

ТЕМА 15. ЗВУКОВИ ВЪЛНИ

1. Същност на звуковите вълни

Разделът от физиката, който изучава генерирането, разпространението в различни среди и регистрирането на звука, както и всички явления, съпровождащи звука, се нарича *акустика*.

1.1. Звук

Механични вълни с честота от 16 до 20 000 херца, които могат да се възприемат от човешкото ухо, се наричат *звук*.

Поради своята същност звукът може да се разглежда в два аспекта: като психофизиологично възприятие, регистрирано от ухото на човека; и като физично явление. Това налага при описанието на звуковите явления да се въведат и двата типа характеристики на звука: физични и психофизиологични.

Физичните характеристики на звука са свързани с неговите физични свойства и се оценяват обективно чрез количествено измерване с подходящи уреди.

1.2. Характер на звуковата вълна

За да се реализира една звукова вълна, е необходимо наличието на източник.

Източник на звук е всяко тяло, което извършва механични трептения в дадена среда.

Източникът е необходимо, но не достатъчно условие за създаване на звук. Второто важно условие е съществуването на еластична среда, в която да се разпространяват механичните трептения. Тази среда може да е твърдо тяло, течност или газ.

В твърдите тела се наблюдава както надлъжна, така и напречна звукова вълна, поради това, че в тях има не само деформация на свиване (опъване), но и деформация на преместване (хлъзгане).

В течностите и газовете звуковата вълна е само надлъжна. Причина за това е, че в тези среди се наблюдава само еластичност на свиване и разширяване.

Хората и повечето животни използват звука във въздуха, за да се ориентират и да получават информация от околната среда.

Звукът във въздуха е надлъжна вълна.

2. Физични характеристики на звука

Основните физични характеристики на звука са величините честота, скорост, звуково налягане, интензитет и ниво на интензитета.

2.1. Честота на звука

В дадената по-горе дефиницията за звук интервалът от 16 до 20 000 Hz се нарича диапазон на чуване. Границите на този диапазон не са точно определени и зависят от индивидуалните качества на човека.

Интервалът от 16 до 20 000 херца, в който човекът чува звука се нарича диапазон на чуване.

Различните животни могат да чуват звук извън тези граници. Така например кучето чува звуци с честота до $\nu=70$ kHz, делфините – звуци с честота до $\nu=110$ kHz, а рибите и медузите чуват звуци с много ниски честоти ($\nu < 16$ Hz).

Инфразвук

Механичните вълни с честота под 16 Hz се наричат инфразвук.

Ултразвук

Механичните вълни с честота над 20 kHz се наричат ултразвук.

Хиперзвук

Високочестотните механични вълни с честота $10^9 \div 10^{13}$ Hz носят името хиперзвук.

2.2. Скорост на звука

Скоростта, с която се разпространява звукът в дадена среда, зависи от нейните еластични свойства. В твърдите тела и течностите звукът се разпространява по-бързо, отколкото в газовете.

А. Скорост на звука в газове

При разпространение на звукова вълна в газ се извършват адиабатни еластични деформации на свиване и разширение на газа, които се характеризират с модула на обемна еластичност K .

$$dp = -K \frac{dV}{V}$$

15.1

където dp е изменението на налягането, породено от изменението dV на обема, dV/V е относителното изменение на обема. Знакът „-“ показва, че когато обемът

намалява ($dV < 0$), налягането нараства ($dp > 0$) и обратно. Еластичният модул K зависи от вида на термодинамичния процес, който протича при свиване и разширяване на газа. Възможни са два гранични случая. Първият е когато налягане се изменя много бавно. Тогава областите от газа, които се свиват, предават топлина на съседните области, които се разширяват. Така в резултат на топлообмена температурата на газа се поддържа постоянна и процесите са изотермни. Поради ниската топлопроводност на газовете обаче, топлообменът при тях се извършва бавно. Скоростта, с която се изменя налягането за механичните вълни от диапазона на чуване, е много по-голяма от скоростта на топлообмен. Затова между съседните области на свиване и разширяване на газа практически няма топлообмен и се реализира вторият граничен случай, когато процесите са адиабатни. При разпространение на звукова вълна се извършва адиабатно свиване и разширяване на газа. От уравнението на адиабатния процес с идеален газ

$$\gamma p dV + V dp = 0$$

и уравнение (15.1) определяме модула на обемна еластичност K :

$$K = \gamma p \quad 15.2$$

където γ е коефициентът на Поасон, а p – налягането на газа.

Скоростта u на звука се изразява с формулата

$$u = \sqrt{\frac{K}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}} \quad 15.3$$

където за механични вълни в газ еластичните свойства на средата се характеризират с модула на K , а инертността – с плътността ρ на газа.

Това уравнение е получено за пръв път от Лаплас и е известно като **формула на Лаплас** за скоростта на звука в газове.

Като се използва последната формула и уравнението за състоянието на газа, за скоростта на звука се получава

$$u = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\mu}} \quad 15.4$$

където μ е моларната маса на газа, а $R=8,31$ J/mol.K е универсалната газова константа. От получената формула се вижда, че скоростта на звука нараства с повишаване на температурата. Или скоростта на звука в газовете не зависи от налягането, а само от температурата на средата. Скоростта на звука във въздуха

зависи също така от неговата влажност (посредством коефициента на Поасон γ). При стайна температура тази скорост е 340 m/s.

Б. Скорост на звука в твърди тела

Скоростта на надлъжната звукова вълна в твърдите тела е равна на

$$u = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$
15.5

където E е модулът на Юнг, а ρ е плътността на твърдото тяло.

Скоростта на напречната звукова вълна в твърдите тела е равна на

$$u = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$
15.6

където G е модулът на еластичност при напречна деформация.

Скоростта на звука във водата е около 1500 m/s, а в твърдите тела достига до 5000-6000 m/s.

2.3. Звуково налягане

Газът, в който се разпространява звукът, се намира при определено налягане, например при атмосферно налягане $p_0=10^5$ Pa. Звуково налягане $p_{зв}$ се нарича само допълнителното налягане, което възниква при разпространението на звуковата вълна, т.е. в участъците, в които се получава сгъстяване или разширяване на частиците на средата.

Звуковото налягане $p_{зв}$ е равно на изменението на налягането на газа, предизвикано от звуковата вълна.

Във формула (15.1) полагаме $dp = p_{зв}$ и получаваме

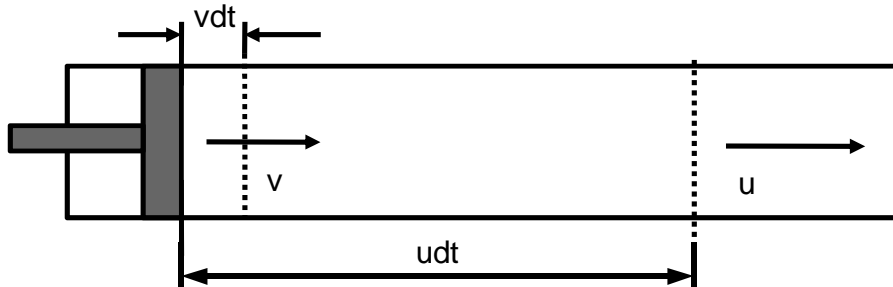
$$p_{зв} = -K \frac{dV}{V} = -\rho u^2 \frac{dV}{V}$$
15.7

където сме заместили еластичния модул K от формула (15.3) за скоростта на звука.

