

ЕЛЕКТРОАКУСТИКА

1. УВОД

1.1. Предмет и задачи на дисциплината "Електроакустика"

Акустиката е наука за звука и колебанията на твърдите, течни и газообразни вещества, а електроакустиката изучава методите и техническите средства за превръщане на тези колебания в електрически сигнали и обратно – превръщането на електрически колебания в механични и от тях – в звукови вълни.

1.2. Кратък исторически преглед.

Акустиката е възникнала още в зората на човешката история вследствие на интереса на хората към музиката. Първоначалните познания в тази област са имали чисто империчен, а често дори и мистичен характер. Например, китайският философ Фохи, живял около 3000 години преди новата ера се е опитвал да намери връзка между височината на тона и петте елемента – земя, вода, въздух, огън и вятър. Въобще, понятията на древните източни народи като китайци, индуси и араби в областта на музиката и акустиката значително са се отличавали от съвременните – индусите в своите музикално – теоретични трудове "Морето на звуците" и "Огледало на музиката" разделят октавата на 22 тонални промеждутъка, а арабите разделят октавата на 17 тона.

За първи път в музикалните теории на древните гърци се появяват много елементи, приближаващи се до съвременните теории. Питагор Самоски, повече познат като математик, допълнил тоналната скала на орфеевата лира, която съдържала само до-фа-сол-до, до пълната диатонична гама до-ре-ми-фа-сол-ла-си-до. Пак той е открил връзката между дължината на струната или тръбата на музикалния инструмент и височината на тона, а Квинталион доказал с помощта на сламка наличието на резонанс на струната.

Първите сведения за физическата природа на звука се отнасят за V век. Учените Архелой и Зенон, които принадлежат към различни философски школи, са смятали, че звукът е процес на свиване и разреждане на въздуха. Най-точна формулировка намираме

във втората книга на "Физика" на Хрисип: "Чуването става защото въздухът между слушателите и звучащия предмет се колебае кръгообразно, а след това се разпространява като вълни и достига ухото подобно на водата във водоема, която се раздвижва във вид на кръгови вълни около хвърления камък". Витрувий също е привел използваният и до днес пример с водните кръгове за нагледна илюстрация на разпространението на звука, като при това е изтъквал, че за разлика от повърхностните вълни във водата, при звука това разпространение става във вид на пространствени т.е. сферични вълни.

Древните гърци са познавали в общи черти и законите за разпространение и отражение на звука. За това може да се съди от архитектурата на античните театри.

Античните артисти са използвали рупорът за усилване на говора, а според описанията Александър Македонски е използвал за събиране на войската си рог, който се е чувал на 18 километра.

Развитието на акустиката, както впрочем и на всички естествени науки е било задържано от Аристотел, който смятал, че експеримента е недостойно занимание за един учен. Вследствие на това негово виждане и влиянието му върху средновековните учени, естествените науки започват да се развиват отново чак през седемнадесети век.

Развитието на акустиката като физическа наука може да се раздели на три периода:

Първият период обхваща годините от началото на седемнадесети до началото на осемнадесети век. Той се характеризира с изследване на системата от музикални тонове и техните източници – струни и тръби. Тогава станала известна връзката

между височината на тона и броя колебания за единица време, което се споменава едновременно в "Диалозите" на Галилей и в "Книга за хармонията" на Мърсен. Последният освен това за пръв път определил скоростта на звука по броя удари на пулса между блясъка на изстрела и възприемането на звука, като въпреки примитивните средства е получил твърде точни резултати. Пак той определил, че скоростта на звука не зависи от височината на тона, като измервал скоростта на звука от изстрел с пушка и оръдие. През 1678 г. Хук формирал своя знаменит закон за пропорционалността между силата и деформацията, с което създаде основата за развитие на учението за звука, а Хюйгенс формулирал принципите на вълновото движение.

През седемнадесети век се очертава един стремеж на хората към развлеченията и увлечение по необичайното и вълшебното.

Забележителна работа на Кирхер "Фонургия – новото изкуство на отгласите и звуците" се занимава почти изключително с явленията ехо и шепнещи сводове. В същата книга авторът убедително препоръчва сериозната музика като средство за лечение на ухапване от тарантул. Впрочем някои хора по това време наистина са смятали, че в затворена кутия вследствие на големия път при многократно ехо, звукът може да се запази дълго време.

Вторият период, започващ от началото на осемнадесети век се характеризира с това, че акустиката се развива като дял от механиката. Тогава се създава общата теория на механичните колебания, излъчването и разпространението на звуковите вълни. Разработват се методи за измерване на характеристиките на звука. Изяснява се физическата същност на тембъра.

Учените Ойлер, Бернули, Д'Аламбер и Лагранж разработват теорията на колебанието на струни, прътове и пластини и обясняват произхода на обертоновете.

За основател на експерименталната акустика може да се смята немският учен Хладни (1756 – 1827), чието знаменито ръководство "Акустика" се появява през 1802 г. В него се изследва експериментално характера на колебанията на различни звучащи тела-мембрана, пластина и камбана. Това е ставало с помощта на така наречените "пясъчни фигури на Хладни" – при посипването на вибрираща повърхност със сух ситен пясък, той се изтласква от зоните, където амплитудата на вибрациите е максимална и се натрупва в зоните с минимална амплитуда на вибрациите, като по този начин те стават "видими".

Юнг (Англия) и Френел (Франция) развиват представата на Хюйгенс за разпространението на вълните и създават теорията на интерференцията и дифракцията. Доплер (Австрия) открива закона за изменение на честотата на звука при взаимно движение на излъчвателя и приемника.

През този период Фурие създава математическия метод за разлагане на периодичните процеси на синусоидални хармоници. На базата на това Хелмхолц експериментално анализира звука с помощта на резонатори. Използвайки камертони и резонатори, Хелмхолц успява да възпроизведе различни гласни. Пак той е създаде първата физическа теория на ухото като слухов апарат.

Свой принос в акустиката са дали Вебер, Лайбниц, Симон, Ом, а Релей обобщава целия този етап в своя класически труд "Теория на звука".

На границата между 19-ти и 20-ти век американският учен У.Себин заложил основите на архитектурната акустика. Той открил закона, свързващ времето на реверберация (послезвучане) в помещението със звукопоглъщането, и за това единицата мярка за звукопоглъщане е наречена с неговото име.

През месец юли 1861 г. във Франкфуртското физическо общество Филип Рейс осъществява за пръв път предаване на говор по първообраза на телефона, като по този начин поставя началото на третият етап в развитието на акустиката-етапа на електроакустиката. Предложените от него микрофон и слушалка след това били усъвършенствани от Бел (слушалката) и Юз, който предложил въгленовия микрофон, използван и до сега в повечето телефонни апарати. През 1917 г. Венте изобретява кондензаторния микрофон, а през 1924 г. се появява разработения от Шотки и Герлах лентов микрофон. Широко използваният в момента динамичен микрофон е предложен от Венте и Терас през 1931 г.

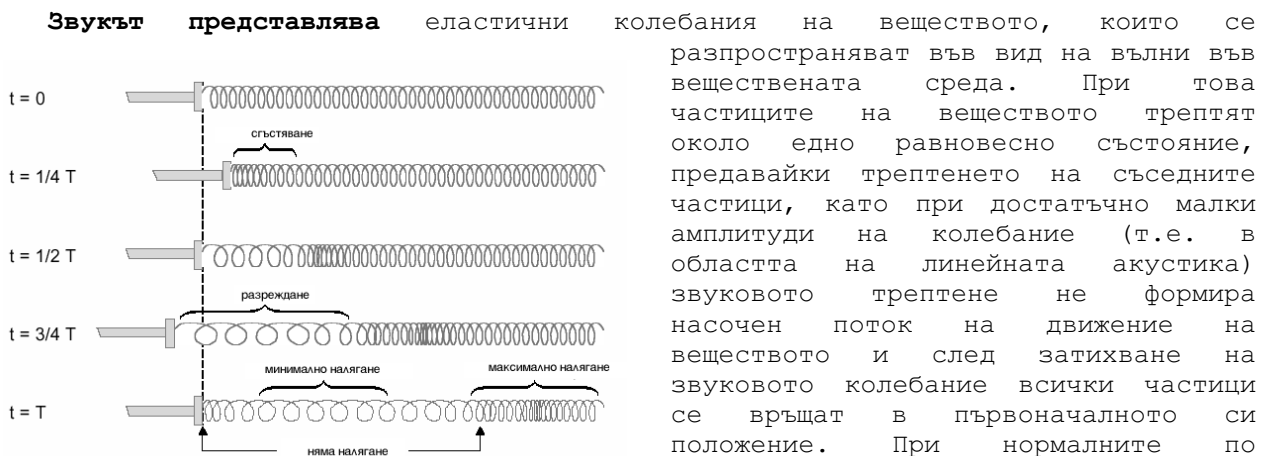
Електродинамичният високоговорител във вида, в който се използва днес е предложен от Гейс и Келог от фирмата Дженерал Електрик.

Развитието на електроакустиката продължава и в наши дни и все още се очакват новите открития, които биха извели електроакустичните преобразуватели и главно излъчвателите на нивото на качествените показатели на съвременната звукозаписна и усилвателна апаратура.

2. ФИЗИЧЕСКА АКУСТИКА

2.1. ЗВУК И ЗВУКОВИ ВЪЛНИ.

2.1.1. Физическа същност на звука и звуковите вълни. Видове звук.



Фиг.2.1

Разпространението на трептенето в пространството се нарича **звукова вълна**, а областта от пространството, в която се разпространяват звукови вълни се нарича **звуково поле**. Приема се, че в едно звуково поле, при изпълнено условие за достатъчно малка амплитуда на колебанието, се спазва *принципът на суперпозицията*, който гласи, че в едно звуково поле звуковите вълни, създавани от различни източници са независими и не си влияят едни на други.

Броят колебания за единица време се нарича **честота на звука**. Тя може да бъде от части от херца до 10^{13} херца. Горната граница на честотата на звука се обуславя от разстоянието между частиците на веществото и е достижима само при разпространение в твърди тела, защото при толкова високи честоти амплитудата на колебание става сравнима с разстоянието между молекулите, а ако при своето колебание молекулата не достигне да съседната, то тя не може да предаде енергията на колебанието и звукът не се предава по нататък т.е. затихва.

Звукът може да се раздели на видове по различни признаци, като честотата, спектрален състав и др. **Честотно** звукът се разделя на следните поддиапазони:

- **Инфразвук** - трептене с честота по-ниска от долната гранична честота на слуха, която е 16 до 20 херца. Тези колебания не се възприемат от слуховия апарат на човека и не предизвикват звуково усещане, но влияят на човешкия организъм, като при достатъчна интензивност определени честоти предизвикват главоболие, виене на свят, чувство за безпричинна паника и др. Инфразвукови колебания се

излъчват при земетресения, по време на морска буря, вследствие на работата на някои вентилационни устройства и др. Почти винаги те са вредни

- **Чуваем звук** - това е звукът с честота от 16 - 20 херца до 16 - 20 килохерца. Този честотен диапазон се обуславя от физиологичните особености на човешкото ухо и болшинството от хората свързват представата си за звук само с него, защото само той предизвиква слухово усещане. Горната и долна гранични честоти за отделните хора силно варират в зависимост от индивидуалните особености на конкретния човек, здравословното му състояние и възрастта. В по-нататъшното изложение ще се занимаваме главно с този вид звук.

- **Ултразвук** - това е трептене с честота над 15 - 20 килохерца. Той не предизвиква слухово усещане, но при високи интензивността може да има неблагоприятно влияние върху човешкия организъм. От своя страна ултразвук се разделя на под диапазони както следва:

Ниски ултразвукови честоти - от 15 килохерца до 10^5 херца. Този вид ултразвук се разпространява сравнително добре във въздушна среда и много добре в течности и твърди тела. Ултразвуковите колебания от този честотен диапазон се използват главно за целите на измерване на разстояния и параметри на средата във въздух и други газове, както и за целите на ултразвуковата технология-пробиване и рязане с помощта на ултразвук, ултразвуково почистване на детайли, ултразвукова заварка и спояване, ултразвуково диспергиране и коагулация, приложения в хранително-вкусовата промишленост и много, много други.

Средни ултразвукови честоти от - 10^5 до 10^7 херца. Практически ултразвукът с тази честота не се разпространява в газове, но добре се разпространява в течности и твърди тела. Използува се главно в хидроакустиката- за измерване на дълбочината на водни басейни, за хидролокация, в медицинската диагностика при ехографите, във физиотерапията и др. .

Високи ултразвукови честоти от - 10^7 до 10^9 херца. Ултразвукът с тези честоти слабо се разпространява в течности, но се разпространява добре в твърди тела. Използува се главно в дефектоскопията - за изследване на структурата на твърди тела и търсене на скрити дефекти в тях, а също така и в акусто-електрониката при приборите на повърхностни акустични вълни, закъснителни линии и други устройства.

Хиперзвукови честоти - от 10^9 до 10^{13} - не се разпространява в течности, съществува при определени условия само в твърди тела с кристална структура.

В зависимост от **спектралния състав** звукът може да бъде:

- **Чист звук** (тон) - звук, създаван от синусоидално акустично трептене.
- **Сложен** (съставен) **звук** - звук, създаван от два или повече чисти звука.
- **Виещ звук** (виещ тон) - звук, чиято честота се изменя периодично около една средна стойност по определен закон. Използува се главно в акустичните измервания

- **Шум** - непостоянно, статистически случайно акустично трептене.

Шумът от своя страна бива:

- **Случаен шум** - акустично трептене, дължащо се на съвкупността от голям брой елементарни трептения, случайно разпределени във времето.

- **Бял шум** - шум, чиято спектрална плътност на енергията не зависи от честотата. Звуковото налягане на този вид шум се увеличава с 3 dB на октава.

Розов шум - шум, чиято спектрална плътност на енергията е обратно пропорционална на честотата, и се понижава с постоянна стръмност 3 децибела на октава. Звуковото налягане остава статистически постоянно с честотата.

2.2. ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ЗВУКА И ЗВУКОВОТО ПОЛЕ.

А. Линеини характеристики на звуковото поле.

Една от важните характеристики на средата, в която се разпространяват звуковите вълни е **статичното налягане** – това е налягането, което съществува в разглежданата точка, когато нямаме звукова вълна. Еластичните колебания на средата, които представляват звука, предизвикват промяна на налягането в точката около статичното в определени граници, зависещи от силата на звука.

Звуковото налягане, и по-точно неговата моментна стойност в дадена точка е алгебричната разлика между общото налягане в разглеждания момент и статичното налягане. Прието е звуковото налягане да се обозначава с буквата **p**.

Съгласно системата измервателни единици СИ звуковото налягане се измерва в паскали (Pa), като един паскал е равен на един нютон на квадратен метър. В по-старата система ССІR звуковото налягане се измерва в микробари (μb), като връзката между двете единици е:

$$1\text{Pa} = 10\ \mu\text{b} \quad (2.1)$$

Обикновено се работи с така наречената **ефективна стойност** на звуковото налягане, която се дефинира като *корен квадратен от средната стойност на квадрата на моментната стойност на звуковото налягане в дадена точка от пространството за съответния интервал от време*. Ако звуковото налягане се изменя по периодичен закон, интервалът на усредняване трябва да бъде равен на цяло число периоди. За синусоидална звукова вълна, ефективната стойност на звуковото налягане е:

$$p_{\text{эф.}} = \frac{p_0}{\sqrt{2}} \quad (2.2)$$

където p_0 е амплитудата на звуковото налягане.

Друга важна характеристика на звука е **фазата** на звуковото налягане, която се дефинира като стадий на изменение на налягането в разглежданата точка в сравнение с което и да е налягане, прието за начално. Измерва се в радиани или градуси.

Амплитуда на преместване на частиците – това е разстоянието, на което се измества всяка частица под действието на преминаващата звукова вълна. Когато преместването е по посока на разпространение на звуковата вълна, се приема, че то е с положителен знак, а когато е срещу движението на вълната се приема, че то е с отрицателен знак. Амплитудата на преместване на частиците е право пропорционална на звуковото налягане и обратно пропорционална на честотата на колебание. За да се получи представа за порядъка на тази величина ще кажем, че при звуково налягане 5 Pa (110 dB), съответстващо на звука в залата при изпълнение на поп група, и за честота 1000 Hz, амплитудата на преместване е около $5 \cdot 10^{-6}\text{ m}$ или 5 микрона.

Колебателна скорост – представлява скоростта на движение на частиците под действието на преминаващата звукова вълна. И тук движението в посока на разпространение на звуковата вълна се приема за положително, а срещу посоката на разпространение – отрицателно. Колебателна скорост е прието да се означава с буквата **v**. Не трябва да се смесва колебателната скорост на частиците със скоростта на разпространение на звука, която е постоянна величина за дадена среда и при определени условия на разпространение, като температура, статично налягане, влажност и др., докато колебателната скорост зависи право пропорционално от звуковото налягане. За пример ще кажем, че за същото звуково налягане 110 dB колебателната скорост на частиците е 1,5 cm/sec

Фронт на звуковата вълна – дефинира се като повърхнина, която се получава от съединяването на всички съседни точки, които имат еднаква фаза на звуково налягане. Например, фронтът на звуковата вълна ще се получи, ако съединим всички съседни точки, в които в дадения момент звуковото налягане е равно на своята максимална стойност за целия период на колебание.

Скорост на звука (Фазова скорост) – това е скоростта, с която се разпространява фронта на звуковата вълна. Прието е да се означава с буквата **c**. За въздух скоростта на звука при нормално атмосферно налягане и температура 0°C е 331,7 метра за секунда. При температура 20°C, $c=343,7$ m/s. Зависимостта на скоростта на звука от температурата се дава от израза:

$$c=331,7+0,6.t \quad (2.3)$$

тук t е температурата в градуси по Целзий.

