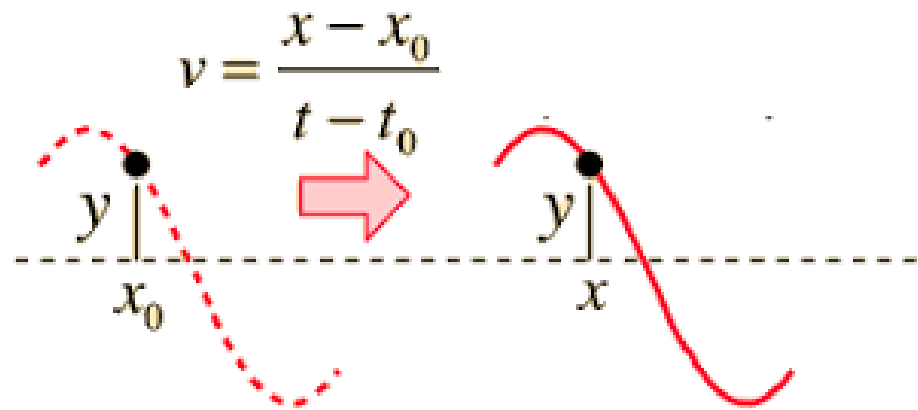
Амплитудата

определя максималното отклонение на тялото, а фазовата константа – отклонението на тялото в началния момент $t = 0$.
 Като се има предвид, че периодът T на функциите $\sin x$ и $\cos x$ е 2π , т. е. $\omega T = 2\pi$, връзката между кръговата честота ω и честотата ν на хармоничното трептене е:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu .$$



Когато трептящото тяло или частица е съставна част на система от други такива, трептенията се предават на съседните тела или частици. Те от своя страна предават трептенията си на своите съседни и по този начин в една среда или система от тела или частици трептенето се разпространява във всички посоки. Този процес се нарича *вълнообразно движение* или *вълна*. Характерно за това движение е, че през средата се пренася енергия, без участващите във вълната тела или частици да напускат областта си на трептене, т.е. без да се пренася вещество.



Под *скорост на разпространение на вълната* v се разбира скоростта, с която произволно избрана фаза на трептене на частиците се премества в средата (например фазата $\pi/2$, съответстваща на един от върховете на вълната). Тази скорост се нарича *фазова скорост*, но обикновено думата “фазова” се изпуска. Разстоянието λ , на което фазата на трептенето се разпространява за време един период T , се нарича *дължина на вълната*:

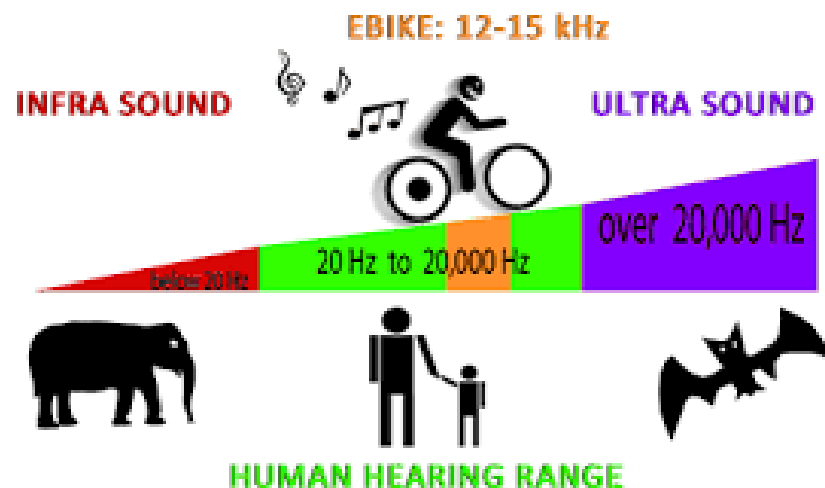
$$\lambda = vT$$

$$v = \lambda \nu$$

Звук



Механичните трептения и вълни, които могат да се възприемат от ухото на човека, се наричат *звук*. Техните честоти попадат в диапазона от 20 Hz до 20 kHz, определен експериментално чрез усредняване на измерванията върху много хора. От физична гледна точка механичните трептения и вълни извън този диапазон не се различават от звука и затова се разглеждат заедно с него в раздела *акустика*.