За да определим отношението dV/V , ще разгледаме следния модел: газ запълва обема на дълъг цилиндър с подвижно бутало с площ S (фиг. 15.1). В даден момент буталото започва да се движи със скорост v . За малък интервал от време dt то се придвижва на разстояние vdt и обемът на газа се изменя с $dV = -Svdt$. Знакът „-“ показва, че обемът на газа намалява. Деформацията на свиване на газа се

разпространява със скоростта на звука u и за време dt обхваща обем $dV = S u dt$. Относителното изменение на този обем в резултат на свиването е:

$$\frac{dV}{V} = -\frac{S v dt}{S u dt} = -\frac{v}{u} \quad 15.8$$



Фиг. 15.1

Съотношението (15.8) остава в сила и в общия случай на разпространение на звукови вълни. То изразява връзката между скоростта v на частиците в дадена област, скоростта u на звука и относителното изменение а обема dV/V на тази област. Заместваме dV/V от (15.8) в (15.7) и за звуковото налягане получаваме:

$$p_{зв} = \rho u v \quad 15.9$$

За плоска хармонична звукова вълна v на частиците е:

$$v = \frac{\partial y(x, t)}{\partial t} = \omega A \cos(\omega t - kx) = \omega A \sin\left(\omega t - kx + \frac{\pi}{2}\right)$$

Налягането на звука е

$$p_{зв}(x, t) = \rho u v = \frac{\partial y(x, t)}{\partial t} = \rho u \omega A \sin\left(\omega t - kx + \frac{\pi}{2}\right) \quad 15.10$$

Най-често звуковите вълни се описват чрез отклонението на частиците от равновесните им положения (вълна на отклонението) или чрез звуковото налягане (вълна на налягането). За плоска хармонична звукова вълна отклонението $y(x, t)$ и звуковото налягане $p_{зв}(x, t)$ се изменят по синусови закони. Както при хармоничното трептене, където скоростта изпреварва по фаза отклонението с $\pi/2$, звуковото налягане също изпреварва по фаза отклонението с $\pi/2$. Това означава, че във всяка точка максимумите на звуковото налягане настъпват $s1/4$ от периода по-рано от максимумите на отклонението.

От уравнение (15.10) следва, че максималната стойност (амплитудата) на звуковото налягане е

$$p_{зв}^{max} = \rho u \omega A \quad 15.11$$

За да получим връзката между амплитудата на звуковото налягане и интензитета на звука, повдигаме на квадрат двете страни на уравнение (15.11)

$$(p_{зв}^{max})^2 = 2\rho u \left(\frac{\rho u \omega^2 A^2}{2} \right) = 2\rho u I \quad 15.12$$

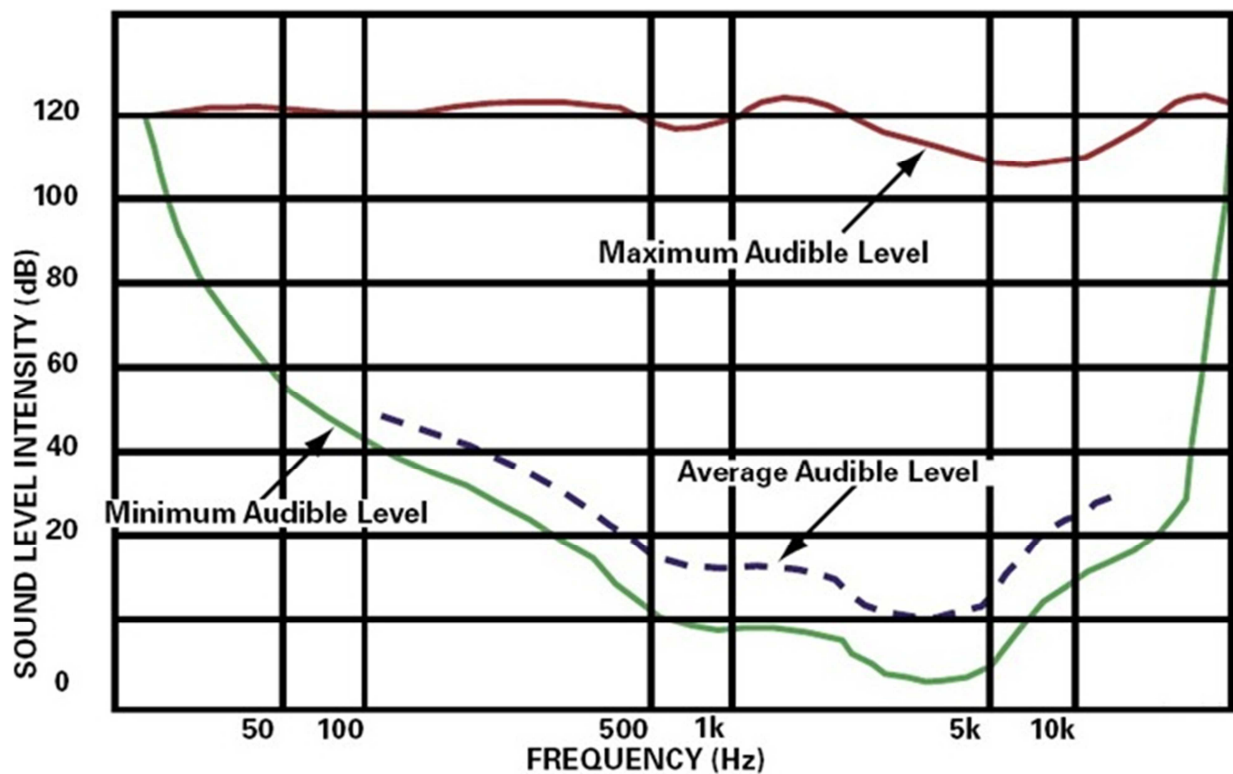
Следователно интензитетът на звука е правопрпорционален на квадрата на амплитудата на звуковото налягане

$$I = \frac{1}{2\rho u} (p_{зв}^{max})^2 \quad 15.12$$

Звуково съпротивление.

Величината $Z = \rho u$ се нарича звуково съпротивление (звук импеданс) на средата.

2.4. Ниво на интензитета



Фиг. 15.2

Човешкото ухо е чувствително към звукови вълни, интензитетът на които се мени в много широки граници. Например хармонична звукова вълна с честота 1000 Hz се възприема от стандартното ухо като звук, ако интензитетът ѝ е в интервала от $I_0=10^{-12}$ W/m² до $I_{\max}=1$ W/m². На фиг. 15.2 е представена областта на чуване в зависимост от честотата на звука.

Интензитетът I_0 определя **долния праг на чуване**. Ухото не е чувствително към звукове с по-малък интензитет. Горната граница I_{\max} се нарича **праг на болката** или **горен праг на чуване**. Ако интензитетът на вълната е по-голяма от I_{\max} , усещането за звук преминава в усещане за болка.

Величината

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

15.13

се нарича **ниво на интензитета**. Нивото на интензитета се измерва в единицата бел [B].

Нивото на интензитета е един бел, когато интензитетът е 10 пъти по-голям в сравнение с началния интензитет ($I=10I_0$).

Понеже величината бел е голяма, се използва 10 пъти по-малката – децибел [dB].

Един децибел имаме, когато интензитетът на звука се изменя 1.26 пъти ($I=1.26I_0$).

Звук с интензитет $I=10I_0$ има ниво на интензитета $L=10$ dB. Ако интензитетът I нарасне 10 пъти, нивото на интензитета L се увеличава с 10 dB. При нарастване на I 100 пъти, нивото на интензитета L се увеличава с 20 dB и т.н. На долния праг на чуване $I_0=10^{-12}$ W/m² съответства ниво на интензитета $L=0$ dB. На горния праг на чуване (прага на болката), за който $I=10^{12}I_0$, съответства ниво на интензитета $L=120$ dB.

Величината ниво на интензитета се въвежда, за да се сравнят интензитетите на различни звукове, които се приемат от човешкото ухо. Една от причините да се използва логаритмичната скала за сравняване на интензитетите на звуковете е огромният обхват ха ухото – възприема звукове, интензитетът на които се различава до 10^{12} пъти. Другата причина е свързана с начина на възприемане на звука. Ако интензитетът на звука расте в геометрична прогресия, усещането за сила на звука расте в аритметична прогресия. Такава връзка между силата на усещането и силата на дразнене съществува и при другите сетивни органи (например зрението и обонянието на човека) . Във физиологията тя е известна като **психофизичен закон на Вебер-Фехнер**.

В табл. 1 са представени стойностите за нивото на интензитета за някои характерни шумове от всекидневието.