Акустичен импеданс – така се нарича отношението на звуковото налягане p към колебателната скорост на частиците v . Зависи от материала на средата на разпространение и от условията на разпространение на вълната. В общия случай акустичният импеданс е комплексна величина. Прието е да се означава с буквата **z**. Размерността му в система СИ е Pa. sec./m. Ако с **w** означим реалната част на акустичния импеданс, а с **q** – имагинерната му част, то фазовата разлика между p и v може да се определи по формулата:

$$\operatorname{tg}\psi=q/w \quad (2.4)$$

При **чистият звук** могат да бъдат дефинирани и следните понятия:

Период – най-малкият интервал от време, в края на който звуковото налягане има същата фаза, както в началото. Означава се с буквата **T**.

Честота – броя на периодите за единица време. Означава се с **f**.

Връзката между T и f се дава с формулата:

$$f=1/T \quad (2.5)$$

Дължина на звуковата вълна – разстоянието, което изминава разпространяващата се звукова вълна за един период. Означава се с λ , като:

$$\lambda = c.T = \frac{c}{f} \quad (2.6)$$

Б.Енергетични характеристики на звуковото поле.

Към енергетичните характеристики се причисляват:

Интензивност на звука (по-рано се е наричал сила на звука) – представлява количеството енергия, преминаващо за една секунда през единица площ, перпендикулярна на направлението на разпространение на вълната. Означава се с буквата **I**, а единицата за

интензивност на звука е W/m^2 (ват на квадратен метър). За синусоидални колебания:

$$I = p_{\text{еф.}} \cdot v_{\text{еф.}} \cdot \cos \varphi \quad (2.7)$$

Тук φ е фазовата разлика между звуковото налягане и скоростта на движение на частиците на средата под действието на преминаващата звукова вълна.

Плътност на енергията на звука ρ се нарича количеството звукова енергия, намираща се в единица обем. Означава се с буквата ϵ и се измерва в джаули на кубичен метър.

$$\epsilon = \frac{I}{c} = \frac{p_{\text{еф.}}}{c^2 \rho} \quad (2.8)$$

където ρ е относителната плътност на средата.

В.Други термини, свързани със звука и звуковото поле:

Хармоник (обертон) – чист звук с честота цяло число пъти по-висока от честотата на основната звукова вълна.

Субхармоник (унитон) – чист звук с честота цяло число пъти по-ниска от честотата на основната звукова вълна.

Тембър на звука - характерна окраска на сложен звук, която се определя от количеството и интензивността на хармониците.

Октава - честотно отстояние между две честоти f_{\min} и f_{\max} , което се определя от зависимостта:

$$f_{\max} / f_{\min} = 2 \quad (2.9)$$

или горната честота е два пъти по-голяма от долната. Броят на октавите n , съдържащи се между две честоти f_{\min} и f_{\max} , се определя по формулата:

$$\frac{f_{\max}}{f_{\min}} = 2^n \quad (2.10)$$

В електроакустиката се използва и $1/3$ от октавата или терца. Съотношението на честотите, които ограничават една терца е:

$$\frac{f_{\max}}{f_{\min}} = 2^{\frac{1}{3}} = 1,26 \quad (2.11)$$

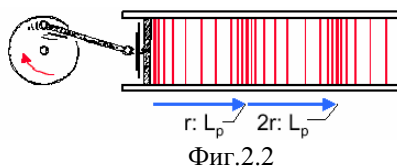
Има и международно стандартизирана поредица от честоти, отстоящи на една трета от октавата. Те са: 16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 200; 250 и т.н.

Честотен обхват - всички честоти, съдържащи се между две честоти, наречени граници на честотния обхват.

2.3. ВИДОВЕ ЗВУКОВИ ВЪЛНИ И ТЯХНОТО ОБРАЗУВАНЕ.

Звуковите вълни също могат да бъдат класифицирани по различни признаци. Един от тези признаци е формата на фронта им, който, както вече казахме е някаква повърхнина. В зависимост от формата на фронта, звуковите вълни биват плоски, сферични и цилиндрични.

Плоска звукова вълна (фиг.2.2)- характеризира се с това, че нейния фронт е равнина, която е перпендикулярна на посоката на разпространение. Плоска звукова вълна се получава при разпространение на звука в тръба. Поради ограничавашото действие на стените на тръбата, енергията в плоската вълна не се разсейва настрани и интензивността на звука практически не зависи от разстоянието, ако не се вземат пред вид загубите



Фиг.2.2

от звукопоглъщане, които ще разгледаме по-надолу. Амплитудата на звуковото налягане и на колебателната скорост също не зависят от разстоянието.

Общото решение на вълновото уравнение в случая на плоска вълна е :

$$p = \varphi_1 \left(t - \frac{x}{c} \right) + \varphi_2 \left(t + \frac{x}{c} \right) \quad (2.12)$$

където: c - скоростта на звука; t - време; x - текуща координата.

Физическият смисъл на първия член в израза от дясната страна представлява вълна, движеща се в положително направление, а вторият член - вълна, движеща се в отрицателно направление.

Типовото частно решение на вълновото уравнение за вълна, разпространяваща се в положително направление е:

$$p = p_m \cos(\omega t - kx) \quad (2.13)$$

тук p_m е амплитудата на звуковото налягане.

15

ω - кръгова честота на колебанията $\omega = 2\pi f$

k - вълново число; $k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$

Колебателната скорост съответно е:

$$v = v_m \cos(\omega t - kx) \quad (2.14)$$

Акустичният импеданс е чисто активен и е равен на:

$$z = \frac{p}{v} = \rho c \quad (2.15)$$

където ρ е плътност на средата, като за въздух $\rho = 1,29 \text{ kg/m}^3$

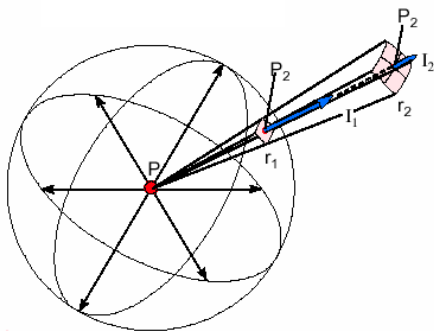
За въздух при температура 20°C и нормално налягане $\rho c = 413 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$

Вследствие на чисто активния акустичен импеданс не съществува фазова разлика между звуковото налягане и скоростта на движение на частиците. Колебателната скорост на частиците е

$$v = \frac{p}{\rho c}, \text{ а преместването им е } \xi = \frac{p}{\omega \rho c}$$

Интензивността на звука при плоска вълна е:

$$I = p_{\text{ef.}} \cdot v_{\text{ef.}} = \frac{p_{\text{ef.}}^2}{\rho c} \quad (2.16)$$



Фиг.2.3

Сферична вълна (фиг.2.3.) - Както се вижда от названието, нейният фронт представлява сфера, в чийто център се намира източникът на колебания, представляващ пулсираща сфера -фиг.2.1 (пулсираща е сфера, всички точки от чиято повърхност едновременно се придвижват по посока на радиуса на сферата периодически навън и навътре).

Общото решение на вълновото уравнение за сферична вълна има вида:

$$p = \frac{p_1}{r} \left[\varphi_1 \left(t - \frac{r}{c} \right) + \varphi_2 \left(t + \frac{r}{c} \right) \right] \quad (2.17)$$

И тук първият член съответствува на вълна, движеща се в положителна посока, а втория - на вълна, движеща се в отрицателна посока.

r - разстояние до центъра

p_1 - звуковото налягане на единица дължина разстояние от центъра.

При сферичната вълна пълната мощност на звука, излъчвана от звукоизточника не се изменя с отдалечаването от него, но се разпределя на все по-голяма площ, а част от нея се превръща в топлина. За това интензивността на звука с отдалечаването от звукоизточника намалява по квадратичен закон:

$$I_r = \frac{I_1}{r^2} \quad (2.18)$$

Където I_r е интензивността на единица разстояние от звукоизточника.

Отклонението от този закон в практиката се дължи на звукопоглъщането, вследствие на което, както вече казахме, част от енергията на звуковото колебание се превръща в топлина.

Знаем, че:

$$I = \frac{p^2}{\rho c} \quad (2.19)$$

Следователно, звуковото налягане на разстояние r от звукоизточника е:

$$p_r = \frac{1}{r} \sqrt{I_1 \rho c} = \frac{1}{r} p_1 \quad (2.20)$$

Типовото частно решение за вълна, разпространяваща се в положителна посока е:

$$p = \frac{p_m \cdot r_0}{r} \cos(\omega t - kr) \quad (2.21)$$

Тук p_m е амплитудата на звуковото налягане върху повърхността на пулсиращата сфера.

r_0 е радиусът на сферата

r разстоянието от центъра на сферата до точката, в която определяме звуковото налягане.

Както се вижда от горният израз, амплитудата на звуковото налягане е обратно пропорционална на разстоянието до центъра на излъчващата звуковата вълна пулсираща сфера.

Колебателната скорост за сферична вълна е:

$$v = \frac{\frac{p_m r_0}{r}}{\rho c \frac{k^2 r^2 + jkr}{1 + k^2 r^2}} \cos(\omega t - kr) \quad (2.22)$$

Както се вижда, амплитудата на колебателната скорост е сложна функция от разстоянието до центъра на пулсиращата сфера r . За да упростим израза, ще въведем понятията близко и далечно звуково поле. Под близко звуково поле ще разбираме пространството около пулсиращата сфера, за което е изпълнено условието:

$$kr = \frac{2\pi r}{\lambda} \ll 1 \quad \text{или} \quad r \ll \frac{\lambda}{2\pi} \quad (2.23)$$

Далечното звуково поле е пространството, за което е изпълнено условието:

$$r \gg \frac{\lambda}{2\pi} \quad (2.24)$$

При изпълнението на първото условие, за близкото звуково поле можем да пренебрегнем събираемото $k^2 r^2$. Тогава амплитудата на колебателната скорост ще намалява с квадрата на разстоянието r :

$$v_m = \frac{p_m r_0}{\rho c k} \cdot \frac{1}{r^2} \quad (2.25)$$

Тук имагинерната единица j е изпусната, защото тя се отнася до фазата, която ще разгледаме малко по-късно.

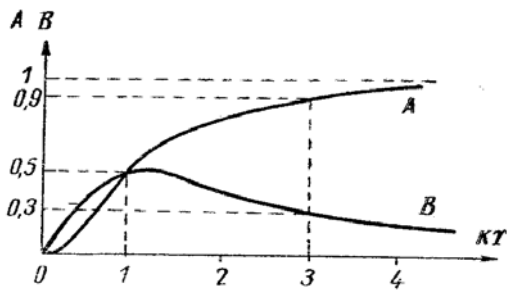
За далечното звуково поле, тъй като $1 \ll k^2 r^2 \gg kr$, могат да се пренебрегнат и единицата, и kr . Тогава амплитудата на колебателната скорост ще намалява пропорционално на първата степен на разстоянието и т.е. по същия закон, както и амплитудата на звуковото налягане, който за последното е еднакъв за близкото и далечно звуково поле:

$$v_m = \frac{p_m r_0}{\rho c} \cdot \frac{1}{r} \quad (2.26)$$

Характерното в случая е, че в далечното звуково поле звуковото налягане и скоростта на трептене са във фаза.

По определение акустичният импеданс е $z = p/v$ и от съответните изрази получаваме:

$$z = \frac{p}{v} = \rho c \left(\frac{k^2 r^2}{1 + k^2 r^2} + j \frac{kr}{1 + k^2 r^2} \right) \quad (2.27)$$

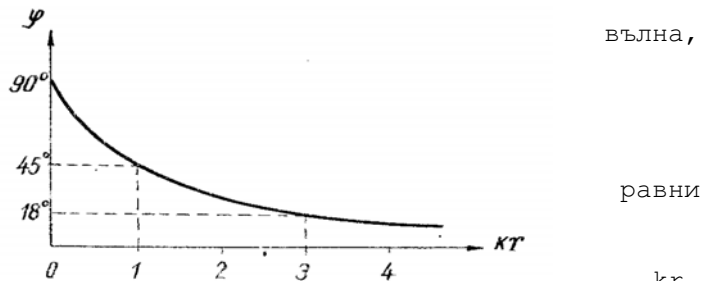


Фиг.2.4

От този израз се вижда, че акустичното съпротивление на средата за плоска и сферична вълни се различават само по израза в скобите, който е комплексно число, а това от своя страна доказва, че колебателната скорост и звуковото налягане са дефазирани. Изменението на активната част, означена с буквата А и на реактивната част, означена с В в зависимост от $kr = 2\pi \frac{r}{\lambda}$ е показано на фиг.2.4

От фигурата се вижда, че когато

разстоянието r е много по-малко от дължината на излъчваната звукова реактивното съпротивление преобладава над активното. При $kr=1$, което съответствува на $r = 0,16\lambda$ двата компонента се изравняват помежду си и са на половината от акустичния импеданс на плоска вълна. При по-нататъшно нарастване на аргумента което съответствува на увеличаване



Фиг.2.5

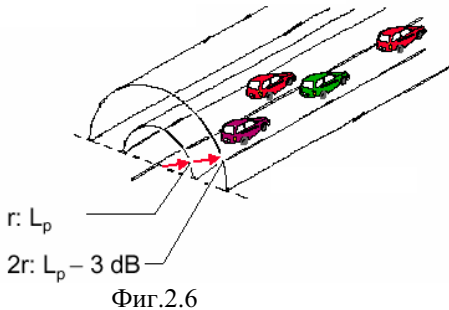
разстоянието, активната компонента постепенно клони към 1, а реактивната към нула, и акустичното съпротивление клони към стойността си за плоска звукова вълна - ρc .

Фазовият ъгъл на акустичния импеданс, който е равен на фазовата разлика между звуковото налягане и колебателната скорост е :

$$\text{tg}\varphi = \frac{1}{kr} \quad (2.28)$$

Изменението на фазовия ъгъл е дадено графично на фиг.2.5

Вижда се, че за разстояния, по-големи от една дължина на вълната, сферичната вълна може да се апроксимира с плоска, като разбира се, се държи сметка за различния закон за изменението на звуковото налягане от разстоянието.



Фиг.2.6

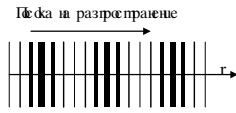
Цилиндрична вълна - фронтът и е кръгов цилиндър, чиято ос съвпада с оста на звукоизточника, а радиусите на цилиндъра - със звуковите лъчи (ако звукоизточника е безкрайно дълъг.)

Интензивността на звука в цилиндричната вълна се изменя в зависимост от разстоянието по закона $I_r = \frac{I_1}{r}$, а звуковото налягане по закона $p_r = \frac{p_1}{r}$, където I_1 и p_1 са съответно интензивността и звуковото налягане на единица разстояние от звукоизточника.

Цилиндрична вълна се получава при озвучаване на пространство с помощта на дълги праволинейни редици високоговорители.

В зависимост от **посоката на трептене на частиците** спрямо посоката на разпространение, звуковите вълни биват:

Надлъжни (фиг.2.7) – в течностите и газовете съществуват само такива вълни. При тях движението се извършва по посока на разпространение на вълната. Този вид вълни представляват последователно стъстяване и разреждане на частиците.



Фиг.2.7

-Напречни – съществуват само в твърди тела. При тях движението на частиците е перпендикулярно на посоката на движение на вълната.

-Вълни на огъване – съществуват само в пластини или прътове. Този вид вълни в зависимост от взаимното движение на пластове на материала биват такива с приплъзване на пластове и с ветрилообразно

разместване

- **Повърхностни** (ПАВ) – съществуват на границата на твърдо тяло с газ, вакуум или друго твърдо тяло, като амплитудата им намалява експоненциално с отдалечаването от разделителната повърхност. ПАВ биват с вертикална поляризация (от Релеев тип), като при тях движението е перпендикулярно на повърхността, а частиците се движат по елипса (аналог на морските вълни), и с хоризонтална поляризация (вълни на Лява). При тях частиците се движат успоредно на повърхността .

2.4.ОСНОВНИ ФИЗИЧЕСКИ ЕФЕКТИ В ЗВУКОВОТО ПОЛЕ

2.4.1.Затихване и поглъщане на звука

Затихването на звука представлява намаляване на амплитудата на звуковото налягане, а следователно и на интензивността на звука при неговото разпространение. То се обуславя от няколко фактора:

а) **Намаляване на амплитудата** вследствие на разпределянето на енергията на все по-голяма площ при сферичната и цилиндрична звукови вълни, което беше разгледано в предния раздел.

б) **Разсейване на звука** от нееднородности на средата, в резултат на което се намалява потока на енергията в първоначалната посока на разпространение. В газовете и по специално във въздуха тези нееднородности обикновено са водни капки – дъжд и мъгла, сняг и прах. Разсейването на звука става забележимо при наличието на частици с диаметър над 10 микрона и се увеличава с увеличението на честотата на звука. За да се получи представа за големината на това отслабване нека разгледаме данните на международната асоциация на службите, занимаващи се с фарове и маяци за така наречената стандартна мъгла, състояща се от еднакви частици (капки) с диаметър 25 микрона (табл.2.1):

Табл.2.1

Честота, Hz	12	25	50	1000	2000	4000
	5	0	0			
Затихване, dB/km	0,8	1,2	2,0	4,0	8,8	22,2

в) **Превръщане на енергията на звука в топлина**, което се нарича звукопоглъщане. То бива **класическо** – дължащо се на вискозитета и топлопроводността на средата, и **молекулярно** (релаксационно) .