Механичните вълни с честота под 20 Hz се наричат *инфразвук*, а с честота над 20 kHz – *ултразвук*. Някои животни възприемат като звук вълни и от тези области (табл. 3.1). Най-високочестотните механични вълни от областта $10^9 - 10^{13}$ Hz се отнасят към *хиперзвука*.

Табл. 3.1. Честотни интервали на звук, възприеман от някои животни

Слон	5 Hz – 10 kHz	Мишка	2 kHz – 90 kHz
Котка	50 Hz – 90 kHz	Прилен	10 kHz – 100 kHz
Куче	60 Hz – 50 kHz	Нощна пеперуга	15 kHz – 80 kHz



Източници на звук могат да бъдат всички трептящи тела (пръчки, струни, мембрани, въздушни стълбове и др.), които създават механични вълни в материална среда.

Скоростта на разпространение на звука не зависи от честотата на трептенията, а от еластичните свойства и плътността на средата ρ .

Физични характеристики на звука

Физичните характеристики на звука са свързани с неговите физични свойства, а психофизичните – с възприемането му от човека. Освен честота, други по-важни физични характеристики на звука са звуково (акустично) налягане, интензитет, ниво на интензитета и спектрален състав.

Звуково налягане Δp е допълнителното налягане, което възниква при разпространението на надлъжните звукови вълни в местата на сгъстяване ($\Delta p > 0$) и разреждане ($\Delta p < 0$) на частиците на средата. То се изменя с времето по хармоничен закон, тъй като по такъв закон се изменя с времето и скоростта на трептене с на частиците.

Налягането Δp е равно на произведението от s и величината $z = \rho v$, наречена *акустично съпротивление* или *звук импеданс* на средата:

$$\Delta p = sz = s\rho v \quad . \quad (3.12)$$

Интензитет на звука I е пренесената от звуковата вълна енергия E за единица време ($t = 1 \text{ s}$) през единица площ ($S = 1 \text{ m}^2$), разположена перпендикулярно на посоката ѝ на разпространение:

$$\boxed{I = \frac{E}{St}} , \quad [I] = \frac{\text{W}}{\text{m}^2} .$$

Интензитетът на звука има смисъл на *плътност на енергиен поток*, тъй като под енергиен *поток* се разбира енергията, пренесена през площта S за единица време. Освен за енергия, величините *поток* и *плътност на потока* се въвеждат и за други физични величини, като например за пренесени обем на флуид, количество топлина, енергия на лъчение, маса и др.

Стойностите на интензитета на звуците, възприемани от човешкото ухо, са в много широк диапазон. За тяхното сравняване се използва физична величина, наречена *ниво на интензитета* L :

$$L = \lg \frac{I}{I_0} .$$

За начална стойност в скалата на интензитета е приета $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$. Тя е определена като най-малкия интензитет на звук с честота 1 kHz, който човек чува (*праг на чуване*).



Нивото на интен-
зитета е безразмерна величина и се изразява в единицата бел (В).
Звук с интензитет I , независимо от честотата, има ниво на интен-
зитета един бел ($L = 1\text{В}$), ако $I = 10 I_0$. По-популярна в практиката е
производната единица децибел (dB), 10 пъти по-малка от бела:

$$[L] = \text{В} = 10 \text{ dB} .$$

Психофизични характеристики на звука

Психофизичните характеристики на звука са височина на звука, ниво на гръмкост и тембър. Докато физичните характеристики се определят обективно чрез измерване със съответни уреди, психофизичните се оценяват субективно от човека по слуховото му усещане. Между физичните и психофизичните характеристики има сложно съответствие.