Таблица 1

Силата на звука за различни източници		
Звук в света на хората	Децибели	Звук в природата
Самолет при излитане, на 50 метра	150	Изригване на вулкан
Рок певец, който крещи в микрофона	140	
Пневматичен чук	130	Гръмотевица
Праг, след който звукът е болезнен		
Машинно отделение в кораб	120	
Влак в непосредствена близост, метро	110	
Музика в дискотека	100	
Камион с дизелов двигател	90	Слон
Улица с голямо движение	80	
Прахосмукачка	70	
Нормален говор	60	Петел
Бизнес офис	50	Гъска, патица
Библиотека	40	Чуруликане на птица
Човешки шепот	30	Градски парк
Празно студио	20	Шумолене на дървесни листа
Стенен часовник	10	Мишка

Ще подчертаем, че величината ниво на интензитета е еднозначно свързана с интензитета на звука и не зависи от това как ухото възприема звука. Единствената връзка с възприемането на звука е константата I_0 , която е подбрана да съответства на прага на чуване за стандартното ухо при честота 1000 Hz. Същата стойност на I_0 обаче се използва и при пресмятане на нивото на интензитета за произволна честота на звука, за която постоянният интензитет I_0 вече не съответства на прага на чуване.

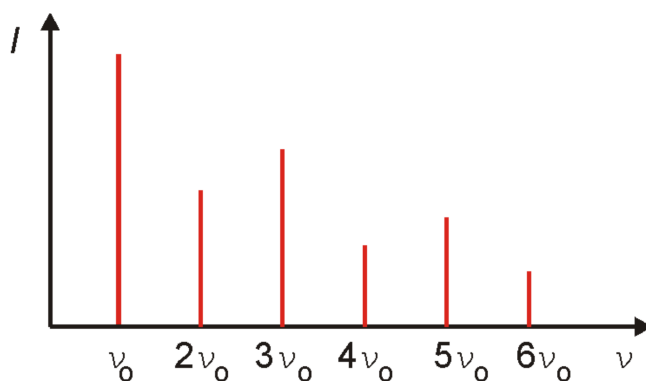
2.5. Акустичен спектър

Уравнението за хармонично трептене е приложимо само за звук с определена честота. Такъв звук се получава от много малко източници и се нарича **прост (чист) тон**.

Звукът, който съответства на трептения с една хармонична честота, се нарича чист тон.

Такива звуци издават камертоните. Така например тонът “ла” в музиката съответства на честота 440 Hz.

Ако трептенията са **нехармонични**, възникват сложни тонове, съдържащи трептения с различна честота и амплитуда. Те могат да се разложат на няколко прости тона и да се представят като линейна комбинация от хармонични трептения или във вид на **акустичен спектър** (фиг.2).



Фиг. 15.3

Съвкупността от простите тонове, чрез линейната комбинация на които се представя един сложен тон се нарича акустичен спектър.

Компонентата от акустичния спектър с най-ниската честота (v_0) и с най-голям интензитет се нарича **основен тон.**

Останалите компоненти имат кратни честоти ($2v_0, 3v_0, 4v_0, \dots$) на основния тон и се наричат **обертони**.

Тонове, които са кратни на хармоничните честоти, се наричат обертони.

Един и същ тон се възпроизвежда от различните музикални инструменти по различен начин. Например чистият тон “ла” с честота 440 Hz, издаван от камертон, когато се получава от различни музикални инструменти, вече е сложен тон, тъй като се придружава от различни по интензитет обертони, които го правят специфичен. Причина за това е различната комбинация от основен тон и обертони.

Тембърът се определя от спектралния състав на звука и зависи от броя и интензитета на обертоновете.

Комбинацията на интензитета на основния тон и интензитета и броят на обертоновете на един тон се нарича *тембър на звука*.

Тъй като обертоновете са с по-големи честоти от основния тон и се поглъщат по-силно във въздуха, тембърът се променя с отдалечаване от източника на звук.

3. Психофизиологични характеристики на звука

От гледна точка на психофизиологичните качества звукът се характеризира с **височина, тембър и ниво на гръмкостта**.

Докато физичните характеристики на звука се определят обективно чрез измерване със съответни уреди, психофизиологичните характеристики се оценяват субективно от човека по слуховото му усещане.

Ухото на човека възприема звуковете като ниски или високи, т.е. то ги подрежда според субективното им качество **височина на звука**.

3.1. Височина на звука

Височината на звука е субективно качество на звука, което се определя от човешкото ухо и зависи от честотата.

Височината на чистите тонове зависи главно от честотата. Тоновите с по-голяма честотата се възприемат като по-високи. Освен от честотата, височината на звука зависи и от интензитета. Височината на сложни звуци зависи и от разпределението на интензитета по честоти.

Единицата за промяна на височината на звука е *октава*. Една октава съответства на изменение на честотата на звука два пъти.

3.2. Ниво на гръмкостта

За оценка на степента на звуково налягане, т.е. за определяне на звука като по-силен или по-слаб, се използва субективната величина **ниво на гръмкостта**.

Тази величина се означава с Γ и е свързана с нивото на интензитета L чрез един коефициент на пропорционалност k , който е сложна функция на интензитета и честотата:

$$\Gamma = kL, \quad \Gamma = klg \frac{I}{I_0} \quad 15.14$$

където $k=f(n, I)$.

Нивото на гръмкостта е пропорционално на нивото на интензитета.

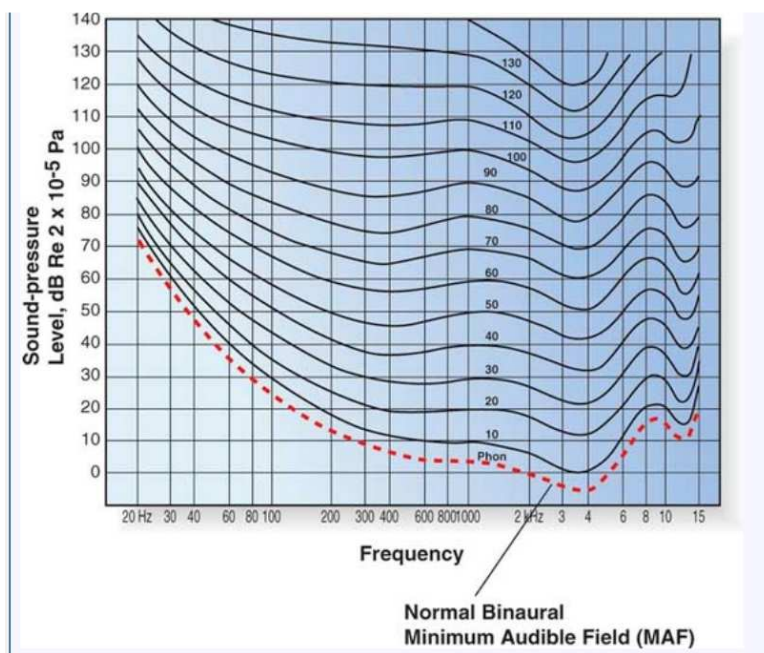
Прието е $k=1$ при честота $\nu=1$ kHz, т.е. при тази честота нивото на гръмкостта Γ съвпада с нивото на интензитета L ($\Gamma=L$).

Единицата за ниво на гръмкостта е равна по големина на единицата децибел, но за да се различава от нея, се нарича *фон (phon)*

За звук с честота, към която ухото е по-чувствително в сравнение с честота от 1000 Hz, нивото на гръмкостта във фонове е по-висока от нивото на интензитета (и обратно).

Стойностите на коефициента k при други честоти, различни от 1 kHz са измерени експериментално, като при всяка от тях е определен интензитетът, който предизвиква звуково усещане (гръмкост), еднаква с интензитета (гръмкостта) при 1 kHz.

От получените по този начин средни данни за хора с нормален слух са определени зависимостите на нивото на гръмкостта от честотата при различни нива на интензитета. Те се представят във вид на графики, наречени **криви на еднаква гръмкост** или **изофони** (фиг. 15.4).



Фиг. 15.4

Кривата с минимална гръмкост $\Gamma=0$ се получава при едва доловими интензитети (те се наричат долен праг на чуване). Прагът на чуване определя остротата на слуха. Методът за измерване се нарича **аудиометрия**.