Зависимостта на амплитудата на звуковото налягане от разстоянието, обусловена от **класическото звукопоглъщане** се характеризира с коефициента на звукопоглъщане α_k , който показва на какво разстояние амплитудата на вълната намалява **e** пъти.

$$p = p_0 e^{-\alpha_k x} \quad (2.29)$$

Може да се докаже, че вълновото число **k** е комплексна величина:

$$k = k_1 + jk_2 = \frac{\omega}{c} \left(1 - j \frac{b\omega}{2\rho c^3} \right) \quad (2.30)$$

Ако заместим израз (2.30) в израза (2.29), ще получим:

$$p = p_0 e^{\left(\frac{b\omega^2 x}{2\rho c^3} \right)} \cdot e^{j(\omega t - kx)} \quad (2.31)$$

Следователно:

$$\alpha_k = \frac{b\omega^2}{2\rho c} \quad (2.32)$$

В тези формули коефициентът :

$$b = \frac{4}{3} \eta - \eta' + \aleph \left(\frac{1}{c_v} - \frac{1}{c_p} \right) \quad (2.33)$$

тук означенията са:

η' - обемен вискозитет

η - вискозитет на приплъзване

c_p - топлемност при постоянно налягане

c_v - топлемност при постоанен обем

\aleph - топлопроводност

Релаксацията представлява процесът на възстановяване на вътрешното термодинамично равновесие на средата, нарушавано от сгъстяването и разреждането в звуковата вълна. Съгласно термодинамичния принцип за равномерно разпределение на енергията по степените на свобода (въртеливи и колебателни), енергията на постъпателното движение на частиците в звуковата вълна преминава във вътрешните степени на свобода на молекулите, като ги възбужда. В резултат на това се намалява енергията на постъпателното движение, като в следствие релаксацията се съпровожда от звукопоглъщане и дисперсия на скоростта на звука - т.е. зависимост на фазовата скорост на звуковите вълни от тяхната честота.

Релаксационния процес се характеризира с **времето на релаксация** τ . В даден газ при определена температура τ е право пропорционално на броя удари между молекулите на газа, необходими за възбуждане на съответните степени на свобода. Например за възбуждане на въртеливите степени на свобода в газ обикновено са достатъчни 10 до 100 удара, а за възбуждане на колебателните степени на свобода са необходими 10^5 до 10^6 удара, което означава, че τ за колебателната релаксация е много по-голямо от това за въртеливата. Освен това, τ зависи от температурата и налягането.

Влиянието на релаксационните процеси върху звуковата вълна зависи от отношението между периода на вълната и времето на релаксация. Колкото по-малко е отношението τ/T , толкова по-пълно успява да се възстанови нарушеното равновесие.

Зависимостта на скоростта на звука, обусловена от релаксацията е:

$$c = c_0 \sqrt{1 + \frac{c_\infty^2 - c_0^2}{c_0^2} \cdot \frac{\omega^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2}} \quad (2.34)$$

където c_0 - скорост на звука при $\omega\tau \ll 1$

c_∞ - скорост на звука при $\omega\tau \gg 1$

Коефициента на звукопоглъщане вследствие на релаксационния процес е:

$$\alpha_p = \frac{c_\infty^2 - c_0^2}{2c_0^3} \cdot \frac{\omega^2 \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2.35)$$

От зависимостта на скоростта на звука от честотата се вижда, че в областта от честоти, близки до честотата на релаксация $\omega_p = 1/\tau$ скоростта на звука нараства, а извън тази област е постоянна величина. Честотната зависимост на

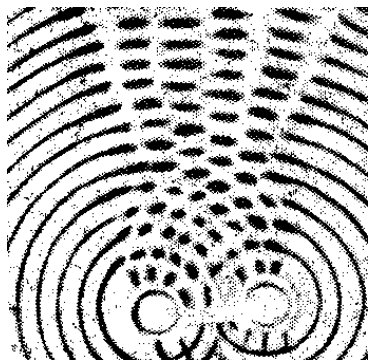
коэффициента на релаксационно поглъщане също има ясно изразен максимум. Това явление се нарича свръхстоксово поглъщане. Например за въглеродният двуокис на честотата 300 kHz се наблюдава рязко повишаване на поглъщането, приблизително 20 пъти по-голямо от класическото, а дисперсията на скоростта на звука е от $C_0=258,9$ м/с до $C_0=271$ м/с.

2.4.2. Дифракция

Дифракцията на звуковата вълна представлява отклонение на движението на звука от законите на геометричната акустика, обусловено от вълновата му природа. Резултат от дифракцията е разширяването на звуковите лъчи след преминаване през отвор върху екран, заобикалянето от звуковата вълна на препятствия с размер по-голям от дължината на вълната, липсата на акустична сянка зад препятствия, малки в сравнение с дължината на вълната и др. Звуковото поле, създавано чрез дифракция на изходната вълна върху препятствия се нарича разсеяно поле.

2.4.3. Интерференция. Стоящи вълни.

Интерференцията на звука (фиг.2.7) представлява неравномерно пространствено разпределение на амплитудата на звуковата вълна, получена от сумирането на няколко звукови вълни с различна фаза. При сумирането на хармонични вълни с еднаква честота резултатното пространствено разпределение на амплитудите образува независеща от времето интерференчна картина. За най-простия случай на две вълни тази картина има вида на редуващи се области на усилена и отслабена амплитуда, като тези области имат форма, зависеща от



Фиг.2.7

фронта на вълните. Проектирана на равнина интерференчната картина на две плоски вълни има вид на редуващи се ивици, а за два точкови източника интерференчните ивици имат формата на хипербола, във фокусите на които са разположени източниците.

В случая, когато две плоски вълни с еднаква амплитуда и противоположна посока на разпространение интерферират, се получава така наречената **стояща вълна**. Този случай се получава, когато интерферират правата и отразената от абсолютно твърда преграда плоски звукови вълни. Така получената интерференчна картина се характеризира с няколко особености:

1) Явлението не се разпространява в пространството, което е причина да се нарича стояща вълна.

2) Амплитудата на звуковото налягане е функция на разстоянието:

$$p'_m = 2p_m \cos kr \quad (2.36)$$

При стойности на $kr = (2n+1)\frac{\pi}{2}$, където n е цяло положително число, за които $\cos kr = 0$, амплитудата на звуковото налягане също е нула. Както вече казахме, картината не се изменя в пространството и тези точки остават на едно и също място и се наричат възли. Съответно при стойности на $kr = n\pi$, $\cos kr = 1$ и амплитудата е $p'_m = 2p_m$ и точките, в които е изпълнено това условие се наричат върхове. Тъй като вълновото число, както знаем е $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, то за разстоянието от излъчвателя, на което се намират върховете ще получим:

$$r = n \frac{\lambda}{2} \quad (2.37)$$

Съответно за възлите тази зависимост е:

$$r = (2n+1)\frac{\lambda}{4} = n\frac{\lambda}{2} + \frac{\lambda}{4} \quad (2.38)$$

От тези зависимости се вижда, че разстоянието между два съседни върха или възела е равно на половин дължина на вълната, и освен това върховете и възлите са разместени едни спрямо други на четвърт дължина на вълната.

3) Друга особеност е и това, че във всяка една зона, ограничена между два възела трептенето е синфазно, а в две съседни зони е противофазно.

4) Фазовата разлика между звуковото налягане и скоростта на трептене е винаги $\pi/2$, и следователно върховете на звуковото налягане съвпадат с възлите на колебателната скорост и обратно.

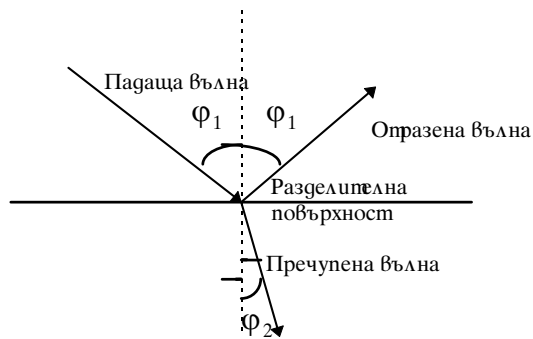
При интерференцията има нарушение на енергетичното сумиране на вълните – в различни точки на интерференчната картина резултатната плътност на енергията и интензивността могат да бъдат както по-големи така и по-малки от сумата на плътностите на енергията или интензивността на всяка от съставните вълни поотделно или иначе казано при интерференцията се получава преразпределение на акустичната енергия в пространството.

При хармонични вълни с различна честота интерференчната картина се променя всеки един момент и ако се вземе един по-голям период от време тя се размазва. За това се приема, че хармонични вълни с различна честота не интерферират.

При сумиране на вълни с еднакъв произход-например вълна и нейното отражение се получава интерференция, дори изходната вълна да е шум.

2.4.4. Пречупване на звука. Рефракция. Акустични лещи.

Звуковата вълна, падайки върху разделителната повърхнина на две среди



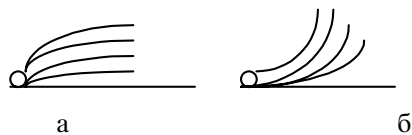
Фиг. 2.8

частично се отразява, а частично преминава в другата среда, като се пречупва (фиг.2.8). Отношението на ъгъла на падане към ъгъла на пречупване се определя от отношението на скоростите на разпространение в тези среди.

Ако импедансите на двете среди са близки, то почти цялата енергия ще премине от едната среда в другата. Интерес представлява едно явление, наречено **рефракция**, което в превод също значи пречупване. Ако при разпространение на звуковата вълна на открито има и вятър скоростта му се сумира с тази на вълната, като променя скоростта на звука. В реални условия в долните слоеве на атмосферата на

височина десетки метри скоростта на вятъра нараства с височината вследствие на въздушните маси в повърхността на земята. За това, когато звуковите вълни се разпространяват по посоки на вятъра скоростта на звука се увеличава с височината и звуковите лъчи като че ли се огъват надолу в посоката към средата с по-малка скорост на звука (фиг.2.9-а). При това огъване надолу част от енергията, която при нормални условия би трябвало да се разпространи нагоре се "фокусира" към земната повърхност, увеличавайки интензивността на звука в тази област. Когато

посоката на разпространение на звуковата вълна е срещу вятъра се получава огъване на звуковите лъчи нагоре при което възниква зона на мълчание (фиг.2.9-б). Градиента на скоростта на вятъра е най-голям близо до повърхността на земята и за това при озвучаване на открити пространства звукоизлъчвателите се поставят по-високо.



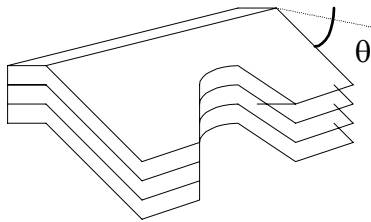
Фиг.2.9

Рефракция се предизвиква не само от вятъра, но и от градиента на температурата с

височината. Понеже скоростта на звука нараства с увеличаване на температурата при нарастване на температурата с височината (зимен слънчев ден) звуковите лъчи ще се фокусират и разстоянието на което ще се чува се увеличава. Има документиран случай, когато при такова "фокусиране" с многократно отражение от повърхността на езеро сигнал със звуково налягане 107 db на 10m от източника се чува на разстояние 5 километра със звуково налягане 70 db, докато при нормални условия такова спадане на нивото се получава още на 300m. Когато температурата се намалява с височината (летен ден) се получава обратното-звуковите лъчи се извиват нагоре и се оформя зона на мълчание.

При преминаването на звука от една среда в друга, ако двете среди имат различни скорости на звука, при подходящо оформление могат да се направят **акустични лещи**, които да послужат за фокусиране или разсейване на звука т.е. за формиране на исканата характеристика на насоченост на звукоизточника.

Коефициентът на пречупване на една леща η представлява отношението на скоростта на звука в околната среда c и скоростта му в обема на лещата sl . Ако $\eta > 1$ лещата се нарича забавяща, защото скоростта на звука в обема на лещата е по-малка от скоростта му в околната среда (в оптиката всички лещи са забавящи). При този вид лещи фокусиращата леща трябва да има поне една изпъкнала страна, а



Фиг.2.10

разсейващата - поне една вдлъбната. В акустиката може да има и ускоряващи лещи, за които горното правило е обратно. Най-често за въздух се ползват така наречените пластични вълноводни лещи (фиг.2.10), при които намаляването на ефективната скорост на звука се получава за сметка на удължаване на пътя на звука в лещата по наклонени под ъгъл спрямо посоката на разпространение канали оформени от пластините. При тях коефициентът на пречупване е:

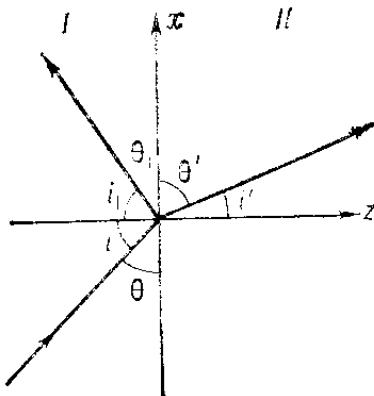
$$n = \frac{l}{l_0} = \frac{1}{\cos\theta} \quad (2.39)$$

Където l - пътя на звуковата вълна, която не минава през лещата
 l_0 - пътя на звуковата вълна през лещата
 θ - ъгъл на наклона на пластините спрямо посоката на разпространение на звуковата вълна.

При конструирането на акустични лещи се използват законите на оптиката.

2.4.5. Отражение.

Отражението на звука е явление, възникващо при падане на звуковата вълна върху препятствие или друга среда с параметри, различни от тези на средата, в която до сега се е движила звуковата вълна и представляващо образуване на друга вълна, разпространяваща се от препятствието обратно в средата, от която е дошла падащата вълна. Терминът отражение на звука се използва, когато поведението на вълната удовлетворява законите на геометричната акустика - ъгълът на падане е равен на ъгълът на отражението.



Фиг.2.11

Ефективността на отражението се характеризира с коефициента на отражение $\alpha_{отр.}$, който представлява отношението на интензивностите на падащата и отразена вълна. Тя зависи от степента на различия на акустичните импеданси на двете среди:

$$p_{отр.} = p_{пад.} \frac{Z_{пад.} - Z_{отр.}}{Z_{пад.} + Z_{отр.}} = p_{пад.} \beta e^{j\varphi} \quad (2.40)$$

тук $z_{отр.}$ е акустичния импеданс на отразяващата среда.

$z_{пад.}$ - акустичния импеданс на средата на разпространение.

β - модул на коефициента на отражение по звуково налягане.

ψ - фазова разлика между падаща и отразена вълна.

Ъгълът ψ зависи от характера и стойността на акустичните импеданси на двете среди - ако те са активни, когато $z_{отр.} > z_{пад.}$, което отговаря на случая на отражение от абсолютно твърда среда, $\psi=0$, а когато $z_{отр.} < z_{пад.}$. Или когато имаме отражение от абсолютно мека преграда, $\psi=180^\circ$.

Коефициента на отражение по интензивност е:

$$\alpha_{отр.} = \left(\frac{z_{пад.} - z_{отр.}}{z_{пад.} + z_{отр.}} \right)^2 = \left(\frac{p_{отр.}}{p_{пад.}} \right)^2 = \beta^2 \quad (2.42)$$

Ако изместването на фазата на звуковото налягане при отражение от твърда преграда е 0° , то на тази граница се получава максимум на звуковото налягане и възел на колебателната скорост. При обратното съотношение (отражение от мека граница) на границата се получава възел на звуковото налягане и максимум на колебателната скорост.

Ако фазовата разлика е между 0° и 180° възлите и максимумите се изместват от разделителната повърхност.

2.4.6. Ефект на Доплер

Ефекта на Доплер представлява изменението на честотата на приемания звук при движението относно средата на източника или приемника на звук, или на тялото, отразяващо звука. Следствие на Доплеровия ефект е познатото на всички повишаване на тона на свирката на локомотива, приближаващ се към застаналия на прелеза слушател, следвано от рязкото му понижаване, когато той отmine прелеза и започне да се отдалечава. За разлика от Доплеровия ефект при електромагнитните вълни, където изменението на честота е обусловено само от относителното движение на източника и приемника, при акустичните вълни изменението на честотата е различно при движение на източника и на приемника.

При движение на източника на звук и неподвижен приемник спрямо средата изменената честота ω е свързана с излъчената честота чрез зависимостта:

$$\omega' = \omega \frac{1}{1 - \frac{V_{и}}{c} \cos \theta} \quad (2.43)$$

Тук:

$V_{и}$ - скорост на източника

c - скорост на звука

θ - ъгъл между направлението на движение на източника и правата свързваща източника и приемника.

При движение на приемника и неподвижен спрямо средата източник изменената честота е:

$$\omega' = \omega \left(1 - \frac{V_{п}}{c} \cos \theta' \right) \quad (2.44)$$

$V_{п}$ - скорост на приемника

θ' - ъгъл между направлението на движение на приемника и продължението на правата, свързваща източника и приемника.

Когато и източника и приемника се движат спрямо средата, изменената честота става:

$$\omega' = \omega \frac{1 - \frac{V_n}{c} \cos \theta'}{1 - \frac{V_n}{c} \cos \theta} \quad (2.45)$$

При отражение от движещо се тяло:

$$\omega' = \omega \frac{1 - \frac{V_p}{c} \cos \theta}{1 - \frac{V_p}{c} \cos \theta'} \quad (2.46)$$

тук V_p - скорост на тялото

θ - ъгъл между направлението на движение на тялото и направлението на падане на първичната вълна.

θ' - ъгъл между направлението на движение на тялото и направлението от тялото към приемника.

Доплеровият ефект при движение на източника на звука се дължи на изменението на дължината на вълната в средата, при движение на приемника - на изменението на скоростта на звука в координатната система свързана с приемника, а при отражение от движещо се тяло - и по двете причини.

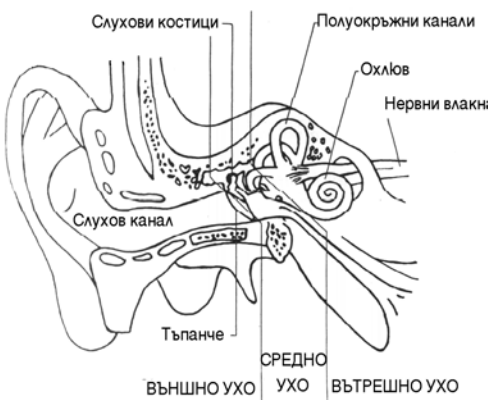
Доплеровия ефект е причина за един вид изкривявания при широколентовите високоговорители, които се наричат съответно доплерови изкривявания. В този случай той е вреден. Но освен вреден, той може да бъде и полезен, когато се използва при доплеровите измерители на скорост и доплеровите лагове на корабите, при охранните ултразвукови датчици на доплеров ефект, в медицинската диагностика за изследване на движението на сърцето, при някои ултразвукови разходомери и др.