Усещането за височина на звука се определя главно от честотата на основния тон и в по-малка степен – от неговия интензитет и спектрален състав. Поради способността за адаптация звук с по-голям интензитет или продължителност се възприема като по-нисък от звук със същата честота, но с по-малък интензитет или продължителност. За оценка на височината на звука в музиката се използват честотни интервали, наречени *октави*. Тяхната ширина е различна, тъй като всяка следваща октава започва с двойно по-голяма честота от началната честота на предишната октава. Те са 10: 16 – 32, 32 – 64, 64 – 128 Hz и т.н.

Timbre

Tuning Fork



Flute



Violin



Human Voice



Clarinet

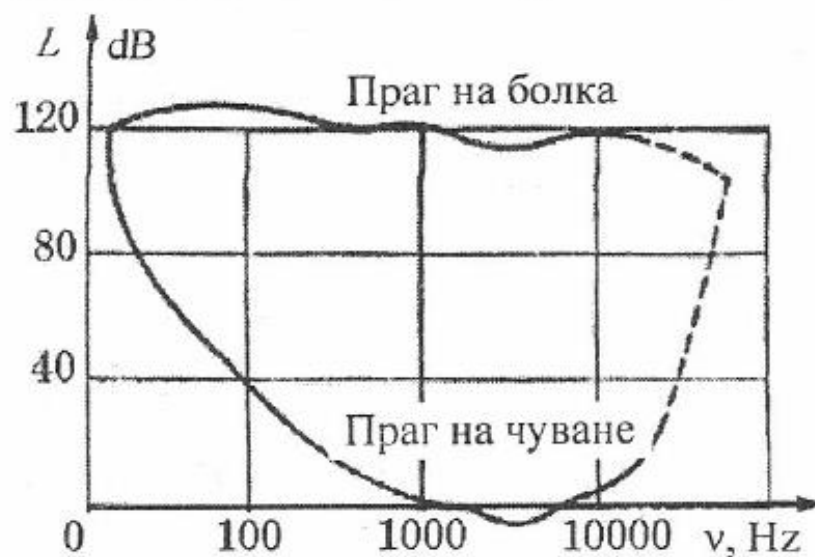


Тембърът се определя от спектралния състав на звука. Той зависи от броя и относителния интензитет на обертоновете (фиг. 3.4, фиг. 3.5). Тъй като обертоновете са с по-високи честоти и се поглъщат по-силно във въздуха, тембърът се променя с отдалечаване от източника на звук.

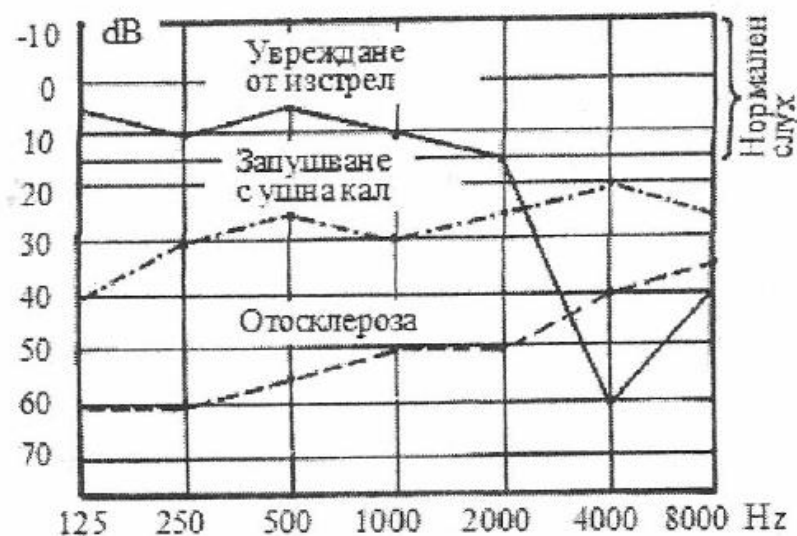
За оценка на степента на слуховото усещане, т.е. за определяне на звука като по-силен или по-слаб, е въведена субективната величина *ниво на гръмкост* Г.

Единицата за ниво на гръмкост се нарича *фон* (*phon*), за да се различава от равната ѝ по големина единица за ниво на интензитет *децибел* (dB).