Минималната разлика между честотата на два прости тона, които ухото може да възприема като различни, се нарича честотна разделителна способност.

Тя е най-добра и достига до 3 Hz при честота около 3 kHz, където прагът на чуване е най-нисък.

3.3. Шум и шумозащита

Шумът е продължителен звук със сложен спектър.

Характерно за шума, е че няма постоянен спектър, тъй като той се мени непрекъснато с времето. За това се казва, че шумът не може да се възпроизведе същият повторно.

Въздействието на шума върху човека е неблагоприятно. Той намалява производителността на труда, разстройва нервната система, отслабва слуха и др. Нивото на интензитета на шума се измерва с **шумомери** в децибели.

Защитата от шума се основава на двата основни закона за намаляване на интензитета на вълните – зависимостта му от разстоянието и отслабването поради поглъщане.

От формулата за интензитета на сферична вълна

$$I = \frac{W}{St} = \frac{W}{4\pi r^2 t}$$

се вижда, че интензитетът обратнопропорционален на квадрата на разстоянието между източника на звука и точката на измерване.

Съгласно закона за поглъщането, валиден за всички видове вълни (звукови, електромагнитни),

$$I = I_0 e^{-kd} \quad 15.15$$

където I_0 е началният интензитет, I – интензитетът на преминалите вълни през слой в дебелина d , а k се нарича **коефициент на поглъщане**. Шумът се поглъща слабо в бетона и металите, но поглъщането му в дърво, порести материали, текстилни тъкани и други е голямо. Именно тези материали се използват за облицоването на стените на помещения с цел те да бъдат предпазени от външни шумове.

4. Източници и приемници на звук

4.1. Стоящи вълни

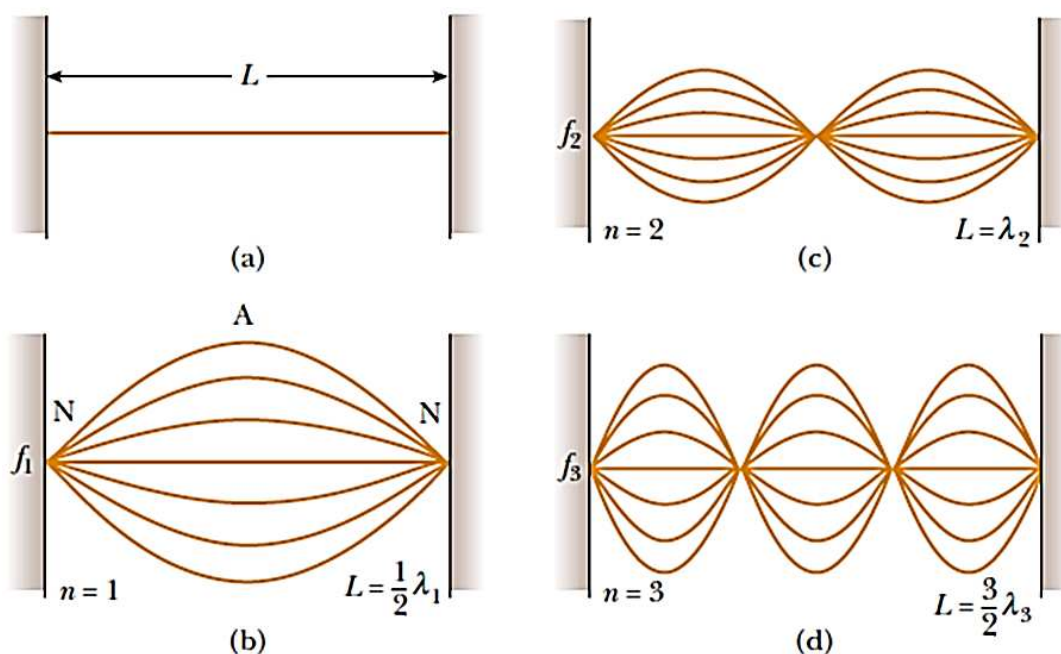
Когато въздушна среда се намира при определени гранични условия, например запълва съд с даден обем и форма на стените, в нея могат да се възбудят стоящи вълни. Обемът въздух се характеризира с набор от собствени честоти на трептене, които зависят от формата и размерите на съда. В общия случай

собствените чести бе образуват хармоничен ред и определянето им е сложна задача. Най-прост за анализ и с голяма практическо значение е случаят, когато въздухът запълва дълга цилиндрична тръба. Ако диаметърът на тръбата е малък в сравнение с дължината на вълната, може с приближение да се приеме, че в направление на оста на тръбата се разпространяват едномерни хармонични вълни, подобни на тези по опъната струна.

Ако двата края на тръбата са затворени, прилепващият към дъната на цилиндъра въздух не се движи и в краищата на тръбата се получават възли на стоящата вълна на отклонението (фиг. 15.5а). Собствените честоти на трептене на въздушния стълб се изразяват с уравнението

$$v_n = \frac{u}{\lambda_n} = \frac{u}{2L} n; \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad 15.16$$

където u е скоростта на звука във въздуха, а L – дължината на тръбата.

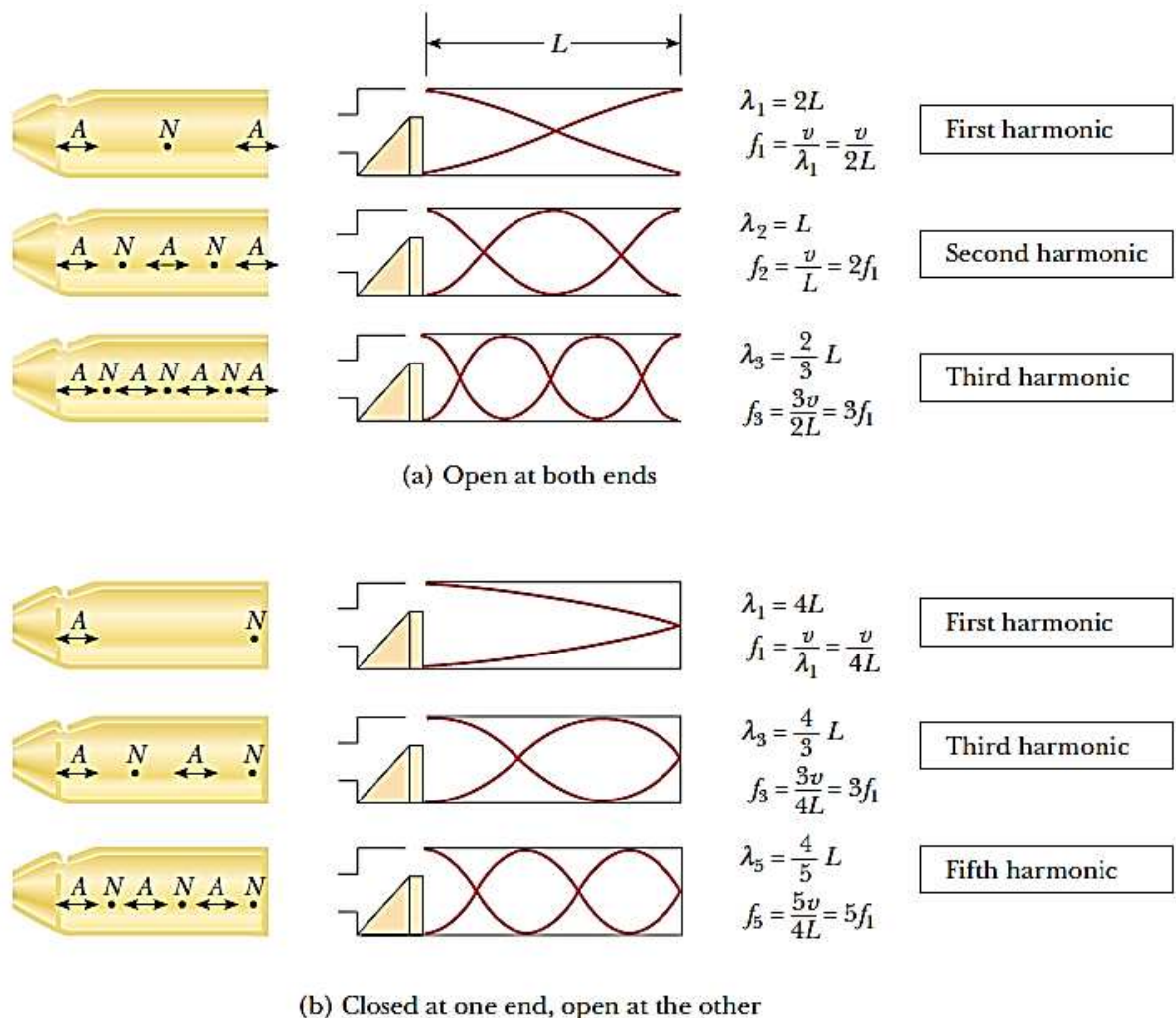


Фиг. 15.5а

Когато единият край на тръбата е отворен, стоящата вълна на отклонението има връх около отворения край и възел при затворения край на тръбата (фиг. 15.5б). Собствените трептения се изразяват с уравнението

$$v_n = \frac{u}{\lambda_n} = \frac{u}{4L} (2n - 1); \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad 15.17$$