3. ФИЗИОЛОГИЧНА АКУСТИКА

3.1. Субективно слухово възприятие

3.1.1. Човешко ухо

Свойствата на слуховото възприятие на човека са основният фактор определящ изискванията към широк клас електроакустични апарати - слушалки, микрофони, озвучителни тела, грамофони, магнитофони и др. Науката, която се занимава със свойствата на сетивните органи на човека в това число и на слуха се нарича психофизиология на възприемането.



Фиг.3.1

Слуховият орган на човека (фиг.3.1) се състои от три основни части - външно ухо, средно ухо и вътрешно ухо.

Външно ухо включва ушната мида и слуховия проход, завършващ с тъпанчето. Ушната мида и слуховият проход служат за подобряване на приемането на средните и високи честоти, като ушната мида служи като рупор за високите честоти, а слуховият проход като резонатор, настроен на честота 800 - 1000 Hz. Освен това той защитава тъпанчето от механични повреди.

Тъпанчето има леко конична форма с повърхност 55 до 85 mm^2 и е свързано с чукчето в средното ухо, заедно с което образува акустичен трансформатор, даващ усиление около 27 db .

Средно ухо представлява кухня, разположена в слепоочната кост. В нея се намират три свързани помежду си малки костици - чукче, наковалня и стреме, като чукчето е свързано с вътрешната страна на тъпанчето, стремето с овалното прозорче на вътрешното ухо, а наковалнята ги свързва, така че всички те

заедно образуват проста лостова система. Тя се поддържа от тънки мускулни влакна и трепти около своя център на тежестта, вследствие на което се извършва съгласуване на акустичния импеданс на въздуха с високия импеданс на вътрешното ухо, което е запълнено с течност.

Вътрешно ухо започва с овалното прозорче, което е в началото на спиралния канал на охлюва, разположен също в слепоочната кост. Към охлюва са присъединени още три полуокръжни канала, представляващи органа на равновесие и с които ние няма да се занимаваме. В спиралния канал са разположени механичният анализатор и чувствителните нервни окончания на слуховия орган. На фиг.3.2. спиралният канал е



даден условно разгънат, за да може по-ясно да се видят съставните му елементи. Той е разделен по дължина от базиларната (основна) и Райснерова (вестибуларна) мембрани. Базиларната мембрана по края е закрепена за костни издатини, които продължават по цялата дължина на спиралния канал от двете страни (напречното му сечение прилича на цифрата 8). На тази мембрана е разположен Кортиевият орган, представляващ удебеление по дължината на мембраната от което

Фиг.3.2

излизат тънки власинки, представляващи чувствителните елементи на нервните клетки . Тези клетки са разположени в пет реда по дължината на мембраната. Чувствителните власинки завършват в така наречената мембрана текторис, имаща пихтиеста структура и покриваща отгоре Кортиевия орган, от към Райснеровата мембрана. Базиларната мембрана, която има влакнеста структура, се разширява, като напречните влакна стават по-дълги с отдалечаването от овалното прозорче. В края, където напречните влакна са най-дълги, частта от спиралния ход намира се откъм овалното прозорче и нарича се "скала вестибули" (вестибуларно пространство) чрез отворствие, наречено хеликотрема, се свързва с частта намира се под базиларната мембрана и нарича се "скала тимпани" (барабанно пространство). От обратната страна на хеликотремата, в областта под овалното прозорче скала тимпани завършва с кръглото прозорче от другата страна на което се намира евстахиевата тръба, свързваща носоглътката със средното ухо. Средната част на спиралния канал е изпълнена с течност - ендолимфа, а скала тимпани и скала вестибули - с перилимфа, имащи различен акустичен импеданс.

Целия слухов апарат без външното ухо има размери 35 - 40 мм. Спиралния канал на охлюва е навит на 2,75 оборота и в разгънат вид е дълъг около 32 мм.

Механизмът на възбуждане на слуховия нерв е следният: Звуковите вълни, достигайки до външното ухо създават променливо налягане на въздуха пред тъпанчето, което вследствие на променливата ралика между него и постояното налягане от вътрешната страна се преобразува в променлива сила, приложена върху тъпанчето, вследствие на което то започва да трепти. Тези вибрации се предават на чукчето и чрез наковалнята на стремето, а последното ги предава на овалното прозорче което задвижва течността във вестибуларния канал. При много ниски честоти, под долната граница на чуваемия честотен обхват, течността от вестибуларното пространство преминава през хеликотремата в скала тимпани и задвижва мембраната на кръглото прозорче. При това не се получава разлика в налягането между двете пространства, поради което базиларната и Райснеровата мембрани и кортевият орган остават в покой и не възниква усещане за звук. При

честота на колебанията над 16 - 20 херца течността във вестибуларния канал не успява да се прелее през хеликотремата за времето на един полупериод, при което налягането във вестибуларното пространство се увеличава спрямо налягането в скала тимпани в резултат на което Райснеровата мембрана се огъва и се задвижва средната част на спиралния канал с базиларната мембрана и Кортиевия орган. Удебелението на средната част на базиларната мембрана и текториалната мембрана се задвижват една спрямо друга като при това предизвикват деформация на влакнцата на нервните клетки. Това предизвиква появата на нервни импулси, предаващи се по слуховия нерв до мозъка. Колкото е по-висока честотата, толкова по-близо до овалното прозорче е това място на базиларната мембрана, чието колебание е максимално по амплитуда. По този начин на звук с определена честота съответствува максимално възбуждане на определени нервни влакна. При това нервните окончания предизвикват кратковременни импулси, които се разпространяват по нервите със скорост 100 м/с. Честотата на импулсите не зависи от честотата на звука, а от звуковото налягане, което определя едно квантуване на възприятието за сила на звука.

На ниски честоти основната мембрана се колебае като едно цяло и честотния анализ на звука се извършва в мозъка, за средните честоти честотния анализ се извършва вследствие на резонансния ефект на основната мембрана и се доуточнява в мозъка, а за честоти над 5000 херца честотния анализ се дължи изключително на резонансния ефект на базиларната мембрана.

Ухото не извършва точен честотен анализ по Фурие, а интегрира за един период приблизително 50 милисекунди. Този привиден недостатък всъщност е необходимост, за да може човек да различава взривните съгласни на речта (Б, П и др.). Освен това благодарение на него простото ехо довежда до нарастване на гръмкостта, съответстващо на закона за сумиране на енергията, ако времето на закъснение на ехото е по-малко от 30 милисекунди, а не пречи на разпознаването на речта. Освен това така се засилва и усещането за пространство. Това физиологично отслабване на усещането за ехо дава възможност да се определя посоката от която идва звука в помещения, където ехото е сравнимо по сила с основния сигнал. Следствие от ограничената времеконстанта на ухото е и получаването на биене от два близки по честота чисти звука.

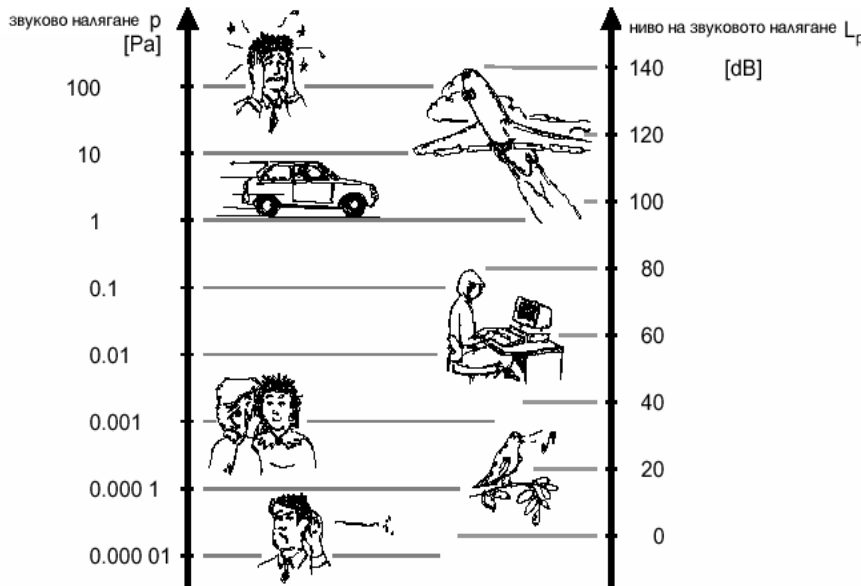
Разликата по време и фаза, с която звуковата вълна достига до двете уши на слушателя се преобразува в усещане за посоката, от която идва звукът, което се нарича бинурален ефект. Този ефект ще бъде разгледан по-подробно в специален урок.

Ухото на човека е много чувствително - то възприема звуково налягане, което много малко превишава звуковото налягане, съзнателно от брауновото движение на молекулите, регистрира разлика във височината на тона 0,3%, като за да различи тона са му необходими около три пълни периода на звука., различава посоката и разстоянието с помощта на нискочестотните преходни процеси, чийто характер зависи от формата на фронта на звуковата вълна. Въпреки това в техническо отношение ухото може да се приеме за примитивно - честотната му характеристика е лоша, уморява се и е уязвимо от явлението маскировка. Ние това трябва да познаваме особеностите му, защото е безсмислено да се прави акустична техника, даваща повече отколкото може да възприеме ухото, като при това се увеличава нейната сложност и цена .

3.1.2. Възприятие по ниво

3.1.2.1. Зона на слуховото възприятие

Както вече казахме в предния раздел, възприятието за ниво (сила) на звука



Фиг.3.3

се базира на броя на импулсите, които се предават по слуховия нерв. При кратковременно възбуждане броя импулси, възникващи за единица време е два до четири пъти повече, отколкото при дълговременно възбуждане.

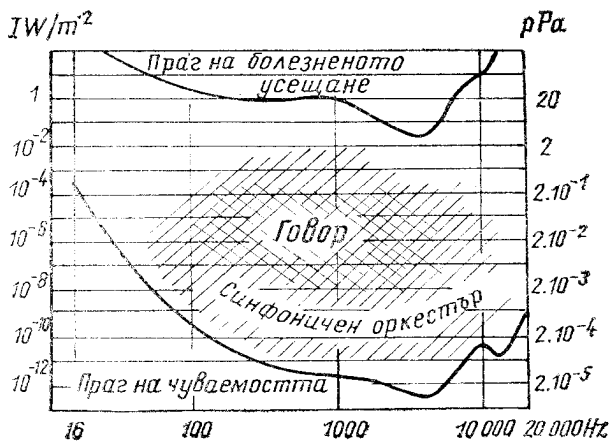
Следователно кратковременните процеси и в частност тези, които възникват при преходните процеси се оценяват от ухото като по-силни от дългите тонове. По-късно ще видим как това се отразява на възприемането на тоналните импулси.

Ако при колебанието на основната мембрана влакънцата на нервните клетки не се деформират между нея и мембрана

текторис, не възниква усещане за звук. В момента, в който влакънцето опре до мембрана текторис и започне да се деформира, нервната клетка започва да изпраща импулси и възниква усещане за звук. Големината на звуковото налягане, при което започва да се получава това усещане при пълно отсъствие на други смущаващи шумове

и звуци се нарича праг на чуваемост. Този праг е много различен за отделните хора, като е различен дори за един и същи човек в зависимост от състоянието на организма в дадения момент - умора, възбуждане, настроение и др. За това този праг се определя статистически за голяма група от хора с нормален слух.

Прагът на чуваемост силно зависи от честотата (фиг.3.4), като е най-нисък за 1000 херца - там той отговаря на звуково налягане $2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$, а за граничните честоти на чуваемия звуков диапазон е със 70 dB по-висок. Когато увеличаваме звуковото налягане се достига до едно ниво, при което се усеща болка - това е прагът



Фиг.3.4

на болезненото усещане, и той е при звуково налягане $3 \cdot 10^6$ пъти по-голямо от това на прага на чуваемост, дефиниран за 1000 херца. Прагът на болезнено усещане е почти еднакъв за всички честоти, включително и за честотите на инфразвука и ултразвука, бизки до границите на чуваемия диапазон, като на границите на честотния диапазон на чуваемия звук се слива с прага на чуваемостта т.е. за тези честоти, за които няма усещане за звук все пак се чувства болка при достатъчно високи нива. Областта от стойности на звуковото налягане, ограничена от прагът на чуваемост и прагът на болезненото усещане се нарича зона на слуховото възприятие.

3.1.2.2. Психофизичен закон на Вебер-Фехнер.

При плавно увеличение на звуковото налягане, а от там и на интензитета на звука, слуховото усещане нараства стъпалообразно в зависимост от броя импулси, предадени към главния мозък от раздразнените нервни клетки. Големината на стъпалата е:

$$\frac{\Delta I}{I} = \text{const.} \quad (3.1)$$

Тук ΔI е нарастването на интензивността, което трябва да се предаде на звука с интензивност I , за да се забележи разликата. Това нарастване зависи от честотата и се изменя от 5% за 1000 херца до 15% за 100 херца и 12% за 8 килохерца.

Вебер и Фехнер са формулирали следния психо физичен закон: Еднаквото относително нарастване на силата на дразнение предизвиква еднакви нараствания на субективното усещане (този закон важи не само за слуховото възприятие, но и за зрителното и за усещането за допир). Следователно, слуховото усещане е пропорционално на логаритъма на силата на дразнение.

Ако с L означим нивото на усещане, то:

$$A.L = \ln I \quad (3.2)$$

Тук A е коефициент на пропорционалност, зависещ от единицата на измерване на L

Тъй като за някаква интензивност I_0 усещането за звук изчезва, т.е. L става равно на 0, то:

$$L = \frac{1}{A} \ln \frac{I}{I_0} \quad (3.3)$$

Ако приемем $A=0,23$, ще получим:

$$L = 10 \lg \frac{I}{I_0} \quad (3.4)$$

Коефициентът A е избран до известна степен произволно, за да се получи кръгло число за коефициент (10), но е близо до големината на нарастването, което се различава на слух (както казахме по-горе то е между 5 и 15 %).

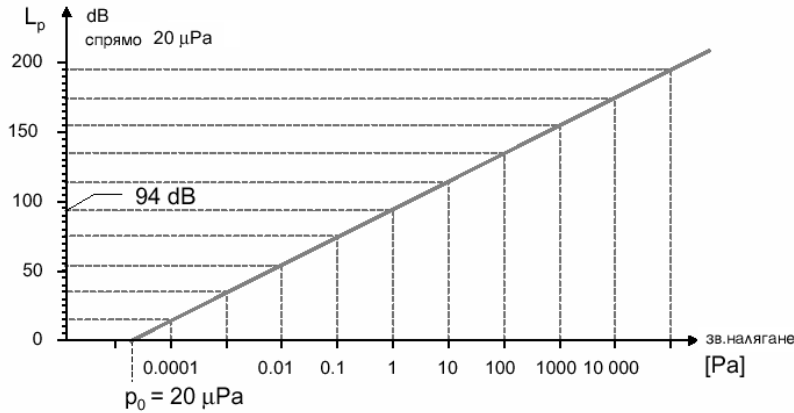
3.1.2.3. Логаритмични нива. Децибелна скала.

В техниката широко се използва децибелната скала точно поради нейното съответствието на психо физичния закон на Вебер - Фехнер. За енергетичните величини като мощност, енергия, интензивност на звука и т.н. логаритмичното ниво се определя по формулата:

$$N = 10 \lg \frac{I}{I_0} \quad (3.5)$$

За звуковото налягане, колебателната скорост на частиците, силата, електрическият ток и напрежение, заряда и т.н. логаритмичното ниво се определя по формулата:

$$N = 20 \lg \frac{P}{P_0} \quad (3.6)$$



Фиг.3.5.

Графика за преминаване от звуково налягане в ниво на звуковото налягане

Ако вземем за нулево ниво стандартния праг на чуваемост за честота 1000 херца, който е $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$, то логаритмичното ниво на звуковото налягане е:

$$N = 20 \lg p + 94 \text{ dB} \quad (3.7)$$

За интензивността формулата е:

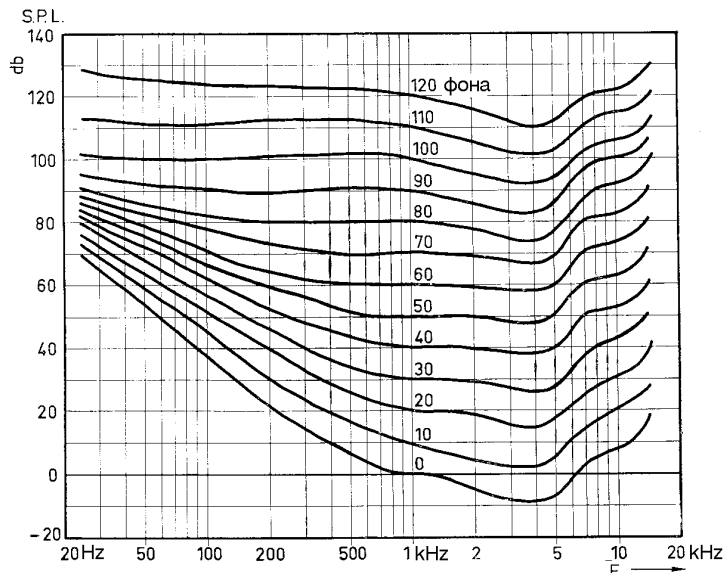
$$N = 10 \lg I + 120 \text{ dB} \quad (3.8)$$

Тук за нулево ниво е приета стойността $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$

Трябва да напомним, че нивото на звуковото налягане съвпада с нивото на усещане само за чист тон с честота 1000 херца.

3.1.2.4. Гръмкост и ниво на гръмкостта.