Областта, в която попадат механичните трептения с честота от 20 Hz до 20 kHz и интензитет между прага на чуване и прага на болката, се нарича *област на чуване* (фиг. 3.11).



Фиг. 3.11. Област на чуване

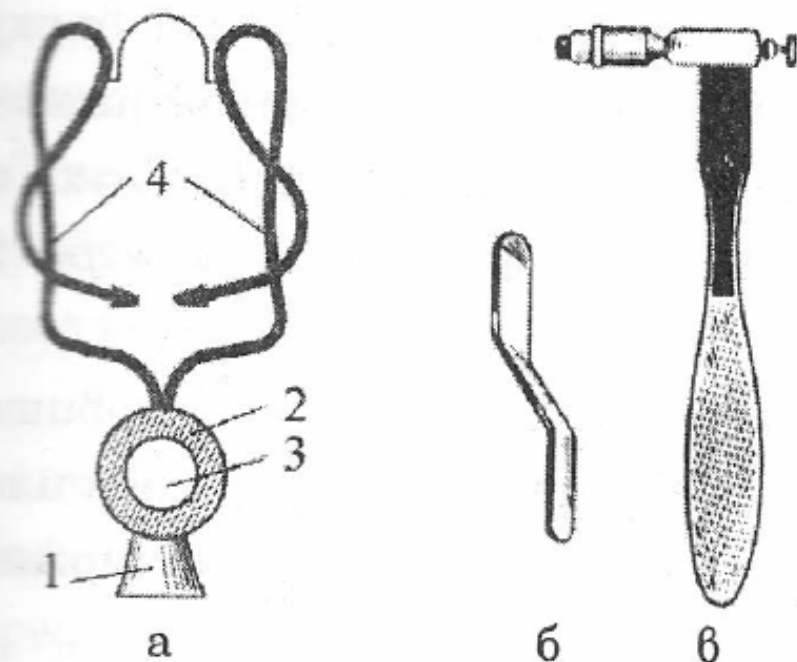


Прагът на чуване определя *остротата на слуха*. Методът за измерването му се нарича *аудиометрия*. Аудиометърът се състои от електронен генератор на тонове с определена честота и регулируем интензитет, измерителен уред за нивото на интензитета и слушалки. Измерените прагови стойности на интензитета се представят графично като положителната посока на ординатната ос е насочена надолу. В интервала 125 – 8000 Hz нормалните аудиограми попадат изцяло в областта до 15 dB, докато прагът на чуване при някои увреждания на слуха се повишава на 40 – 60 dB (фиг. 3.12).

Звукови методи в медицинската диагностика

При някои физиологични процеси в човешкото тяло се получава звук, който може да бъде използван за диагностика. Преди всичко такива процеси са сърдечната дейност и дишането. При болестни състояния се променя тонът или тембърът на сърдечните звукове и на звука от движението на въздуха в дихателните пътища. Класически метод за изследване на пациент по възприемания от лекаря звук е *прислушването (аускултацията)*. С аускултация може да се установи и наличието на перисталтика на стомаха и червата, както и сърдечна дейност на плода при бременни.

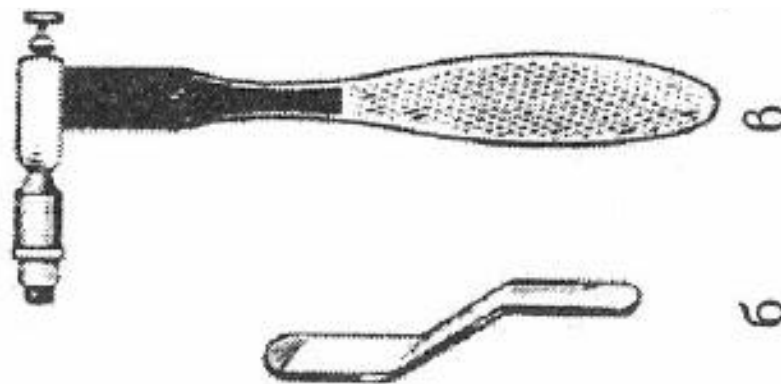
Най-простият уред за аускултация е бинауралният *стетоскоп* (фиг. 3.17 а). Той има два входа, с които се притиска към тялото: единият (1) е за прислушване на сърцето, а по-широкият (2) е за прислушване на белия гроб. Звукът се възприема от еластична мембрана върху куха капсула (3), която служи за резонатор. От там той се предава до ушите на лекаря с еластични тръбички (4) с твърди краища, които, поставени в тях, ги изолират от други звукове.