Стоящата вълна на отклонението има върхове близо до двата края на тръбата, когато те са отворени (фиг. 15.5в). По дължината на въздушния стълб се нанасят цяло число полувълни и собствените честоти на трептене се изразяват с уравнение (15.16), както за тръба с два затворени края.



Фиг. 15.5 б,в

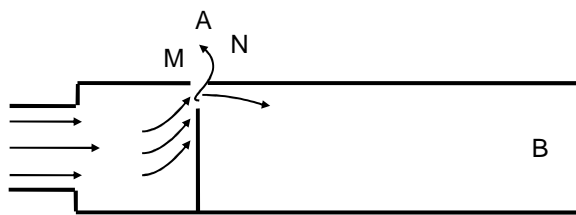
Звуковото налягане е отместено по фаза от отклонението с $\pi/2$, т.е. в точките, където отклонението на частиците от равновесното им положение е нула, звуковото налягане е максимално и обратно. Следователно възлите на стоящата вълна на налягането съвпадат с върховете на стоящата вълна на отклонението, а върховете на стоящата вълна на налягането са на местата, където стоящата вълна на отклонението има възли.

По-прецизен анализ показва, че върховете на стоящата вълна на отклонението са разположени малко извън отворените краища на тръбата, на разстояние от порядъка на радиуса на тръбата.

4.2. Музикални инструменти

Явлението резонанс се използва за формиране и усилване на звука от различни източници – духови и струнни музикални инструменти и др.

Като пример за духов инструмент ще разгледаме тръба на орган. Въздушният поток преминава през специален отвор М (фиг. 15.6), при което от острието N, разположено срещу отвора М, се откъсват вихри и се възбуждат трептения на въздушния стълб в тръбата с много широк спектър от честоти. До значителни амплитуди обаче достигат само трептенията, чиито честоти съвпадат със собствените честоти на въздушния стълб. Поради резонанса тези трептения се усилват и се предават на въздуха извън тръбата. Така въздушният стълб в тръбата на органа става източник на звукови вълни, чиито честоти се определят от дължината на тръбата и от граничните условия. Около отвора А, който свързва тръбата с атмосферния въздух, се получава връх на стоящата вълна на отклонението. В зависимост от това дали другия край В е отворен или затворен, собствените честоти се задават с уравнение (15.16) или (15.17).



Фиг. 15.6

В струнните музикални инструменти източници на звук са трептящите струни. Струните обаче са много тънки и не са в състояние да свиват и разширяват големи обеми от въздух. Затова, ако не се извършва допълнително усилване, издадените от тях звукове са с много малък интензитет. В струнните инструменти се извършва резонансно усилване на звука от тялото на музикалния инструмент и от обема въздух в него. Трептенията на струните предизвикват принудени трептения на тялото и на въздуха в него. За да се постигне усилване на звука, трябва собствените честоти на трептене на тялото и на обема въздух в него да са близки до собствените честоти на струните. Тогава настъпва резонанс и се извършва ефективно предаване на енергия от струните чрез трептящото тяло на инструмента на външния въздух – в околното пространство се излъчват звукови вълни със значителен интензитет.

4.3. Човешки глас

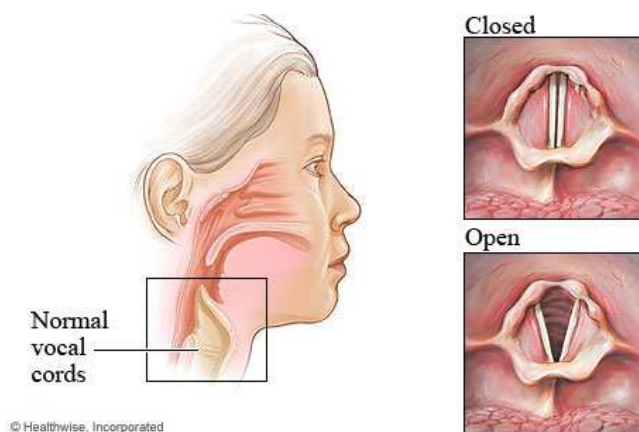
Съществува аналогия между начина, по който се формират звуковете на музикалните инструменти, и механизма на човешката реч. Гласните струни

извършват трептения, а гърлото, носната кухина и устната кухина са резонатори, които усилват и модифицират звука. Огромното многообразие от звукове, които може да издава човек, се дължи на два основни фактора:

➤ При изменение на опъването на гласните струни техните собствени честоти на трептене се изменят в широки граници. Подобно на струни те на музикалните инструменти, собствените честоти на гласните струни нарастват, когато те са по-силно опънати.

➤ Резонаторите, особено устната кухина, могат да се изменят по обем и форма, при което се променят честотите, които те усилват.

В процеса на дишането гласните струни (гласови гънки) са отпуснати и гласовата цепка е умерено отворена (фиг. 15.7а). При подготовка за говорене гласовите мускули опъват гласните струни и те затварят гласовата цепка (фиг. 15.7б). Налягането на въздуха под тях нараства, докато предизвика отваряне на гласовата цепка. Съгласно с уравнението на Бернули, когато скоростта на въздушния поток през гласовата цепка нараства, налягането намалява и гласните струни отново се затварят. След това налягането отново нараства и предизвиква следващо раздалечаване на гласовите струни и т.н.

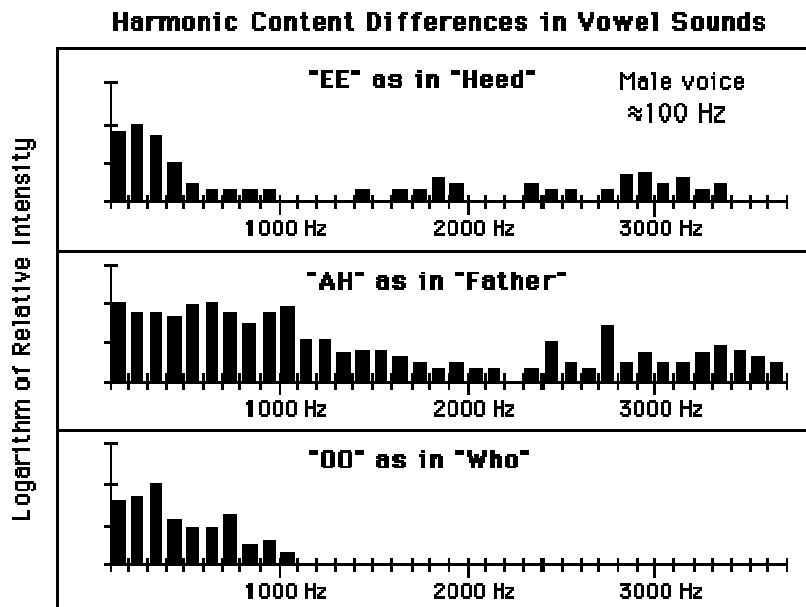


Фиг. 15.7а,б

Чрез разтягането на гласните струни при отваряне и затваряне на гласовата цепка се възбуждат собствени трептения на гласните струни с различни честоти, но с близки амплитуди. Резонансните кухини на устата и носа при подходящо положение на езика, зъбите и устните усилват определени честоти и формират спектъра на различните звукове.