От казаното по-горе следва, че нивото на усещане не характеризира точно субективното усещане когато става дума за честоти, различни от 1000 херца - при сравнението на звуци с различни честоти на едни и същи децибели



Фиг.4.6

на нивото на усещане съответства различно по сила усещане, защото коефициента А беше приет близо до някаква усреднена стойност. Оказва се, че предизвикващите еднакво усещане звуци за различна честота имат различна интензивност. За това е въведено понятието ниво на гръмкостта, което представлява нивото на предизвикващия еднакво усещане звук с честота 1000 херца в децибели. За единица на нивото на гръмкостта е приета единицата Фон. За да

се определи нивото на гръмкостта на някакъв звук се взема тон с честота 1000 херца и нивото му се изменя докато гръмкостта му на слух не се изравни с това на измервания звук, при което нивото на гръмкостта е числено равно на нивото на еталонният тон в децибели.

Чрез статистически изследвания, в които са участвали големи групи хора са определени кривите на зависимостта на интензивността на звука от честотата за равно гръмки чисти тонове и на базата на тях са определени стандартните криви на равната гръмкост или така наречените криви на Флетчър и Мансон (фиг.3.6). Всяка крива съответства на нивото на интензивност на звука за 1000 херца, през което тя преминава. Освен това нивото на усещане не характеризира субективното усещане и от гледна точка на сравняването на две нива в зависимост от абсолютната им стойност. Например, ако за честотата 1000 херца, при ниво на звуковото налягане 20 децибела са необходими около 5 децибела за удвояване на гръмкостта, то при ниво 40 децибела са необходими вече 8 dB, а при ниво 80 dB - 10 dB. В средния диапазон на нива на звуковото налягане от 50 до 90 децибела гръмкостта на чистите тонове расте приблизително по степенен закон със степенен показател 0,5 - 0,6 (по звуково налягане). Във връзка с това е въведена величината Сон, означавана със S. За звук с единична гръмкост 1 сон е приет тон с честота 1000 херца и ниво на звуковото налягане 40 децибела. Емпиричната формула, свързваща нивото на гръмкостта с гръмкостта е:

$$S = 2^{\frac{(N-40)}{10}} \quad (3.8)$$

3.1.2.5. Критични ленти на слуха

Установено е, че прага на чуваемост за близо разположени по честота групи чисти тонове с еднаква интензивност зависи от броя на тези тонове, ако те са разположени в границите на определена честотна лента. Прагът за такава група съответства на прага за един чист тон с някаква средна честота в тази лента и със сумарна интензивност - т.е. ухото като че ли сумира интензивностите на компонентите. Обаче, ако компонентите излизат извън границите на определена честотна ширина на лентата, то свойството за сумиране на интензивностите вече не действа. Честотната лента, в границите на която се проявява свойството на слуха да сумира интензивностите се нарича критична лента на слуха.

Табл.3.1

Номер на критичната лента.	Централна честота на лентата, Hz	Широчина на лентата, Hz
1	2	3
1	50	100
2	150	100
3	250	100
4	350	100
5	450	110
6	570	120

7	700	140
8	840	150
9	1000	160
10	1170	190
11	1370	210
12	1600	240
13	1850	280
14	2150	320
15	2500	380
16	2900	450
17	3400	550
18	4000	700
19	4800	900
20	5800	1100
21	7000	1300
22	8500	1800
23	10500	2500
24	13500	3500

Широчина и зависи от централната честота в лентата, като се увеличава при увеличаването на честотата (табл.3.1). Важно е да се отбележи, че групата чисти тонове в критичната лента на слуха не трябва да създава отчетливи периодични биения, т.е. не трябва да се съдържат чисти тонове, различаващи се по честота с по-малко от 7 - 10 херца. Прага на чуваемост за шума се определя именно в критични ленти за слуха.

3.1.2.6. Ниво на гръмкостта на сложни звуци.

В случая, когато сложният звук или шум излизат извън границите на критичната лента или създават бавни биения, определянето на гръмкостта се базира на свойството на ухото да сумира гръмкостите:

$$S_{\Sigma} = S_1 + S_2 \quad (3.9)$$

Нивото на гръмкостта се определя по формулата:

$$N_{\Sigma} = 33 \lg(S_1 + S_2) + 40 \quad (3.10)$$

В случая когато се създават биения, гръмкостта се определя от сумирането на интензивностите на двата тона и при равна интензивност тя се увеличава с 6 децибела а от там се определя и гръмкостта по кривите на Флетчър и Мансон.

3.1.3. Възприятие по честота. Ефект на маскировка

3.1.3.1. Усещане за височина на тона

Чистите тонове и периодичните звукови колебания със сложна форма се възприемат на слух като музикални звуци, имащи определена височина. Колкото е по-голяма основната честота на звука, толкова по-висок ни изглежда звука. Ухото е много чувствително към малки изменения на честотата и може да различава синусоидални тонове, които се различават по честота само с 0,2% за честотния обхват от 500 до 4000 херца. На по-ниските и на по-високите честоти едва различимото на слух изменение на честотата расте. Това едва различимо изменение на честотата се нарича диференциален праг на усещането по честота.

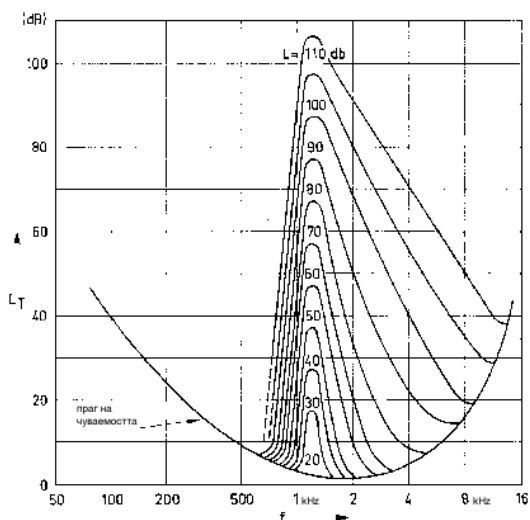
Усещането за височина на тона също е логаритмично, също и усещането за гръмкост. На слух разстоянията по височина на тона между два звука ни изглеждат еднакви, ако отношението на честотите на тези звуци е еднакво. Разстоянието по височина на тона се наричат интервали или музикални интервали. Музикалният интервал за две звукови честоти f_1 и f_2 може да се изрази по следния начин:

$$i = 12 \lg_2 \frac{f_1}{f_2} \quad (3.11)$$

В този случай единичният интервал ще има отношение на честотите, което съответствува на полутон.

От казаното до тук може да се направи изводът, че за оценка на слуховото възприятие трябва да се използва логаритмичен мащаб както по интензивност на звука (или по звуково налягане) така и по честота. Описаните по-горе свойства на слуха за възприятие на височината на тона се отнасят за хармоничната височина - усещането, свързано с едновременното звучене на няколко музикални тона. Но човек

може да оценява също така и разликата по височина на последователно звучащи звуци. Тази оценка се оказва различна от хармоничната височина - два звука с ниски честоти (например 100 и 150 херца) изглеждат по-отдалечени един от друг по височина, отколкото два звука с висока честота (например 2 и 3 килохерца) макар че отношенията на честотите и в двата случая са еднакви. Усещането за височина или по-точно за разстояние по височина, което се предизвиква от последователни тонове се нарича мелодична височина на звука. До 500 херца мелодичните и хармоничните октави съвпадат. Обаче в честотния обхват от 500 до 8000 херца има 4 хармонични октави, а само малко повече от две мелодични.



Фиг.3.7

3.1.3.2. Ефект на маскировка.

Откриването на слух на звуков сигнал при наличието на друг, смущаващ звук е много по-трудно, отколкото в пълна тишина. Това явление се нарича маскировка на звука. Последната се оценява по големината на повишаване на прага на чувателност за

маскируемия (полезен) сигнал в зависимост от интензивността на едновременно звучащия маскиращ тон, в сравнение с прага на чуваемост за полезния тон при пълна тишина (фиг.3.7). Маскировката е толкова по-силна, колкото маскиращият тон е по-близък по честотата до маскируемия, а също така нискочестотните звуци много по-силно маскират високочестотните, отколкото обратно.

Когато маскиращият сигнал е шумов, маскиращо действие оказват само тези съставлящи на шумовия спектър, които лежат в сравнително тясната честотна лента близо до маскируемия тон. Тази честотна лента практически съвпада с критичните ленти на слуха.

Когато разликата по честота между маскируемият тон и маскиращото синусоидално колебание стане по-малка от 10 херца, ефекта на маскировка намалява. Причина за това са биенетата за които беше споменато в предния урок. При равенство на честотите маскировката е минимална. Такива минимума се наблюдават и на честоти, кратни на маскируемия тон.

3.1.3.3. Характеристики на слуха в зависимостта от времето.

В случай на сложни колебания, състоящи се от няколко честотни съставки които попадат в различни критични ленти на слуха ухото не реагира на фазовите измествания между съставките, което означава, че не реагира на изменението на формата на кривата.

При изчезване на дразнението, слуховото усещане не изчезва веднага, а постепенно се намалява до нула. Този ефект се нарича слухово впечатление. Времето, за което усещането за гръмкост се намалява с 8,7 фона се нарича времеконстанта на слуха и усреднено е равна на 150–200 милисекунди.

3.1.3.4. Възприемане на импулси

За тоналните импулси с дължина над 200 милисекунди прага на чуваемост се определя както и за непрекъснат тон. За импулси с дължина под 200 милисекунди прага на чуваемост зависи от отношението на дължината на импулса към 200 милисекунди, като два кратки импулса се възприемат еднакво силно, когато това отношение е еднакво. За кратки повтарящи се импулси прагът на чуваемост пада с увеличаването на честотата на повторение, а при честота на повторение 200 херца прагът на чуваемост на импулсите е равен на прага на непрекъснат тон. За широколентовите шумови импулси граничната дължина на импулсите е 50 милисекунди т.е. такива импулси с дължината над 50 милисекунди се възприемат както непрекъснат шум.

Гръмкостта на тоналните импулси зависи от интензивността на импулса и от неговата продължителност и по-точно от произведението на тези величини, като гръмкостта на импулсите с дължина повече от 100 милисекунди се определя само от интензивността и не зависи от продължителността.

3.1.4. Бинурален ефект.

3.1.4.1. Бинуралният ефект представлява способността на човека да определя посоката към източника на звук при слушане с двете уши. Това се дължи от една страна на възприемането на разликата във фазите, които звуковата вълна пристига в уши (или разликата във времето на пристигане до двете уши при звукови импулси), а от друга страна на разликата в звуковото налягане в двете уши вследствие на акустичната сянка на главата. Във връзка с това се различават фазов и амплитуден бинурални ефекти. Експериментално е установено, че разликата в звуковите налягания може до известна степен да замени фазовата разлика и това се нарича ефект на компенсация на фазовия бинурален ефект от амплитудния.

Фазовия бинурален ефект се проявява главно при дълги тонове с честота до 1600 херца и при звукови импулси. При честоти по-високи от 1600 херца фазовата

разлика надвишава 180° и става нееднозначна. Затова при високите честоти основно значение придобива амплитудния бинурален ефект.

Чувствителността на човешкото ухо е такава, че то може да възприеме разлика по време възлизаща на $0,00001$ сек. и да я оцени като изместване на звукоизточника на 3° т.е. при разстояние 50 метра да възприеме преместване в страни на $2,5$ метра. Разликата във времето на пристигане на сигнала до двете уши, възлизаща на 6.10^{-5} сек. предизвиква вече усещане за странично разположение на източника на звук, защото разликата в пътя на звука между двете уши при странично разположение на звукоизточника е от порядъка на 21 см. За чисти синусоидални тонове е честотния обхват от $100 - 1000$ Hz Стюарт дава следния израз за отношението на възприятието за направление θ и фазовата разлика на звука в двете уши ϕ :

$$\frac{\theta}{\phi} = \frac{1}{0,8 + 0,003f} \quad (3.13)$$

Където f е честотата на звука.

Точността на локализация на звукоизточника зависи и от разположението му спрямо оста на симетрия на главата - максимална е "пространствената острота" на слуха точно по тази ос и близо до нея където най-добрата локализация достига един градус при честота $500 - 1000$ Hz. Общо взето най-слаба е локализацията за честоти около 1600 херца, където локализацията е в рамките на 3° , което вероятно се обяснява с факта, че там фазовата разлика става двусмислена (180°). За честотния обхват от $3 - 6$ kHz локализацията е в границите на $1,5^\circ$ до 2° и за по високите честоти постепенно намалява.

Локализацията е много по добра за сложни тонове, от колкото за чисти синусоиди. Ако обаче сигналът включва няколко тясно лентови съставлящи, може да възникне усещане за няколко слухови обекта, разположени на различни места. За това по някога звуците, издавани от неподвижно стояща пойна птица се възприемат като идващи от различни посоки. Може да се направи следният експеримент: на един високоговорител се подава синусоидално напрежение с такава стойност, че да предизвика леко претоварване, вследствие на което се появяват хармонични изкривявания, а честотата му се изменя. При това положение слушателят добива впечатление, че няколко слухови обекта се преместват в различни направления.

Пространствените свойства на слуха зависят и от явлението адаптация, като по тази причина локализацията зависи от времето на звучене на сигнала. Съществува известна инерционност и ухото реагира на изменението на положението на звукоизточника не мигновено, а с определена задръжка във времето. Това трябва да се има предвид, когато става дума за бързо изменящи се източници на звук.

Известно влияние върху амплитудния бинурален ефект оказва и формата на външното ухо-ушната мида и слуховия канал. Установено е, че външното ухо има серия от резонанси, като първия от тях е на 3 kHz, втория на 5 kHz и т.н. Експериментите показват, резонансът на честота 5 kHz зависи от посоката на идване на звука и при ъгъл спрямо оста на симетрия на главата от 0° до 90° резонансът не се изменя, след което за ъгли от 90° до 115° остротата му рязко спада и нивото става по-ниско с 15 до 20 децибела и се задръжва на тази стойност до 180° . Това явление явно оказва силно влияние за локализиране на звукоизточника по отношение на предна-задна полусфера. Има данни, че в резонансната система ушна мида-слухов канал възникването на всеки резонанс зависи от посоката към звукоизточника и разстоянието до него.

3.1.4.2. Бинурално разпознаване на сигнала.

Когато в едно помещение разговарят няколко човека на пръв поглед възниква невъобразим шум, но въпреки това всеки слушател може да отдели от общия шум

интересуващия го глас, дори когато говорещия е обърнат на друга страна. Ако обаче слушащия запуши едното си ухо, или се слуша запис, разбираемостта на говора рязко намалява. Този психо акустичен ефект е наречен от Чери "ефект на вечеринката". Когато полезния сигнал идва от една посока, а смущаващия от друга, при бинурално чуване маскиращото действие на смущаващия сигнал е значително отслабено.

3.1.4.3. Слухово усещане за разстояние.

Ухото отчетливо усеща разстоянието до източника на звук, като това свойство е еднакво изразено както при слушане с едното ухо, така и при бинурално слушане. Бекеши доказва, че усещането за разстояние се базира на нискочестотните процеси при източниците на звук. Оказва се, че реагира на скоростта на движение на частиците и от там на кривината на фронта на звуковата вълна, което явление е по-силно изразено и се простира на по-голямо разстояние при ниските честоти.

В качеството на друг фактор обуславящ усещането за разстояние се явява обстоятелството, че тоналната окраска с увеличаване на разстоянието става по-високочестотна. Съществуват звукоизточници, при които има по-силни нискочестотни преходни процеси и при липса на видимост те се възприемат като по-близки, докато източници без такива процеси изглеждат по-отдалечени. По тези причини усещането за разстояние е относително. При възпроизвеждане трябва да се има пред вид, че честотите до 500 херца са най-важни за усещането за разстояние.

4. АРХИТЕКТУРНО - СТРОИТЕЛНА АКУСТИКА

4.1. РАЗПРОСТРАНЕНИЕ НА ЗВУКА В ПОМЕЩЕНИЯ

4.1.1. Основни понятия.

Във всяко помещение съществува пряк звук - това е звукът, който идва директно от източника и отразен звук, който достига до слушателя след отразяване от различните повърхности - ограничаващи помещението (стени и под), или намиращи се в него (мебели и други предмети). При сумирането на прекия и отразен звук в помещението вследствие на интерференцията се сформира звуково поле с определени нива на звуковото налягане в отделните точки от обема.

Както вече споменахме в раздел 2, законите на отражение и пречупване са аналогични на законите на геометричната оптика. Количествено погълнатата, отразената и преминалата през дадена преграда звукова енергия се определя от коефициентите α , β и τ , които се дефинират по следният начин:

-Отношението на погълнатата енергия към падналата се нарича **коефициент на звукопоглъщане** α :

$$\alpha = \frac{E_{\text{пад.}} - E_{\text{отр.}}}{E_{\text{пад.}}} \quad (4.1)$$

Тук $E_{\text{пад.}}$ е падналата, а $E_{\text{отр.}}$ е отразената звукова енергия.
От друга страна:

$$\alpha = \frac{E_{\text{пог.}} + E_{\text{прем.}}}{E_{\text{пад.}}} \quad (4.2)$$

Тук $E_{\text{пог.}}$ е погълнатата, а $E_{\text{прем.}}$ е преминалата звукови енергии.

-Отношението на енергиите на отразения звук към тази на падналия се нарича **коефициент на отражение** β :

$$\beta = \frac{E_{\text{отр.}}}{E_{\text{пад.}}} \quad (4.3)$$

Отношението на преминалата през преградата звукова енергия към падналата се нарича **коэффициент на звукопроницаемост τ** :

$$\tau = \frac{E_{\text{пр.}}}{E_{\text{пад.}}} \quad (4.4)$$

Освен това, очевидна е зависимостта:

$$\alpha + \beta = 1 \quad (4.5)$$

Коефициентът на звукопоглъщане α зависи от материала на конструкцията, честотата на звука, като за различните материали честотната зависимост е различна и ъгълът на падане на звуковата вълна. Звукопоглъщането е обусловено от превръщането на звуковата енергия в топлинна вследствие на триенето в порите на материала на преградата, а неговата зависимост от отношението на акустичните импеданси на поглъщащата преграда и въздухът е:

$$\alpha = 1 - \left(\frac{\rho c - 413}{\rho c + 413} \right)^2 \quad (4.6)$$

Тук ρc е специфичното акустично съпротивление на звукопоглъщащия материал в $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$, а 413 е специфичното акустично съпротивление на въздуха.