Фиг. 3.17. Бинаурален стетоскоп (а), плесиметър (б) и чукче (в)

За усилване и записване на звуковете, носещи диагностична информация, се използват *контактни микрофони*, които ги преобразуват в електрични трептения. Този метод за изследване на сърдечната дейност се нарича *фонокардиография*. Понякога той се прилага едновременно с електрокардиографията.

Освен звуковете, произлизащи от човешкото тяло, за диагностика се използват и така наречените *резонансни тонове*, получавани по метода *перкусия* (*причукване*). Характерът им зависи главно от механичните свойства (еластичност, плътност) на тъканите, разположени под мястото на перкусия.



Перкусията се прави със специално чукче с мек (гумен) връх върху еластична пластинка, наречена *плесиметър* (фиг. 3.17 б, в), която се поставя върху тялото на болния. Прилага се перкусия и с удари на сгънат показалец на едната ръка върху фалангата на показалеца на другата. Ако под мястото на почукване има меки тъкани (мускул, мастна тъкан), звукът е тих и заглъхващ, а ако там има кост или кухина, той е силен, тъй като се усилва от резонанса. Така могат да се определят границите на белия дроб или сърцето и да се разбере дали някоя кухина е пълна с въздух или течност.

Ефект на Доплер

❖ През 1842 г. австрийският физик и математик Доплер (Johann Doppler) публикува научната статия "Върху цветната светлина от двойни звезди и някои групи небесни тела". В нея той предполага, че цветът на светлината (честотата на светлинните вълни) от някои звезди зависи от тяхното движение спрямо Земята. Движещите се към Земята звезди излъчват синкава светлина, а отдалечаващите се от нея – червеникава.

Доплер доказва, че промяната на честотата (дължината на вълната) при движение на източника или приемника се отнася за всички видове вълни. Той прави този извод въз основа на аналогия между описаното от него явление и промяната на честотата на морските вълни. Морските вълни са с по-голяма честота за кораб, излизащ в открито море (срещу вълните), а с по-малка честота за кораб, движещ се към морския бряг (след вълните). Интересно е, че Доплер не разглежда откритото от него явление при звуковите вълни, където то има най-голямо приложение.

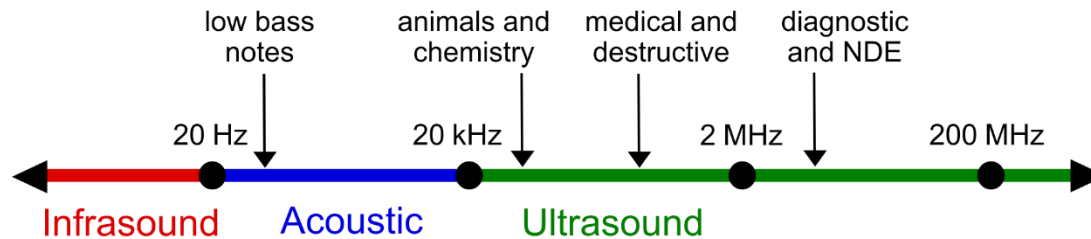
Ефект на Доплер е изменението на честотата на вълните, което се получава, ако източникът или приемникът на вълните се движат един спрямо друг. Той се проявява не само при механичните, но и при електромагнитните вълни.

Нека скоростта на разпространение на вълните е v . Да предположим, че източникът е неподвижен, а приемникът се приближава към него със скорост $v_d > 0$. Тогава в приемника за единица време ще попадат повече вълни, отколкото когато той е неподвижен. Това означава, че приемникът ще възприема по-висока честота ν' от честотата на вълните ν , излъчвани от източника.