Честотният анализ на гласните звукове на различните азбуки показва, че в спектрите им обикновено присъстват три резонансни пика. На фиг. 15.8 е показан относителният интензитет на различните честоти, формиращи гласни звукове. Честотите F_1 , F_2 и F_3 на гласните резонанси се наричат форманти.

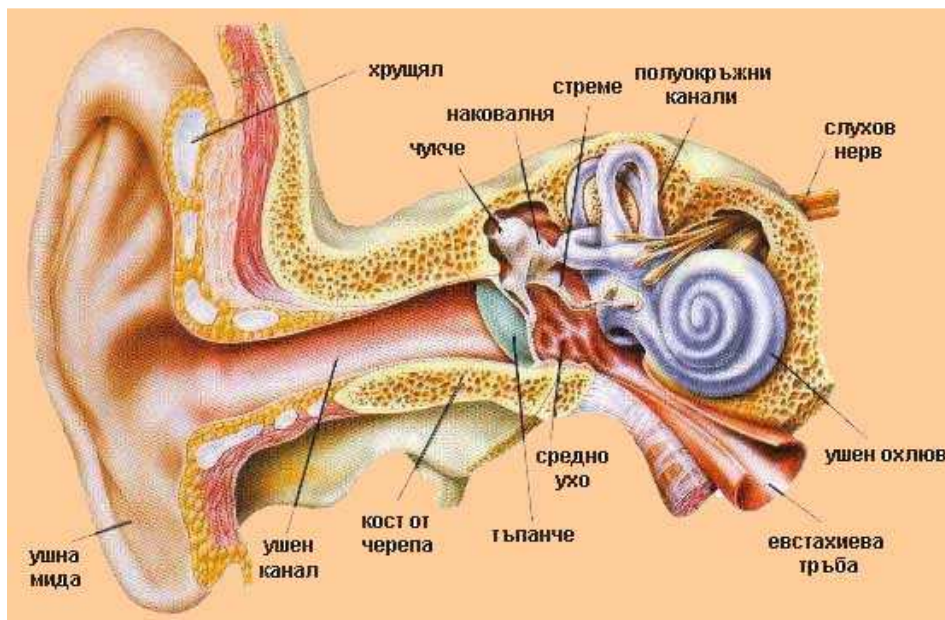
Спектрите на съгласните звукове и на сричките са по-сложни, защото те включват и непрекъснатите спектри на шумовете, произведени например при преминаването на въздуха между езика и зъбите.



Фиг. 15.8

4.4. Ухото като приемник на звук

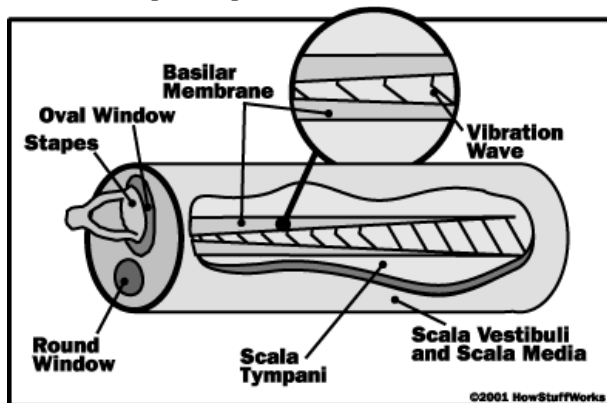
Устройството на слуховия орган на човека е показано схематично на фиг. 15.9.



Фиг. 15.9

Тъпанчевата мембрана и костниците на средното ухо – чукче, наковалня и стреме – предават с минимални загуби звуковата енергия, събрана от външното ухо, на течността, която запълва вътрешното ухо. Това предаване на звуковата енергия не може да стане непосредствено, защото звуковите вълни се отразяват от границата въздух-течност и почти не проникват в течността. При водните животни звукът се предава от течност в течност, затова средното ухо липсва или е недоразвито. Тъпанчевата мембрана ма неправилна форма и е неравномерно опъната в различните си части, поради което не може да извършва свободни трептения с характерни собствени честоти. Това е важно свойства на мембраната, защото в противен случай тя селективно би усилвала само трептенията, чиито честоти съвпадат със собствените ѝ честоти на трептене. На стената, която отделя средното ухо от вътрешното ухо, има две прозорчета: овално прозорче и свободно кръгло прозорче, преградени с еластични мембрани. Чукчето е свързано към тъпанчевата мембрана, а стремето се допира до мембраната на овалното прозорче. Тъй като площта на стремето е около 20 пъти по-малка от площта на тъпанчевата мембрана, системата от частици действа подобно на хидравлична преса и увеличава налягането върху овалното прозорче около 20 пъти в сравнение със звуковото налягане. Двата мускула на средното ухо контролират амплитудата на движение на костниците и предпазват чувствителното вътрешно ухо от повреждане. Когато звукът е с голям интензитет, единият мускул опъва тъпанчевата тръба и намалява амплитудата ѝ на трептене, а вторият мускул ограничава движението на стремето.

Костният канал на охлюва на вътрешното ухо е разделен на три камери: горна (scala vestibuli), средна (ductus cochlearis) и долна (scala tympani). За нагледност на фиг. 15.10 охлювът е показан в разгърнат вид.



Фиг. 15.10

Горната и долната камера са съединени във върха на охлюва с отвор (хеликотрема) и са запълнени с течност, наречена перилимфа. Средната камера е изолирана от тях и е запълнена с друга течност – ендолимфа. Долната и средна камера са разделени от плътна и еластична ципа, наречена основна (базиларна) мембрана. Горната и средна

камера се разделят от тънката и мека вестибуларна мембрана, която не оказва влияние на разпространението на трептенията в течностите. Затова можем да смятаме, че течностите на горната и средната камера образуват общ канал, който започва от овалното прозорче и чрез хеликотремата се свързва с канала на долната камера, завършващ при свободното кръгло прозорче. Пластичната мембрана на кръглото прозорче способства за възбуждане на трептения в течността. Под действието на стремето мембраната на овалното прозорче извършва трептения, които се разпространяват по перилимфата и ендолимфата на горната и средната камера, задвижват основната мембрана и чрез нея се предават на перилимфата на долната камера. Трептенията се предават на перилимфата на долната камера също през отвора, свързващ долната и горната камера. Този механизъм преобладава при ниски честоти, когато дължината на вълната на звука е много по-голяма от дължината на стълба течност. Тогава течността се движи като едно цяло, подобно на „течна тапа“, свързваща двете прозорчета: когато мембраната на овалното прозорче се придвижва навътре към вътрешното ухо, мембраната на свободното прозорче се отклонява навън към средното ухо и обратно. Рецепторните клетки се намират в средната камера, върху основната мембрана. Чрез тях механичните трептения се преобразуват в електрични сигнали, които възбуждат влакната на слуховия нерв.

Експериментално е установено, че звуковите трептения с ниска честота обхващат цялата течност на камерите на охлюва и възбуждат рецепторните клетки по цялата дължина на основната мембрана. При високите честоти в трептенията участват само части от течността и от основната мембрана, разположени близо до овалното прозорче. Колкото по-висока е честотата, толкова по-къс е стълбът течност, който трепти, и толкова по-малка част от основната мембрана участва в трептенията. Следователно с увеличаване на честотата все по-малка част от рецепторните клетки се възбуждат и те са разположени все по-близо до овалното прозорче. Различното положение и нееднакъв брой на възбуждащите се клетки дава възможност ухото да различава звуковете по тяхната честота.

4.5. Локализиране на източника на звук

Възприемането на звука едновременно с двете уши дава възможност доста точно да се определи посоката, от която той идва. Всеки страничен звуков импулс постъпва в едното ухо малко по-рано, отколкото в другото. По разликата във времето е възможно да се определи посоката, от която идва импулсът.