Ако $\rho c > 413$, около поглъщащата повърхност се получава възел на колебателната скорост на частиците и максимум на звуковото налягане, а ако $\rho c < 413$ – максимум на колебателната скорост и възел на звуковото налягане.

Както казахме, коефициентът на звукопоглъщане зависи от ъгъла на падане на звуковата вълна върху поглъщащия материал. Във връзка с това различаваме нормален коефициент на звукопоглъщане (при ъгъл на падане 90°) и дифузен коефициент на звукопоглъщане (при всевъзможни ъгли на падане на звуковата вълна). В справочниците обикновено се дава дифузният коефициент на звукопоглъщане α диф.

Обикновените строителни материали имат сравнително ниски коефициенти на звукопоглъщане. Например при бетона за честота 500 херца $\alpha = 0,01$ или около 1% от звуковата енергия се поглъща, а останалото се отразява обратно в помещението. За мазилка този коефициент е 0,02, за паркет – 0,07. Специалните звукопоглъщащи материали имат 10 до 15 пъти по-голям коефициент на звукопоглъщане.

Сумарното звукопоглъщане $A_{\text{общ.}}$ представлява сумата от произведенията на коефициентите на звукопоглъщане на отделните повърхности по тяхната площ:

$$A_{\text{общ.}} = \sum \alpha_i S_i + \sum A \quad (4.7)$$

тук $\sum A$ е сумата от звукопоглъщането на мебелите и хората, намиращи се в помещението.

Величината $A = \alpha S$ се нарича еквивалентна площ на звукопоглъщане на дадена повърхност и представлява площта на самия материал, която би погълнала напълно звука. Например, при $S = 1\text{m}^2$ и $\alpha = 1$, $A = 1\text{m}^2$, но също така при $S = 5\text{m}^2$ и $\alpha = 0,2$, $A = 1\text{m}^2$.

Пълно поглъщане на звука е възможно или ако $\beta=0$ (т.е. нямаме отражение) или ако $\rho_1 c_1 = \rho_2 c_2$ или наличие на равенство на акустичните импеданси на двете среди, при което се получава пълно проникване на звука от едната среда в другата.

4.1.2. Основни методи за определяне на параметрите на звуковото поле в архитектурната акустика

Архитектурната акустика работи с три основни метода:

Вълнова акустика. Този метод разглежда два режима на колебание на въздушния обем в помещението – собствени затихващи колебания и принудени колебания под въздействието на някакъв звукоизточник. Съгласно вълновата акустика въздушният обем в едно помещение представлява колебателна система с разпределени параметри, която има цял спектър собствени честоти. За правоъгълни помещения с твърди стени този спектър се описва с формулата:

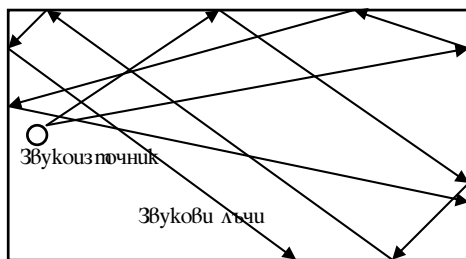
$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad (4.8)$$

Тук n_x , n_y и n_z е тройка целочислени параметри, а l_x , l_y и l_z са съответните размери на помещението.

На всяка тройка параметри съответства определена честота на собствени колебания на въздушния обем. В областта на ниските честоти, които съответстват на малките стойности на n собствените честоти са отделени с големи интервали, т.е. имат дискретна структура, а в областта на високите честоти спектъра се уплътнява и броят на собствените колебания става много голям. При сравнително големи помещения собствените честоти са така плътно разположени, че на всяка компонента в спектъра на звукоизточника съответства цял ред собствени колебания на обема с честотата, малко различаваща се от тази на възбуждащите компоненти. Колкото по-малко е помещението, толкова в по-широк честотен диапазон съществуват резонансни явления, увеличаващи неравномерността на звуковото поле.

Изчисляването на собствените честоти за средните и високи честоти е трудоемко и не винаги може да се извърши дори и с компютър.

- **Геометрична акустика.** При този метод се използват понятията фронт на звуковата вълна и звукови лъчи. Последните се дефинират като лъчи, които са перпендикулярни на фронта във всяка една точка и показват посоката на разпространение на звуковата вълна.



Фиг.4.1

Лъчите в дадено помещение се нарича лъчева скица или ескиз (фиг.4.1)

Допустимостта на приложение на геометричната акустика зависи от дължината на вълната, размерите на отразяващите повърхности и разположението им спрямо звукоизточника и точката на приемане на звука. Отражението на звуковата вълна може да се счита за насочено, ако най-малкият размер на повърхността е поне 1,5

Звуковите лъчи се подчиняват на законите на геометричната оптика. Понякога действието на отразените от дадена повърхност лъчи се заменя с фиктивни (мними) източници, отчитащи намалението на мощността пропорционално на коефициента на отражение на дадената повърхност. Знаейки пътя на даден лъч и скоростта на разпространение на звука можем да определим дефазирането спрямо пряката вълна и да определим евентуални акустични дефекти на помещението. Едно построение на разпространението на

пъти по-голям от дължината на вълната, а за криволинейна повърхност най-малкия радиус на закръглението трябва да бъде по-голям от удвоената дължина на вълната.

- **Статистическа акустика**. Този метод се основава на предположението, че в помещението под действието на източника на звук се сформира дифузно звуково поле, което се характеризира с това, че във всяка една точка усредненото по време ниво на звуковото налягане и потока на енергията, преминаваща в произволно направление са постоянни.

За отчитане на звукопоглъщането се използва величината среден коефициент на звукопоглъщане :

$$\alpha_{\text{ср.}} = \frac{A_{\text{общо}}}{S_{\text{общо}}} \quad (4.9)$$

Тук $S_{\text{общо}}$ е сумарната площ на заграждащите помещението повърхности.

Статистическата акустика разглежда също така и средната дължина на пътя между две отражения $l_{\text{ср.}}$. Тази величина зависи и от формата на помещението, но за практически цели се приема, че зависи само от обема му и от $S_{\text{общо}}$:

$$l_{\text{ср.}} = \frac{4.V}{S_{\text{общо}}} \quad (4.10)$$

$$A_{\text{общо}} = \frac{\varepsilon.c.\alpha_{\text{ср.}}.S_{\text{общо}}}{4} \quad (4.11)$$

Тук ε - плътност на звуковата енергия .

c - скорост на звука.

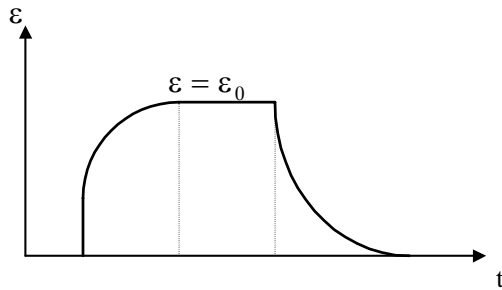
4.1.3.Време на реверберация. Граничен радиус.

Нарастването на плътността на енергията в помещението се става изведнъж, а по експоненциален закон и това продължава до тогава, докато излъчваната от източника енергия не се уравни с поглъщаната в помещението енергия. Достатъчно дълго време след включването на източника на звук се достига максималната стойност на ε , която се означава с ε_0 :

$$\varepsilon_0 = \frac{4.W}{c.A_{\text{общо}}} \quad (4.12)$$

Тук W - мощността, излъчвана от звукоизточника

Затихването на звука след изключване на източника също става постепенно вместо звука внезапно да изчезне и това става вследствие на многократните отражения на звука от заграждащите повърхности. Процесът на затихване на звука след изключване на източника (т.е. при $W=0$) се нарича реверберация. Времето, за



Фиг.4.2

което настъпва затихването се нарича време на реверберация. (фиг.4.2). Практически отчитането на момента, когато звуковата енергия става равна на нула е невъзможно най-малкото поради собствените шумове в измервателната апаратура.

Затова в качеството на еталон е прието времето за което звуковата енергия намалява 10^6 пъти, или това съответствува на намаляването на звуковото налягане с 60 db, и това време се нарича време на стандартна реверберация. Определя се по формулата:

$$T = 0,163 \frac{V}{A_{\text{общо}}} \quad (4.13)$$

Обикновено може да бъде определена плътността на енергията на прекия звук $\epsilon_{\text{пр.}}$ и тази на отразения звук $\epsilon_{\text{отр.}}$, а общата плътност е:

$$\epsilon = \epsilon_{\text{пр.}} + \epsilon_{\text{отр.}} \quad (4.14)$$

Плътността на енергията при сферичното излъчване на разстояние r от източника е:

$$\epsilon_{\text{пр.}} = \frac{W}{4\pi r^2 c} \quad (4.15)$$

От своя страна плътността на енергията на отразената вълна е:

$$\epsilon_{\text{отр.}} = \frac{4W(1 - \alpha_{\text{пр.}})}{c \cdot A_{\text{общо}}} \quad (4.16)$$

Общата плътност е:

$$\epsilon = \frac{W}{c} \left(\frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4}{B} \right) \quad (4.17)$$

Тук $B = \frac{A_{\text{общо}}}{1 - \alpha_{\text{пр.}}}$ - константа на помещението

В съответствие с тази формула близо до източника нивото намалява с 6 db при удвояване на разстоянието. Зоната в която е в сила тази зависимост се ограничава в така наречения граничен радиус, който представлява разстоянието от източника на звук, на което звуковото налягане на прекия и отразен звук се изравняват:

$$r_{гр.} = \sqrt{\frac{B}{50}} \quad (4.18)$$

Съгласно статистическата акустика нивото на звуковото налягане в зоната на прекия звук и в зоната на отразения звук се определя по формулата:

$$L = L_w + 10 \lg \left(\frac{\Phi}{\Omega r^2} + \frac{4}{B} \right) \quad (4.19)$$

Φ - фактор на насоченост, представляващ отношението на интензивността създадена от даден източник в дадена точка на пространството и интензивността, която би създал източник със същата мощност, разположен в същата точка, но ненасочен.

Ω - телесният ъгъл, в който се излъчва звука.

От казаното до тук могат да бъдат направени следните **изводи**:

- *Вълновата акустика* дава точни решения, но сложността на изчисленията ограничава приложението и до областта на ниските честоти.

- *Геометричната акустика* дава нагледна представа за характера на разпространението на звука и позволява количествено да се оцени влиянието на формата и размерите на помещението, разположението на звукопоглъщателите и др., но работата по този метод е сложна и трудоемка.

- *Статистическата акустика* позволява достатъчно точно да се решават задачите за помещения с малко звукопоглъщане и за високочестотния диапазон. При големи разлики в размерите на помещението и при неравномерно разположение на поглъщателите този метод не е много точен, но може да бъде използван с помощта на емпирични поправки.

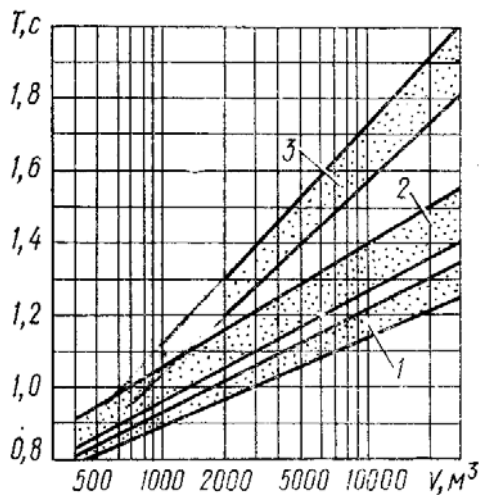
4.2. ФАКТОРИ, ОПРЕДЕЛЯЩИ АКУСТИКАТА НА ЗАЛИ

4.2.1. Време на реверберация.

Времето на реверберация е един от основните критерии за акустичното качество на залите. То (времето на реверберация) зависи от големината на помещението и от коефициента на отражение на заграждащите го повърхности. Колкото по-голямо е помещението, толкова по-голяма е средната дължина на свободния пробег на звуковата вълна между две отражения $l_{ср.}$ и толкова по-малък ще бъде броя отражения за единица време n . Това довежда до по-бавно затихване на звука:

$$l_{ср.} = \frac{4V}{S_{общо}} \quad (4.20)$$

$$n = \frac{c S_{общо}}{4V} \quad (4.21)$$



Фиг.4.3

V - обем на помещението

Формула 4.13 е вярна за стойности на коефициента на звукопоглъщане $\alpha_{ср.} \leq 0,2$. За стойности на този коефициент $\alpha_{ср.} > 0,2$ е валидна формулата:

$$T = 0,163 \frac{V}{S_{общо} \ln(1 - \alpha_{ср.})} \quad (4.22)$$

Особено голямо е времето на реверберация в помещения с голям обем и околни повърхности с малък коефициент на звукопоглъщане. Такива помещения са кънтящи. С намаляване на обема на помещението се увеличава броя отражения за единица време и времето на реверберация намалява, защото при всяко отражение се поглъща част от енергията на звука. Ако коефициентът на звукопоглъщане на заграждащите повърхности е голям, времето на реверберация става твърде малко и помещението е " глухо ".

За определяне на времето на реверберация на едно помещение е необходимо да знаем неговия обем V в кубични метри, общата площ на заграждащите повърхности $S_{\text{общо}}$ в квадратни метри и еквивалентната площ на звукопоглъщане $A_{\text{общо}}$, която се определя за честоти 125 , 500 и 2000 Hz.

$$A_{\text{общо}} = \sum \alpha_i S_i + \sum A + \alpha_{\text{доп.}} S_{\text{общо}} \quad (4.23)$$

Тук α_i и S_i са коефициентите на звукопоглъщане и площите на отделните повърхности.

$\sum A$ -сумата на еквивалентните площи на звукопоглъщане от зрителите и мебелировката

$\alpha_{\text{доп.}}$ -среден коефициент на допълнително звукопоглъщане от осветителна апаратура, допълнителни въздушни обеми, свързани със залата, вентилационни решетки, процепи и др. За честота 125 Hz $\alpha_{\text{доп.}} \approx 0,8-0,9$, а за 500 и 2000 Hz- $\alpha_{\text{доп.}} \approx 0,04-0,05$.

Определеното по горната формула време за реверберация се сравнява с оптималното за даден тип зала (фиг.4.3) и ако е необходимо се извършват корекции в звукопоглъщането на повърхностите в залата. Тук зона 1 отговаря на лекционни зали и чакални, 2-на драматични театри, многоцелеви зали и кина и 3- на оперни театри и концертни зали.

За честотите под 500 херца се допуска увеличаване на времето на реверберация, като за 125 херца може да е до 40% по-голямо от това на 500 херца. Ако времето на реверберация е по-голямо от оптимално, трябва да се увеличи звукопоглъщането в залата до получаване на нужното време на реверберация и обратното-при време на реверберация по-малко от необходимото трябва да се намали звукопоглъщането.

4.2.2.Времева структура на отраженията.

Голямо влияние върху чуваемостта и разбираемостта на говора и възприемането на музиката оказват ранните отражения на звука и по-специално тяхното ниво и време на закъснение спрямо прекия звук. Процеса на затихване на звуковата енергия може да се представи като съставен от два неравностойни времеви интервала - малък начален, чиято енергия повишава качеството на звучене на музиката или разбираемостта на говора, и по-дълъг завършващ, чиято звукова енергия определя отзвучаването (кънтенето) на помещението. Трябва да се има пред вид, че дължината на полезния участък е различна за музиката и говора, а дори и за различните видове музика.

Като критерий най-често се използва разликата между времето на пристигане на прекия звук и първото отражение. Обикновено то е от 0,01 до 0,03 сек., или разликата в пътя на прекия и отразен звук е 7-10 м. Времевите интервали между следващите отражения също не трябва да надвишават тази стойност.

4.2.3.Разбираемост.

В залите, предназначени за слушане на говор (аудитории, драматични театри) основно значение има разбираемостта на говора, която се оценява по процента

правилно приети думи или срички от всички произнесени. Разбираемостта бива сричкова и фразова, в зависимост от това, дали се приемат срички или фрази. Определянето и става по експериментален път, като диктора бавно четете от специална таблица безсмислени срички или фрази, а слушателите, които се подбират между хора с нормален слух и намиращи се в различни точки на залата ги записват. Ако в залата сричковата разбираемост е 85 до 95%, то разбираемостта е отлична. Ако тя е в границите от 75 до 85%, се приема за добра, при 65 до 75% е удовлетворителна, а под 65% – неудовлетворителна. На 65% сричкова разбираемост съответствува 90% фразова разбираемост.

На разбираемостта оказват влияние следните основни фактори:

- Време на реверберация (коефициент k_1)
- Ниво на гръмкостта на речта (коефициент k_2)
- Отношение сигнал шум (коефициент k_3)
- Форма и размери на залата (коефициент k_4)

Процентът сричкова разбираемост се определя по формулата:

$$PR=96k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \quad (4.24)$$

Поради субективния характер на разбираемостта, определената по тази формула стойност е приблизителна, но е много полезна за избягване на груби грешки още при проектирането на залата.

Стойност на k_1 равна на 1 се получава при време на реверберация $T=0,8\pm 0,5s$. При увеличаване на T разбираемостта пада с 10% за всяка секунда време. Следователно, ако $T=4$ сек. , то $k_1=0,65$ и PR ще бъде неудовлетворително, даже ако всички останали коефициенти са 1.