УЛТРАЗВУК

Получаване на ултразвук

Ултразвукът (УЗ) обхваща механичните трептения и вълни с честоти над горната честотна граница на областта на чуване



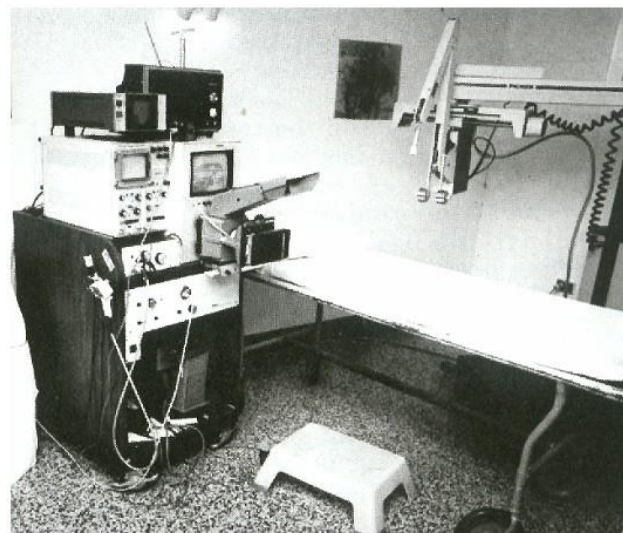
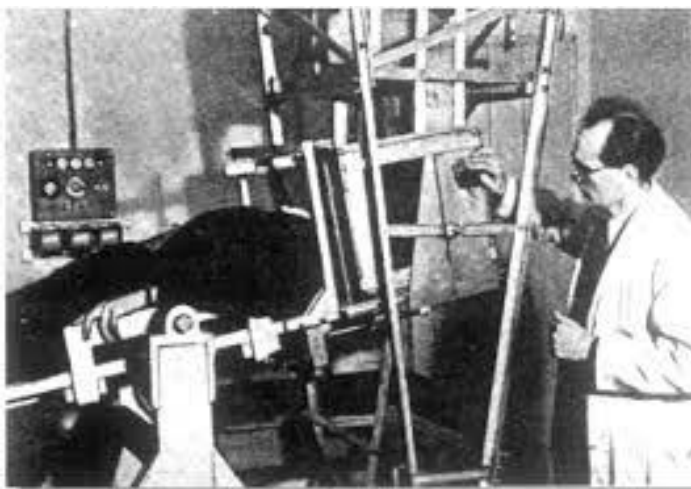
Източници на УЗ са различни механични и електромеханични устройства. Най-широко приложение имат електромеханичните генератори на УЗ, основаващи се на две подобни явления – електрострикция и магнитострикция. *Електрострикцията* (от лат. strictio – свиване) е изменение на формата и размерите на диелектрици и полупроводници в електрично поле, а *магнитострикцията* – изменение на формата и размерите на вещества при намагнитването им в променливо магнитно поле, проявявано най-силно при ферромагнетичните (вж. § 20.1).

Биологичното действие на УЗ се свежда до две основни направления. Първото включва разрушаване на клетки, микроорганизми и инактивиране на вируси, което намира приложение при екстракция на биологичноактивни вещества и за стерилизация.

Във второто направление са механичното, топлинното и нервнорефлекторното действие на УЗ върху човека и животните. Във физиотерапията с озвучаване на кожата и подлежащите ѝ тъкани се постига не само локално действие, но и промени в кръвното налягане, сърдечната честота, нивото на кръвната захар и др.

Физични принципи на ехографията

❖ Ултразвукът е приложен за първи път в медицинската диагностика през 1942 г., когато за локализиране на мозъчни тумори К. Дусик (Karl Dussik) използва сонар от оборудването на кораб през Втората световна война. Ултрасонографията става общоприета през 1970 г. след получаването на двумерни образи и въвеждането на скала за сивота и сега е неразделна част от модерните методи за образна диагностика.