Други механизми за локализация се основават на разликата в звуковото налягане в двете уши. Човешката глава с приближение може да се разглежда като сфера с диаметър около 20 cm. На звукова вълна във въздуха с дължина $\lambda=20$ cm съответства честота $\nu=1700$ Hz. Звукови вълни с по-голяма дължина на вълната преминават покрай главата без съществено отклонение и изменение. Ако в даден

момент налягането на бягащата звукова вълна при едното ухо има максимум, при другото ухо, разположено на разстояние $x < \lambda$, налягането е по-ниско. Нервните импулси от двете уши съдържат информация за разликата в налягането, която мозъкът използва за локализиране на източника. Този механизъм на локализация е най-ефективен за звукове с честота под 1000 Hz.

Звуковите вълни с високи честоти (над 5000 Hz), чиито дължини на вълната са много по-малки от диаметъра на главата, ефективно се отразяват от нея. Ухото, разположено по-далеч от източника, се намира в „сянката“ на главата, където вълните проникват само частично и налягането на звука е по-ниско. Между 1000 Hz и 5000 Hz се използват и двата механизма, но определянето на положението на източника е по-неточно.

Любопитно е да се отбележи, че диапазонът на чуване при бозайниците зависи от разстоянието между двете уши. При едрите животни, където разстоянието между ушите е голямо, диапазонът на чуване е изместен към ниските честоти. Те по-добре от човека възприемат ниските честоти и по-лошо – високите честоти. Например слоновете не чуват звуковете с честоти над 10000 Hz. Обратното се наблюдава при дребните животни, които по-добре възприемат високите честоти. Кучетата например чуват до 44000 Hz, а плъховете – до 72000 Hz.

5. Ултразвук и инфразвук

5.1. Източници и приемници на ултразвук

Механични вълни с честота, по-голяма от горната граница на чуване (т.е. в интервала $20 \text{ kHz} < \nu < 1 \text{ GHz}$), се наричат ултразвук.

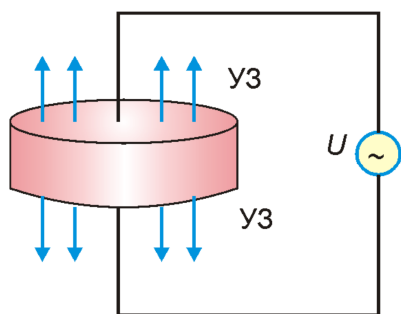
Физичните свойства и действие на ултразвука се определят от високата му честота, при която частиците придобиват значителна кинетична енергия. Тъй като скоростта на разпространение на ултразвука в една среда е същата, както и за звук от областта на чуване, то при високи честоти неговата дължина на вълната е няколко порядъка по-малка от тази на звука. Така например във вода звук с честотата $\nu = 1 \text{ kHz}$ има дължина $\lambda = 1.4 \text{ m}$. Ултразвук с честота $\nu = 1 \text{ MHz}$ има дължина $\lambda = 1.4 \text{ mm}$, а ултразвук с честота $\nu = 1 \text{ GHz}$ има дължина $\lambda = 1.4 \text{ }\mu\text{m}$.

Механични вълни с много висока честота ($\nu \sim 10^9 \div 10^{13} \text{ Hz}$) се наричат хиперзвук.

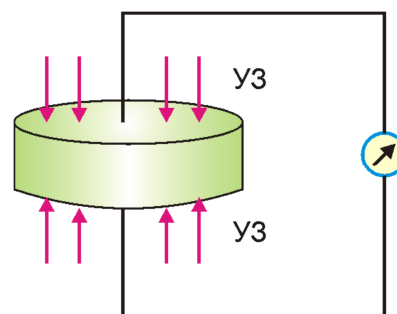
В голяма част от източниците и приемниците на ултразвук се използва пиезоелектричният ефект, който се наблюдава в някои кристали и поликристални вещества. При деформация (свиване или разтягане) на изрязана по подходящ начин пластинка от пиезокристал на противоположните ѝ страни възникват разноименни електрични заряди. Между стените се създава електрично напрежение. Когато свиването се смени с разтягане, знакът на зарядите върху стените се сменя.

Наблюдава се и обратен пиезоелектричен ефект- пластинката се деформира при прилагане на външно електрично напрежение. Ако напрежението се изменя периодично с честота ν , пластинката започва да трепти със същата честота.

На фиг. 15.11а е представен *пиезоелектричен генератор на ултразвук*. Той се състои от излъчвател (преобразувател) и източник на високочестотно синусово напрежение.



Фиг. 15.11а



Фиг. 15.11б

Излъчвателят е кварцова пластинка, изрязана по определен начин спрямо кристалографските оси на монокристала. От източника се подава напрежение на две от срещуположните метализирани стени на пластинката. Под действие на това напрежение се извършват периодични промени в дебелината на пластинката, които привеждат околната среда в механично трептене с честота, равна на честотата на напрежението. Получените ултразвукови трептения имат максимална амплитуда при **резонанс**, като честотата им е равна на собствената честота на трептене на пластинката.

Генераторът на ултразвук се използва и за детектор (приемник). Тогава попадналия върху кварцовата пластинка ултразвуков сигнал се преобразува с променлив електричен сигнал, който се регистрира с подходящ уред. (фиг. 15.11б).

Ултразвук може да се получи и с *магнитострикция*, която представлява изменение на формата и размерите на някои феромагнитни вещества при намагнитването им в променливо магнитно поле.

Магнитострикционният генератор действа на същия принцип, но вместо кварцов кристал се използва феромагнетик, а вместо електрично поле – променливо магнитно поле, създадено в намотка с променлив ток. С магнитострикционния генератор се получава ултразвук с честота до 150 kHz, докато с пиезоелектричния - до 10 GHz.

5.2. Приложения на ултразвука

Ултразвукът слабо се поглъща от водата и се използва за подводна сигнализация, за откриване на предмети под водата и за изследване на релефа на морското дъно.

А) Ултразвукова локация. Принципът на действие на ултразвуковия локатор се основава на отражение на звуковите вълни. Излъченият ултразвуков сигнал достига до търсения обект, отразява се от него и попада в приемника. Като се знае времето за отиване и за връщане на сигнала, се определя разстоянието до обекта.

Много животни (като например прилепите) използват ултразвуковата локация за да се ориентират в пространството при движение и търсене на храна. Техният гласов орган генерира ултразвукови импулси с продължителност от 1 до 15 ms и с честота между 20 и 100 kHz. Ултразвукови сигнали използват също така делфините, някои видове птици и др.

Б) Ултразвукова дефектоскопия. Чрез този метод се осъществява безразрушителен контрол на множество структури.

В) Ултразвукова диагностика в медицината. Ултразвуковата ехография се базира на отражението и пречупването на ултразвуковите вълни при преминаване през границите на две среди. Тя представлява един от основните методи на образна диагностика. Ехографията превъзхожда рентгеновата диагностика с по-добър контраст между меките тъкани, като в същото време е по-безопасна от нея.

Г) Ултразвукова литотрипсия. При нея се използва разрушителното действие на ултразвук с голям интензитет.

Д) Кавитационно почистване. Основава се на явлението **кавитация**. То представлява нарушаване на непрекъснатия строеж на течностите и образуването на микрокухини (мехурчета) в местата с понижено налягане. Мехурчетата се изпълват с пари на течността и разтворени в нея газове. Те пулсират, като се разширяват и свиват. Максималното налягане в едно мехурче може да достигне до няколко GPa. Бързата промяна в обема на мехурчето води до нагряване на парите и газовете в него до температури от порядъка на 4^{10} K. Това предизвиква светене на мехурчетата (**звуколуминисценция**). Ако в течността има твърдо тяло, при тези условия неговата повърхност се разрушава (извършва се кавитационна ерозия). В специални ултразвукови вани кавитацията се използва за почистване на различни повърхности. Кавитационното почистване има и това предимство, че се унищожават различните видове микроорганизми и се постига стерилизация. Освен това кавитацията се използва за фино диспергиране на течни ли твърди вещества в течни или газови среди. Така се приготвят стабилни суспензии и емулсии и много фини аерозоли.