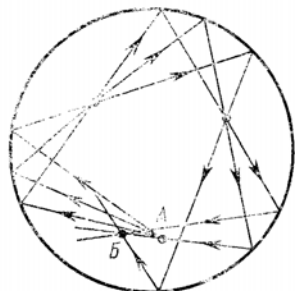
При ниво на звука 70 до 80 db разбираемостта е най-добра и тогава $k_2=1$. При увеличаване на нивото на звука до 100 db или намаляването му до 60 db k_2 спада до 0,95. Ниво 50 db $k_2=0,9$, при 40 db $k_2=0,8$ и при 30 db $k_2=0,65$.

Ако отношението сигнал шум (SNR) е равно на 1, т.е. полезния сигнал и шума са с еднакви нива, коефициента k_3 има стойност 0,6 до 0,7. При $SNR=1,43$, $k_3=0,8$, при $SNR=1,7$ $k_3=0,85$, при $SNR=2,5$ $k_3=0,9$ и при $SNR=5$ $k_3=0,95$. Ако отношението SNR стане равно на 10, k_3 става 0,98.

За големи зали $k_4=0,9$ до 0,95, а за сравнително малки зали с правоъгълна форма $k_4=1$.

4.2.4.Форма на залата.

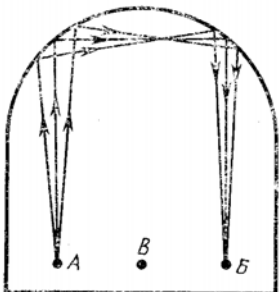
Оценката на влиянието на формата и размерите на залата става с методите на геометричната акустика, като при това се спазват ограниченията, произтичащи от отношението на размера и радиуса на кривина към дължината на вълната.



Фиг.4.4

Когато разликата във времето на пристигане на прекия и отразен звук стане по-голяма от 0,05 сек. човешкото ухо отделя тези звуци и се получава възприятие за ехо. За да се получи това, трябва разликата в пътищата на прекия и отразен звук да бъде по-голяма от 17 м., което означава, че ехо може да се получи в големи помещения. Има, обаче, случаи, когато и в малки помещения може да се получи ехо. Един от тези случаи е получаването на така нареченото "треперливо" ехо. Това ехо се получава в малки помещения с успоредни стени при малък коефициент на звукопоглъщане – там ехото се получава за сметка на многократни отражения, при което отразената вълна изминава път по-дълъг от 17 м. За избягването на треперливото ехо се увеличава звукопоглъщането на успоредните стени (или поне на една от тях) с помощта на обработката им със звукопоглъщащи материали.

Друг случай, при който е възможна поява на ехо в малко помещение е кръгло помещение, чиито стени са с малък коефициент на звукопоглъщане (фиг.4.4.). За сметка на многократното отражение дори при диаметър на помещението 10 м., разликата в пътя за пряката и отразена вълна между точка А, където се намира излъчвателя и точка В, където се намира слушателя, е достатъчна за получаване на отчетливо ехо, а в точките Φ_1 и Φ_2 се получава фокусиране и вследствие на това – усилване на звука.



Фиг.4.5

Вдлъбнатите и сводести повърхности с малко звукопоглъщане спомагат за концентриране на енергията в определени точки. Ако източникът на звук се намира в центъра на кривината, отраженията се концентрират в центъра на кръга. Ако източникът се доближава до повърхността (до $0,5R$) кръговата повърхност отразява като елиптична т.е. фокуса се намира зад центъра на кръга. Когато източникът достигне разстояние $0,5 R$ до отразяващата повърхност, фокусното разстояние става безкрайност и тя отразява като параболична. Ако източникът се доближи още повече до отразяващата повърхност, тя започва да отразява като хиперболична, т.е. фокусът се намира зад отразяващата повърхност.

Ако отражението е от вдлъбнат или куполообразен таван, фокусирането върху пода зависи от отношението между радиуса на кривината и височината на помещението, като най-голяма концентрация се получава при $R=h$. В някои случаи е възможно да се получи двойно фокусиране (фиг. 4.5). Тогава човек, намиращ се в т.В няма да чува тихо говорещ в т.А диктор, докато намиращия се в т.С слушател ще го чува много добре.

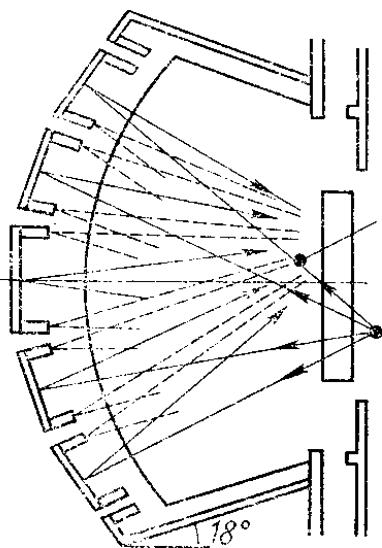
При сложен профил на отразяващите повърхности може да се получи равномерно разпределение на отразената енергия в залата, но наличието на ребра върху отразяващата повърхност довежда до оформянето на зони без отражение.

4.3. ЗАЛИ С ЕСТЕСТВЕНА АКУСТИКА

Залите с естествена акустика са такива зали, в които на се използват електроакустични системи. Те биват:

- лекционни зали
- зали за драматични театри
- зали за опера и балет
- концертни зали
- многоцелеви зали

Основен критерий за оценка на акустичните условия в **лекционните зали** е разбираемостта на говора, а тя, както вече казахме, е свързана с времето на реверберация и времето на закъснение на първите отражения.



Фиг.4.6

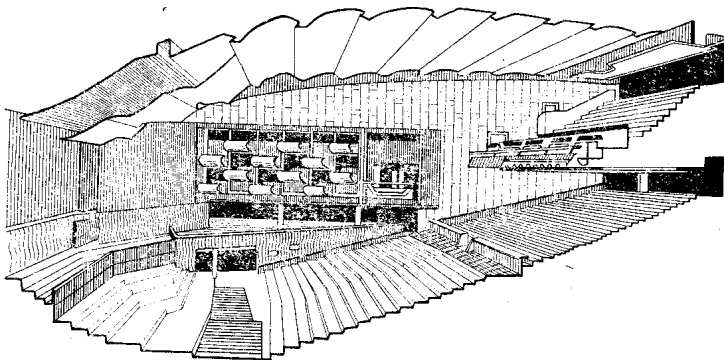
За да имаме добра разбираемост е необходимо първите отражения да закъсняват спрямо прекия звук не повече от $0,03$ сек., или разликата в пътя им не трябва да надвишава 10 м. Времето на реверберация трябва да бъде сравнително малко – от $0,8$ сек. за зали с обем около 500 кубични метра, до $1,1$ сек. за зала с обем 10000 кубични метра. Обемът на този вид зали трябва да бъде съобразен с броя на слушателите като се предвижда по $4,5$ до 6 кубични метра на един слушател .

В големите аудитории и конференц. – зали е целесъобразно местата за слушателите да са разположени амфитеатрално, което не само подобрява видимостта и намалява разстоянието от

катедрата до най-отдалеченото слушателско място, но и съществено подобрява разбираемостта на говора.

При неудачна форма на залата (например, много висок таван) за подобряване на акустичните условия над катедрата или на страничните стени специални отражатели, насочващи звуковата енергия както към близките места така и към втората половина на залата. Тези екрани - отражатели се изработват от материал с ниско α , а тяхната височина и форма се определят от условието, закъснението на звука извън граничния радиус да не бъде повече от 0,03 сек. За целта се използват методите на геометричната акустика.

-Зали за драматични театри. В този вид зали също трябва да се осигури най-напред отчетливост и разбираемост на говора. За целта е необходимо наличието на силен пряк звук, малко закъсняващи отражения, дифузно звуково поле и оптимално време на реверберация, което е от 0,9 сек. за зали с обем около 500 кубични метра до 1,4 сек. за зали с обем 10000 кубични метра. При този вид зали оптималния обем е 4 до 4,5 кубични метра на зрител. Ако стените на такава зала са паралелни се



Фиг.4.7
Концертната зала в Лондон

получава равномерно разпределение на звуковата енергия, но при широчина по-голяма от 20 м. първите отражения в предната половина на залата достигат с недопустимо закъснение - над 0,05 сек., което рязко намалява разбираемостта на говора. Освен това в такива зали е възможно образуването на треперливо ехо. За това най-подходяща е секторната форма на залата (фиг.4.6), при която ъгълът на отваряне на стените е до 10 градуса. В

този случай голямо значение има формата на задната стена, като се препоръчва тя да бъде наклонена. Височината на тавана при този вид зали не трябва да бъде повече от 10 м.

-Зали за опера и балет. При тях основните принципи на проектиране са подобни на тези при залите за драматични театри, като времето на реверберация е с 20 до 25% по-голямо, тъй като разбираемостта е с по-малко значение, а основно място заема изискването за дифузност на звуковото поле.

Характерна форма на много от тези зали е овалната, като за обезпечаване на минималната отдалеченост на последния ред от сцената се налага многоетажност на залата с много балкони с малка дълбочина. Балконите, запълнени със зрители имат голямо звукопоглъщане, което довежда до малка интензивност на отразените вълни и фокусирането им от овалната задна стена не е опасно. Освен това, балконите, разделяйки общата повърхност на стените спомога за разсейването на звуковата енергия, т.е. за създаването на по-дифузно поле.

Оптималният относителен обем на такива зали е 6 до 8 кубични метра на зрител. Закъснението на първите отражения може да бъде до 0,05 сек.

-Концертни зали. Този вид зали се отличават от тези за опера и балет главно по това, че вместо сцена имат естрада, което позволява разполагането на добре отразяващи повърхности близо до нея.

Минималните размери, при които симфоничен оркестър звучи добре са: височина 9 м., широчина 16 м. и дължина 30 м., при размери на естрадата - широчина 16 м. и дълбочина 10 м. Следователно, минималния обем на концертната зала е 5000 кубични метра. Максималните размери могат да бъдат по-големи от тези на предните два вида зали, но при това максималната отдалеченост на зрителите не трябва да надвишава 45-50 м. Закъснението на първото отражение трябва да бъде 0,02 - 0,03 сек.

Времето на реверберация е по-голямо от това на другите две зали и достига 2,2 сек. Големи изисквания има към дифузността на звуковото поле. За неговото осигуряване се използва начупване на стените с ложи и балкони или специфична несиметрична форма на залата или формата на неправилен петоъгълник. Оптималния относителен обем е 6 до 8 кубични метра на зрител.

-Многоцелеви зали. При този вид зали изискванията често са противоречиви, защото трябва да могат да се използват както за лекционни зали, така и за спектакли, музика или кинопрожекции. В някои такива зали се използва електроакустична система, с помощта на която оперативно може да се изменя времето на реверберация (амбифонична система). В други случаи, главно при залите със среден обем се прави разумен компромис между различните акустични изисквания, характерни за различните приложения на залата. Оптималния относителен обем е 4 до 6 кубични метра на зрител. Отношението на дължината на залата към средната широчина трябва да бъде от 1 до 2, като дължина не трябва да превишава 26 м. (без да се взема пред вид сцената). Подобно трябва да бъде и отношението на широчината към височината на залата. Времето на закъснение е 0,02 до 0,03 сек. Конструкцията на залите трябва да бъде такава, че по-голямата част от отразената енергия да се насочва към задната половина на залата. Времето на реверберация трябва да бъде както при залите за драматични театри.

5. ОБЕЗШУМЯВАНЕ

5.1. ОБЩИ СВЕДЕНИЯ

5.1.1. Влияние на шума върху организма на човека

Понятието шум, което в строгия смисъл се дефинира като колебание, чиято амплитуда се изменя безпорядъчно във времето, при обезшумяването се разширява и добива смисъла на нежелан звук. В този смисъл, шум може да бъде и чисто синусоидално колебание, стига то да се разпространява във време и на място където пречи. Така дефинираният шум е вреден, като степента му на вредност варира от предизвикването на леко раздразнение до пълна загуба на слуха. При достатъчно високи нива и продължително въздействие на шума се стига до увреждане на нервната система и пълна загуба на слуха, а при по-краткотрайно въздействие и по-ниски интензивности се получава временно снижаване на чувствителността на слуха, изразяващо се във временно повишаване на прага на чуваемост.

Вредното въздействие на шума върху човешкия организъм не се ограничава само с увреждане на слуха, а чрез слуховите нерви шумовото дразнение се предава на централната и вегетативна нервни системи, като чрез тях въздейства на вътрешните органи, предизвиквайки различни болестни изменения. Човек, подложен на въздействието на силен шум губи средно 10 до 20% повече физически сили и психически усилия за извършване на същата работа, в сравнение с тези при ниво на шума под 70dB. При условията на повишено ниво на шума се наблюдава и увеличаване на скрития период на зрително-моторната реакция т.е. увеличава се времето между зрителното възприемане на даден образ и реакцията на мускулите, което е особено вредно и опасно при шофьорите и другите водачи на транспортни средства, при които може да стане предпоставка за транспортно произшествие.

Дори при ниски нива на шума се проявява неговото влияние върху вегетативната нервна система, като това влияние не зависи от субективното възприятие на шума и се изразява в нарушаване на периферното кръвообращение и повишаване на кръвното налягане.

Работещите в условията на дълготрайно шумово въздействие стават раздразнителни, страдат от главоболие, виене на свят, влошаване на паметта, бързо се уморяват, нямат апетит, болят ги ушите, в различна степен загубват слуха си и т.н.

Вредното въздействие на шума нараства с увеличаване на честотата и нивото му, като при импулсни и неперидични шумове степента на въздействие се повишава.

Съгласно стандарта ISO-1999-75 нивото на шума 80dB (A) съответства на нулев риск за загуба на слуха. Въз основа на тези данни е въведено понятието ниво на дразнещия шум:

$$L_d = L_{\text{екв.}} + 2,56\tau \quad (5.1)$$

Тук $L_{\text{екв.}}$ е еквивалентното ниво на постоянния шум, което ще разгледаме в следващия раздел, а τ е коефициент на нормалното отклонение на моментните стойности на шума.

5.1.2. Измерване на шума

Преди да разгледаме нормите за шумност, трябва да се запознаем с методите за измерване на шума. То става с помощта на специални уреди, наречени шумомери. Те съдържат измервателен микрофон, обикновено кондензаторен, а в последно време все по-често електретен, който също е вид кондензаторен микрофон, но е по-удобен за работа, понеже не изисква високо постоянно поляризиращо напрежение. Независимо от това, кой от двата типа е микрофонът, той изисква съгласуващо стъпало с много високо входно съпротивление, което с цел намаляване на индуктираните шумове и входния капацитет се монтира непосредствено до капсула. Сигналът, получен от измервателния микрофон се измерва от специална измервателна система, представляваща електронен волтметър, измерващ точната ефективна стойност на сигнал с произволна форма (квадратичен волтметър). Обикновените волтметри, които в същност измерват средната изправена стойност, се градуират за ефективна стойност като се използва факта, че за синусоидално напрежение двете стойности са свързани с един постоянен коефициент. За напрежения, чиято форма е различна от синусоидалната, този коефициент е друг, а за напрежение със случайно изменяща се форма такъв постоянен коефициент не съществува и това прави волтметрите с обикновен диоден изправител непригодни за измерването им. Волтметрите на точна ефективна стойност съдържат специален преобразувател, реализиращ математическата операция :

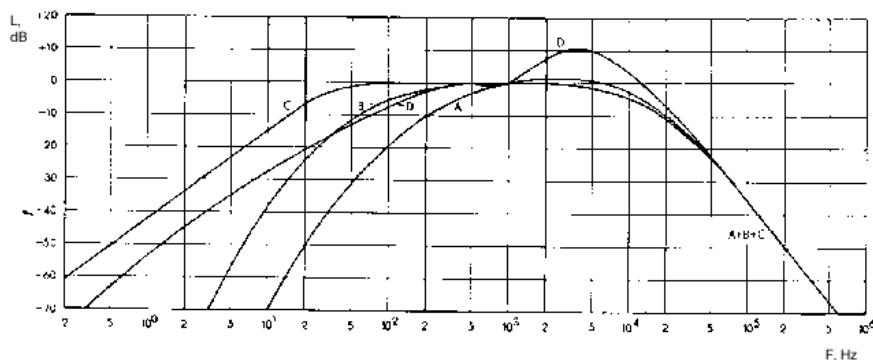
$$U_{\text{изх.}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U_{\text{Вх.}}^2 dt} \quad (5.2)$$

Това представлява математическият израз за връзката между напрежението с произволна форма и неговата ефективна стойност.

Обикновено скалата на измервателният уред на шумомера се градуира в децибели спрямо прага на чуваемост за 1 kHz - $2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ и следователно тя е логаритмична и показва директно нивото на звуковото налягане

Най-просто би било да се измерва пълното ниво на звуковото налягане, но такова измерване не дава представа нито за честотното разпределение на енергията на шума, нито за неговото възприемане от човека. Затова в апаратурата за измерване на шум се въвеждат коригиращи филтри, чиито честотни характеристики се означават с буквите A, B, C и D (фиг.5.1).

Международно е прието резултатите от измерването, проведено по една от тези криви

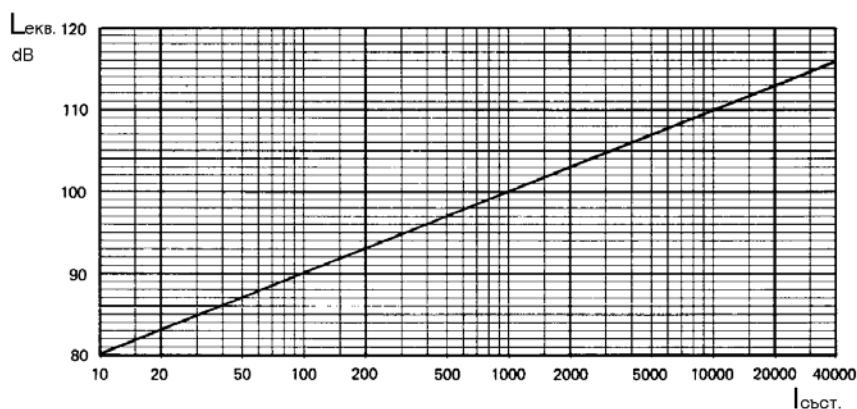


да се означава със съответната буква в скоби след означението за децибел - dB (A), за измерване с филтър с честотна характеристика тип A и съответно dB (B), dB (C) и dB (D).