Характеристики и етапи на метода

Днес получаването на образи с ултразвук (ехографията) е един от най-често използваните методи за образна диагностика. В сравнение с останалите методи ехографията има няколко положителни характеристики:

- УЗ вълни нямат йонизиращо действие и не са опасни;
- апаратурата е портативна и сравнително евтина;
- образите се получават в реално време;
- разделителната способност е добра;
- с прилагане на принципа на Доплер се получава информация за скоростта на движение на кръвта и сърцето.

Ехографията се основава на преминаването на УЗ вълни през човешкото тяло и приемането на отразените вълни от границата между две биологични структури с различно акустично съпротивление, която има различен коефициент на отражение (табл. 4.1).

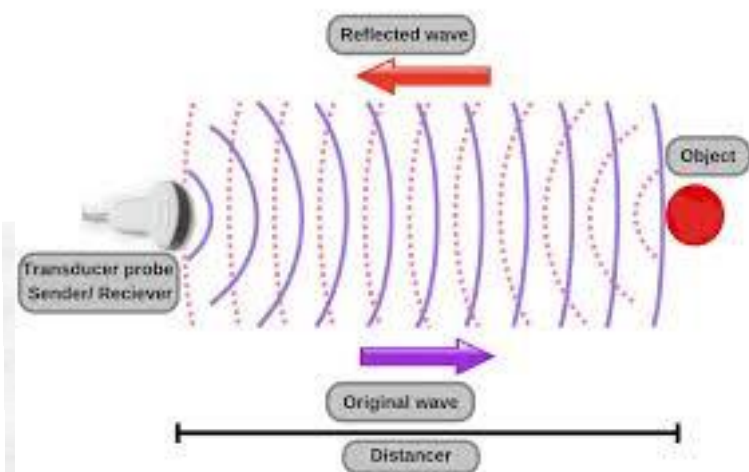
Табл. 4.1. Коефициенти на отражение на УЗ на границите между различни тъкани

Мозък/черепна кост	0,66
Мастна тъкан/мускул	0,10
Мастна тъкан/бъбрек	0,08
Мускул/кръв	0,03
Меки тъкани/вода	0,05
Меки тъкани/въздух	0,9995

Използва се подвижен източник-приемник на УЗ, наречен *трансдюсер* (фиг. 4.3) с различна форма в зависимост от предназначението.



Получаването на образи с УЗ включва следните етапи:

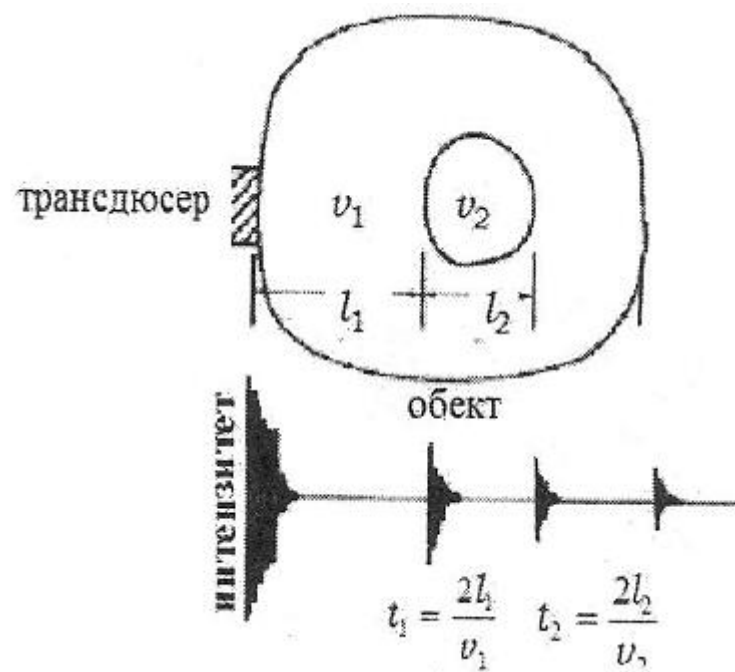


- насочване към тялото и преминаване през него на високочестотни УЗ импулси (от 1 до 5 MHz), излъчени от трансдюсера;

- отразяване на част от УЗ вълни на границите между различен тип тъкани обратно към трансдюсера (останалата част се разпространява по-нататък в тялото и може да се отрази от други граници):

- детектиране на отразените УЗ вълни в трансдюсера и определяне на разстоянието до границите между тъканите по времето, за което ехото достига до приемника;

- представяне на разстоянията и интензитетите на отразените вълни във вид на образ върху монитор.