5.3. Инфразвук

Механични вълни с честота под долната граница на чуване ($n < 16$ Hz) се нарича инфразвук.

Естествени източници на инфразвук са изригващите вулкани, земетресенията, морските вълни и др. Инфразвук се получава и от човешки дейности като взривове, оръдейни изстрели, реактивни двигатели. Установено е, че инфразвук с голямо ниво на интензитета (над 120 dB) оказва вредно въздействие върху човешкия организъм.

Поради ниската си честота инфразвуковите вълни много слабо се поглъщат и отразяват от атмосферата, водата и земната кора. Всички звукоизолиращи материали губят своята ефективност и не представляват преграда за инфразвука. Например при изригване на вулкан инфразвукът многократно обхожда земното кълбо. Свойствата на инфразвуковите вълни да се реупространяват на големи разстояния намират редица приложения.

6. Ефект на Доплер. Ударни вълни

Промяната на честотата на звука, който се възприема от наблюдателя, когато източникът и приемникът на звука се движат един спрямо друг се нарича ефект на Доплер.

Когато източникът се приближава към приемника, за 1 s приемникът регистрира повече гребени на вълната, отколкото е излъчил източника за същото време т.е. честотата на приетия сигнал е по-голяма от честотата на излъчвания. Обратно, когато източникът се отдалечава, за 1 s до приемника достигат по-малко гребени на вълната, отколкото са излъчени за същото време. Това означава, че регистрираната от приемника вълна има по-малка честота от честотата, с която трепти източника. По подобен начин се изменя честотата, когато се движи приемникът, а източникът е неподвижен.

6.1. Движение на приемника

Нека източникът на звук е неподвижен спрямо средата (въздуха), в която се разпространяват звуковите вълни ($v_n=0$). Той излъчва вълни с честота ν_0 , дължина на вълната λ_0 и скорост u . За време t източникът излъчва $N_0=\nu_0 t$ вълнови фронта (гребени). Ако наблюдателят (приемникът) е неподвижен за същото време t той ще регистрира същия брой N_0 вълнови фронта. При приближаване на наблюдателя към източника със скорост v_n (фиг. 15.12), за време t той изминава разстояние $s=v_n t$ и пресича допълнително още $\Delta N=s/\lambda_0=v_n t/\lambda_0$ вълнови фронта. Поради това за време t до него достигат общо

$$N = N_0 + \Delta N = \nu_0 t + \frac{v_n t}{\lambda_0}$$

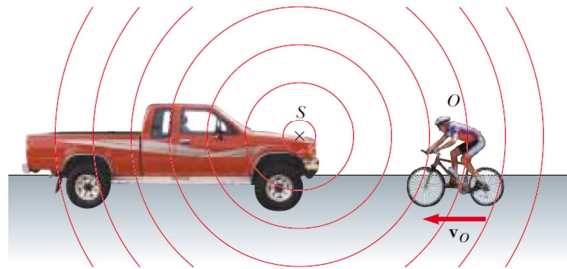
вълнови фронта. Следователно честотата ν на звука, който чува наблюдателят, нараства

$$\nu = \frac{N}{t} = \nu_0 + \frac{v_{\text{п}}}{\lambda_0}$$

Заместваме $\lambda_0 = u/\nu_0$ и получаваме

$$\nu = \nu_0 \left(1 + \frac{v_{\text{п}}}{u}\right)$$

15.18



Фиг. 15.12

Ако наблюдателят (приемникът) се отдалечава от източника, за време t до него ще достигнат с $\Delta N = s/\lambda_0 = v_{\text{п}}t/\lambda_0$ по-малко вълнови фронта, отколкото ако е неподвижен. Затова той ще чува звук с по-ниска честота ν . По аналогичен начин в този случай се получава:

$$\nu = \nu_0 \left(1 - \frac{v_{\text{п}}}{u}\right)$$

15.19

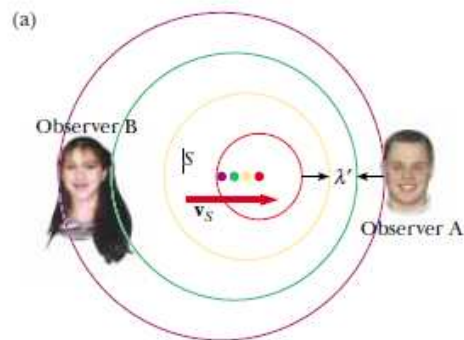
6.2. Движение на източника

Когато източникът на вълни извършва хармонични трептения с честота ν_0 и период $T_0 = 1/\nu_0$, той излъчва вълнови фронтове през интервали T_0 . Ако източникът е неподвижен спрямо въздуха, вълновият фронт, излъчен в даден момент t , се движи със скорост u спрямо въздуха и се отдалечава от неподвижния източник. В момента $t+T_0$, в който се излъчва следващия вълнов фронт, предишният се е отдалечил на разстояние $\lambda_0 = uT_0$ от източника. Следователно разстоянието между два съседни вълнови фронта (дължината на вълната) при неподвижен източник е λ_0 . Ако източникът се приближава със скорост $v_{\text{и}}$ към неподвижния наблюдател (фиг. 15.13), за време T_0 той изминава разстояние $s = v_{\text{и}} T_0$ в неподвижния въздух. За същото време вълновият фронт, излъчен в момента t , изминава разстояние $\lambda_0 = uT_0$ спрямо въздуха. Тъй като източникът „догонва“ вълновия фронт, разстоянието между тях намалява и в момента $t+T_0$, в който се излъчва следващият вълнов фронт, то е

$$\lambda = \lambda_0 - s = (u - v_{\text{и}})T_0 = \frac{u - v_{\text{и}}}{v_0}$$

Следователно вълновите фронтове пред източника се сгъстяват и наблюдателят А чува звук с по-малка дължина на вълната λ . Тъй като $v = u/\lambda$, за наблюдателя А честотата ν на звука нараства

$$\nu = \frac{u}{\lambda} = \frac{v_0 u}{u - v_{\text{и}}} = \frac{v_0}{1 - \frac{v_{\text{и}}}{u}} \quad 15.20$$



Фиг. 15.13

Зад източника разстоянието между вълновите фронтове нараства (фиг. 15.13). Неподвижният наблюдател В, от когото източникът се отдалечава със скорост $v_{\text{и}}$, регистрира звук с по-голяма дължина на вълната и с по-малка честота, която се изразява с формулата

$$\nu = \frac{v_0}{1 + \frac{v_{\text{и}}}{u}} \quad 15.21$$

6.3. Двоен ефект на Доплер

Неподвижен източник, например трептяща кварцова пластинка, излъчва вълнов импулс с честота ν_0 . Импулсът се отразява от обект, който се отдалечава от източника, след което се разпространява в обратната посока. Отраженият сигнал попада обратно върху кварцовата пластинка, която след излъчването е преминала в режим на работа като приемник. Каква честота на отразената вълна ще регистрира приемникът? Да разгледаме движещият се обект отначало като приемник, а след това като източник на механични вълни. Поради ефекта на Доплер върху движещия се обект попада вълна с по-ниска честота $\nu_1 = \nu_0(1 - v_{\text{и}}/u)$. Това означава, че падащата вълна възбужда в обекта трептения с честота ν_1 и той става източник на отразена вълна със същата честота. Но отразената вълна е излъчена от отдалечаващ

се източник и отново поради ефекта на Доплер кварцовата пластинка ще регистрира вълна с по-ниска честота ν_2

$$\nu = \frac{\nu_1}{1 + v/u} = \frac{\nu_0(1 - v/u)}{1 + v/u}$$

15.22

При отражение на механична вълна от движещ се обект ефектът на Доплер трябва да се отчете два пъти, поради което изменението на честотата на отразената вълна се нарича двоен ефект на Доплер. Двойният ефект на Доплер намира редица практически приложения. Използва се, например, за определяне на скоростта на кръвта в кръвоносните съдове. От едната страна на кръвоносния съд се поставя източник, а от другата – приемник на ултразвук. Ултразвуковата вълна се отразява от червените кръвни телца и се регистрира от приемника. Скоростта на кръвта се определя по изменението на честотата на отразената вълна.