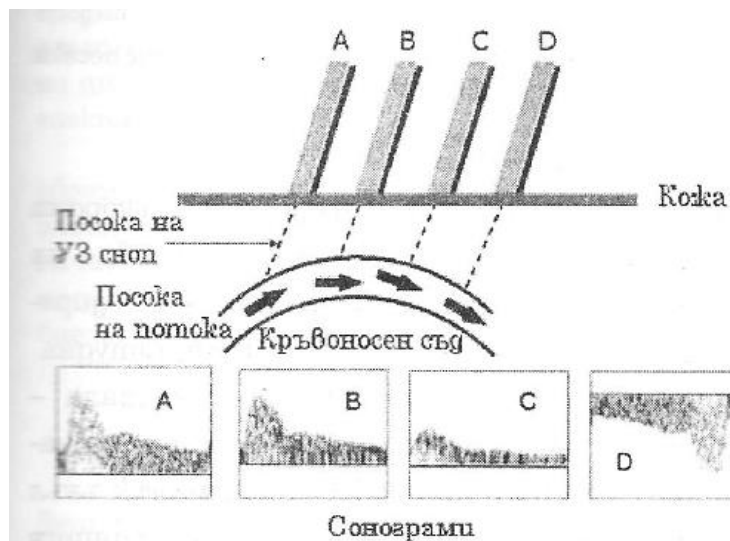


Импулсите, които достигат до по-далечни граници, имат по-малка амплитуда (фиг. 4.4), тъй като интензитетът на УЗ отслабва с увеличаване на разстоянието, а времето за изминаване на разстоянията до тях нараства. Това в още по-голяма степен се отнася за отразените импулси (ехо-импулси), които изминават двойно по-големи разстояния. Има няколко начина (формати) за представяне на ехо-импулсите, наречени А-мод, В-мод, С-мод и М-мод.

Доплерова ехокардиография

- *Определяне на скоростта и на спектъра на скоростта*

С класическата Доплерова ехокардиография се определя скоростта на кръвния поток v_b , когато движещите се еритроцити отразяват УЗ вълни. Измерването се основава на формулата за



Фиг. 4.15. Спектри на скоростите (сонограми)

Съвременните Доплерови ехокардиографи дават зависимостта на скоростта на кръвта от времето (*спектър на скоростта*), тъй като скоростта се изменя по време на сърдечния цикъл. Спектърът има вид на положителна крива, когато посоката на движение е към трансдюсера и на отрицателна – при отдалечаване от него (фиг. 4.15). Изобразяването на различните скорости (*сонограми*) се постига със специални микрокомпютри, които декодират получените Доплерови сигнали и ги трансформират в различни компоненти на скоростта.

Приложение на ултразвука за лечение

Ултрафонофорезата е метод за внасяне на лекарствени вещества в организма през кожата посредством УЗ. За целта те се разтварят в течност – вода, спирт, масло, глицерин. Методът е сравним по ефективност с инжектирането и има няколко предимства пред него: локално действие и равномерно разпределение на лекарството в третираните тъкани; няма нарушаване на целостта на кожата и опасност от инфектиране. Разтичането на разтворите по кожата е пречка за точното дозиране на препаратите, което е важно при наличие на силнодействащи компоненти.

Фокусираната УЗ хирургия е нов неинвазивен метод, който дава възможност за лечение на тъканни аномалии чрез селективно топлинно увреждане с фокусиран в малък обем УЗ сноп. Отделената топлина във фокуса на снопа разрушава клетките, без да засяга подлежащите и съседните тъкани. Точно в определеното място само за няколко секунди температурата достига до 55 – 90 °С, където настъпва денатурация на белтъците, необратимо увреждане на клетките и некроза на тъканите.