Фиг.5.1

Характеристиката на филтъра А има сходство с обърнатата крива на равната гръмкост и измереното с този филтър ниво най-добре отразява възприятието на шума от човека. Крива В е по-разширена в нискочестотната област, докато крива С зависи сравнително слабо от честотата в областта на чуваемите честоти. Честотната корекция по крива D е предназначена за измерване на авиационен шум. Последователното измерване на един и същи шум с различни коригиращи филтри позволява по разликата в нивото да се определи ролята на нискочестотните съставляващи в спектъра на изследвания шум.

Когато изследването се прави за целите на обезшумяването е необходима информация за честотния спектър на шума за да се види разпределението на енергията по честота. За целта се извършва честотен анализ с помощта на уреди, наречени честотни анализатори. Те измерват нивото на шума в тесни ленти - октава,



Фиг.5.2

$L_{екв}$ -еквивалентно ниво на непрекъснатия шум

$I_{сът}$ -съставен индекс на шумовата експозиция

терца или по-тесни и в зависимост от това биват съответно терцови, октавни и теснолентови. В някои случаи те се включват като блок към шумомерите. В зависимост от принципа на осъществяване на честотния анализ те биват филтърни и изчислителни.

Филтърните анализатори съдържат система от филтри, пропускащи измерваната честотна лента, след които е включена

измервателната система. В процеса на измерването към входа на измервателната система се превключват последователно филтрите и по този начин се изследва спектралният състав на шума. При анализаторите, съдържащи система от превключваеми ръчно филтри не е възможно извършването на честотен анализ в реално време и в такъв случай, особено когато шумът е с непостоянен спектър, за удобство шумът се записва на специален магнитофон, а самия честотен анализ се прави в лабораторна обстановка. Съществуват честотни анализатори, при които изходът на филтрите се превключва с голяма скорост към входа на измервателната система и резултатите се изобразяват на екран. Конструираните на този принцип честотни анализатори са обемисти и тежки, които ги прави пригодни за работа само в лабораторна обстановка.

Съвременните компютърни анализатори използват така нареченото бързо преобразуване на Фурие и извеждат информацията на екрана на дисплей в графичен вид в реално време. Разработени са за целите на озвучаването упростени варианти на този вид анализатори, които се използват при настройка на звукотехнически системи.

5.1.3. Норми за шумност

Болшинството от методите за оценка на шумността се базират на допустимите нива на шума, абстрахирайки се от времето на въздействие. Известно е, че времето на въздействие има голямо значение за евентуалното увреждане на слуха.

Понастоящем в международната практика съществуват два метода за определяне на шумността, като първият е свързан с опасността от увреждане на слуха, а втория - с дразнещите ефекти на същия. Съответно съществуват два вида норми за шумност -

такива, свързани с възможното увреждане на слуха и такива, свързани с шумовото дразнение.

Първият метод и неговите варианти са основани на понятието еквивалентно ниво на непрекъснатото звуково налягане за една седмица (или друг период от време) в dB (A). При това се приема, че една работна седмица се равнява на 40 работни часа. Това еквивалентно ниво се определя по следния начин: на даденото работно място се измерват пълните времена, през които нивото на шума е равно на определени дискретни стойности. След това по таблица 5.1 се отчитат частните индекси на времето на експозиция за всяко ниво.

табл. 5.1

Продължителност на шума за седмица		Ниво на звука в dB (A) - средна точка на класа								
часове	минути	80	85	90	95	100	105	110	115	120
	10					5	15	40	130	415
	12					5	15	50	160	500
	14					5	20	60	185	585
	16					5	20	65	210	665
	18					10	25	75	235	750
	20					10	25	85	265	835
	25				5	10	35	105	330	1040
0,5	30				5	15	40	125	395	1250
	40				5	15	55	165	525	1670
	50				5	20	70	210	660	2080
1	60			5	10	25	80	250	790	2500
	70			5	10	30	90	290	920	2920
	80			5	10	35	105	330	1050	3330
1,5	90			5	10	40	120	375	1190	3750
	100			5	15	40	130	415	1320	4170
2	120			5	15	50	160	500	1580	5000
2,5				5	20	65	200	625	1980	6250
3				10	25	75	235	750	2370	7500
3,5			5	10	30	90	275	875	2770	8750
4			5	10	30	100	315	1000	3160	10000
5			5	15	40	125	395	1260	3950	12500
6			5	15	45	150	475	1500	4740	15000
7			5	20	55	175	555	1750	5530	17500
8			5	20	65	200	630	2000	6320	20000
9			5	25	70	225	710	2250	7110	22500
10		5	10	25	80	250	790	2300	7910	25000
12		5	10	30	95	300	950	3000	9490	30000
14		5	10	35	110	350	1110	3500	11100	
16		5	15	40	125	400	1260	4000	12600	
18		5	15	45	140	450	1340	4500	14200	
20		5	15	50	160	550	1500	5000	15800	
25		5	20	65	200	625	1980	6250	19800	
30		10	25	75	235	750	2370	7500	23700	
35		10	30	90	275	875	2720	8750	27700	
40		10	30	100	315	1000	3150	10000	31600	

Сумата от частните индекси се нарича съставен индекс на нивото на излъчвания шум. По него от графиката на фиг.5.2 се отчита еквивалентното ниво на звуковото налягане на непрекъснат шум, което се сравнява с нормата от съответните документи, като например БДС 14478-82.

При използването на този метод трябва да се има предвид следното:

- методът не може да се използва при импулсни шумове, състоящи се от единични импулси с дължина по малка от 1 сек. (например изстрели от огнестрелно оръжие);

- при импулсни шумове, съставени от поредици шумови импулси с приблизително еднакви амплитуди (например шум при коване), апроксимацията на частния индекс се основава на ниво което е с 10 dB по-високо от измереното звуково налягане. Ако тези шумове имат коригирано ниво по-малко от 80 dB те могат да бъдат пренебрегнати;

- ако общата продължителност е по-малка от 10 мин., то тя се приема за 10 мин.

При звуково ниво, определено по този начин, по-високо от 85-95 dB съществува опасност от увреждане на слуха на работника.

Втората група методи е свързана с дразнещото влияние на шума, при което се намалява разбираемостта на говора, по-бързо настъпва умора, намалява се производителността и т.н.

Както вече споменахме, шумът може да бъде дразнещ и когато неговото ниво не е достатъчно, за да бъде опасен за слуха. Докато при високите нива на шума неговия дразнещ ефект е свързан с абсолютното му ниво, при ниски нива този ефект е свързан с разликата между нивото на шумовия фон и дразнещия шум.

За уличен шум в жилищни квартали се препоръчва ниво на шума 35 до 45 dB (A), като за различни местонахождения се въвежда поправка съгласно табл. 5.2, а в зависимост от времето в денонощието се въвежда още една поправка съгласно табл.5.3

табл.5.2

Местонахождение на обекта	Поправка
Селска улица, район около болница, зона за отдих	0
Предградие	+5
Градски жилищни квартали	+10
Градски жилищни квартали близо до заводи или оживени улици; офиси	+15
Градски район - офиси и търговски площи	+20
Промислен район	+25

73

Табл.5.3

Време на денонощието	Поправка
Денем	0
Привечер	-5
Нощем	-10 до -15

Шумът вътре в дадено помещение се получава с помощта на поправка съгласно табл.5.4, а за нежилищни помещения се препоръчват нормите от табл. 5.5.

табл.5. 4

Положение на прозорците	Поправка
Отворени	-10
Единични затворени	-15
Двойни затворени	-20
Неотваряеми	-20

табл.5.5

Вид помещение	Индекс на шумност
Голям офис, склад, универсален магазин, зала за заседания, тих ресторант	35 dB (A)
Голям ресторант, секретариат (с пишещи машини)	45 dB (A)
Машинописно бюро	55 dB (A)
Производствени цехове	45 до 75 dB (A)

В зависимост от някои особености на шума се въвеждат още едни корекции, съгласно табл.5. 6.

Характерни особености на шума		Поправка
Пик фактор	Импулсен шум	+5
Характер на спектъра	Присъстват съставки с чуваем тон	+5
Продължителност на шума	100 - 55 %	0
с ниво L_A (проценти от времето)	55 - 18 %	0
	18 - 6 %	10
	6 - 1,8 %	15
	1,8 - 0,6 %	20
	0,6 - 0,2 %	25

5.2. ОСНОВНИ ПОНЯТИЯ

Причина за възникване на шум в сградите могат да бъдат както външни, така и вътрешни източници. **Вътрешните източници** могат да бъдат:

- инженерно и санитарно-техническо оборудване - машини, асансьори, помпи за парно отопление, водопроводи и др.;
- битови шумове като музика, танци, високи разговори и др.;

Външните шумове идват от:

- транспорт;
- промишлени предприятия и близки строежи;
- други източници;

Ако източника на шум не е свързан с конструкцията на сградата (например високоговорител, говор на човек, шум от самолет), такъв шум се нарича **въздушен**, защото се предава по въздуха. В такъв случай предаването на шума във вътрешността на сградата става в резултат на разколебаването на стените и прозорците на помещението като мембрана или шумът прониква през отвори и процепи в стените, прозорците и вратите.

Когато шумът е резултат на удари по междуетажните плочи - ходене, танци, ремонтни работи и др., шумът се нарича **ударен** и предаването му става в резултат на разколебаване на конструкцията, която на свой ред излъчва в интересувашото ни помещение.

В случая когато разколебаването на конструкцията е предизвикано от свързан с нея механизъм - машина, помпа, асансьорен механизъм - или се предава чрез фундамента на сградата от външен източник (вибрации от тежки транспортни машини) шумът се нарича **структурен**.

Пътищата за предаване на шума в изолируемото помещение могат да бъдат:

- **преки** - когато шумът прониква през стена, съседна за помещението и пространството, в което възниква шума или когато вибриращия механизъм е закрепен на стена, обща с изолируемото помещение;

- **косвени** - при които не са спазени горните условия. При косвените пътища шумът отслабва значително, в следствие на поглъщането му от преходите между отделните елементи на конструкцията.

Намаляването на шума става по два основни начина:

- **звукоизолация** - представлява комплекс от мерки, които се вземат за да не може шумът да достигне до изолируемото пространство;

- **звукопоглъщане** - чрез прилагането на звукопоглъщащи конструкции се цели намаляването на отразения звук и понякога поглъщане на прекия звук в определени точки на пространството. Звукопоглъщането се осъществява вътре в самото обезшумявано помещение.

5.3. ЗВУКОИЗОЛАЦИЯ

5.3.1. Изолация на въздушния шум чрез ограждащите конструкции

5.3.1.1. Изолация чрез еднослойни конструкции

Еднослойни са конструкциите, състоящи се от един монолитен слой или от няколко твърдо свързани по между си слоя – например стена и мазилка.

Изолацията на въздушния шум (в dB) при дифузно падане на звука е:

$$R = 10 \lg \frac{1}{\tau} \quad (5.3)$$

τ – коефициент на звукопредаване.

Основно влияние върху предаването на звука оказват вълните на огъване които се образуват, ако дебелината на конструкцията е по-малка от $\lambda_{ог.}/6$. В нормалния честотен обхват това условие е изпълнено за всички стени и те могат да се разглеждат като тънки безкрайни мембрани. Звуковите вълни падайки върху конструкцията оказват натиск, който я привежда в колебателно движение. На ниски честоти, близо до собствените честоти на колебание на конструкциите възникват резонансни явления и звукоизолацията зависи до голяма степен от вътрешното триене в материалите. Този диапазон е под 100Hz и не е характерен за ограждащите стени на сградите. На по-високите честоти колебателното движение на конструкцията се определя основно от масата, като конструкцията може да се разглежда като система от несвързани помежду си маси, които трептят независимо една от друга т.е. можем да пренебрегнем твърдостта на конструкцията (закон на масата). Съгласно това предположение, при удвояване на масата или честотата, звукоизолацията нараства с 6 dB.

За леките конструкции експерименталните данни в много случаи показват значително по-малки стойности на звукоизолацията. Това се обяснява с теорията на така наречените вълнови съвпадения. Тя се състои в следното:

Падащите звукови вълни предизвикват колебания на огъване в конструкцията, тъй като звуковото налягане не е еднакво в различните точки. Скоростта на разпространение на вълните на огъване зависи от механичните свойства на средата и от честотата, докато скоростта на звука във въздуха не зависи от честотата. За ниски честоти скоростта на разпространение на вълните на огъване е по-малка от скоростта на звука във въздуха. При увеличаване на честотата се достига една честота $f_{гр.}$ дължината на вълната на огъване става равна на проекцията на дължината на вълната на звука във въздуха (при перпендикулярно падане на вълната проекцията на $\lambda_{възд.}$ е нула, а при успоредно движение на звуковата вълна спрямо стената проекцията на дължината на вълната е равна на самата дължина на вълната). При $f_{гр.}$ ще се получи съвпадение на двете дължини на вълните – на огъване и на проекцията на въздушната вълна, при което амплитудата на колебанията на огъване рязко ще нарастне. При други честоти вълновото съвпадение може да се получи при друг ъгъл на падане. При вълновото съвпадение разпределението на налягането в падащата вълна по дължината на стената точно съответства на разпределението на амплитудите на собствените ѝ колебания за същата честота. Граничната честота за монолитни плочи е:

$$f_{гр.} = \frac{c^2}{1,8c_1 h} \quad (5.4)$$

тук: c – скорост на звука във въздуха;

c_1 – скорост на разпространение на вълните на огъване в конструкцията;

h – дебелина на конструкцията.

Скоростта на вълните на огъване е:

$$c_1 = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\mu^2)}} \quad (5.5)$$

където E – модул на еластичност на материала;
 μ – коефициент на Пуасон;
 ρ – плътност на средата.

Честотният диапазон в който звукоизолацията рязко намалява е от $f_{гр}$ до $2f_{гр}$. Нарастването на звукоизолацията след този диапазон е малко по-бързо отколкото по закона на масата – 7,5 dB/окт.

Характерната честотна зависимост на звукоизолацията дава възможност за достатъчно проста графо-аналитична методика за определянето ѝ.

5.3.1.2. Звукоизолация чрез многослойни конструкции

Многослойни конструкции са стените с отделени гъвкави плоскости, двойните конструкции, отделени с въздушна междина и междуетажните плочи. В качеството на отделни гъвкави плочи могат да се използват фазер, гипсофазер и др. отделени от стената с летви или трупчета, за предпочитане със звукоизолационни подложки към стената. Приложението на тези конструкции е свързано с по-малкото излъчване на плочата при честоти под граничната честота поради периодичното преразпределение на енергията от един участък на плочата, към друг участък и обратно, при което енергията, излъчвана от плочата не се отнася от звуковата вълна, а остава "свързана" с нея във вид на кинетична енергия на определен обем от средата.

При многослойните конструкции голямо влияние оказват косвените пътища на предаване на шума, които влошават звукоизолацията с 7-8 dB.

Звукоизолацията на двойните конструкции на ниски честоти е равна на звукоизолацията на еднослойна конструкция с маса, равна на сумарната маса на двата елемента. С повишаването на честотата в характеристиката на звукоизолацията се получават последователни минимума и максимуми. Периодичното влошаване на звукоизолацията се обяснява с резонансите на въздушния слой между елементите на конструкцията. То може да бъде намалено чрез поставянето на звукопоглъщащ материал във въздушната междина. Подобряването на звукоизолацията малко зависи от размерите на въздушната междина когато тя е по-голяма от 40 мм.

Изоляцията на въздушния шум от междуетажните плочи се определя основно от самата носеща плоча, като допълнителните покрития, като паркет, балатум и мокет също допринасят за увеличаването на звукоизолацията, но в по-малка степен.

Прозорците и вратите поради по-малката си маса и непълна херметичност винаги имат по-лоша звукоизолация от стените. Общата звукоизолация на конструкцията $R_{общо}$ може да се определи по формулата:

$$R_{общо} = R - 10 \lg \frac{\frac{S}{S_1} + 10 \frac{R - R_1}{10}}{1 + \frac{S}{S_1}} \quad (5.6)$$

тук R – звукоизолация на основната част от конструкцията;
 S – площ на основната част на конструкцията;
 S_1 – площ на прозорците и вратите;
 R_1 – звукоизолация на прозорците и вратите.

Освен от прозорците и вратите, звукоизолацията се влошава и от наличието на отвори и процепи като това влошаване зависи главно от отношението на размерите на отвора към дължината на вълната. Ако това отношение е близко до 1, то преминалата през отвора звукова енергия е пропорционална на площта на отвора. Общата звукоизолация на конструкцията при наличието на такива отвори се определя по формулата:

$$R_{\text{общо}} = R - 10 \lg \frac{1 + \frac{S_1}{S} 10^{\frac{R}{10}}}{1 + \frac{S_1}{S}} \quad (5.7)$$

Означенията са аналогични на предната формула, като елементите отнасящи се за прозорец сега се отнасят за отвор.

От тези две формули се вижда, че колкото е по-голямо R , толкова повече ще се влоши звукоизолацията при наличие на отвори. Затова при $\frac{S_1}{S} \ll 1$ стойността на $R_{\text{общо}}$ практически е:

$$R_{\text{общо}} = 10 \lg \frac{S}{S_1} \quad (5.8)$$

При наличието на няколко източника на шум, разположени зад различни заграждащи конструкции общото ниво на звуковото налягане в разглежданото помещение е:

$$L = 10 \lg \sum_{i=1}^n S_i 10^{\frac{L_i - R_i}{10}} - 10 \lg A \quad (5.9)$$

S_i – площ на заграждащите конструкции;

L_i – нива на звуковото налягане зад заграждащите конструкции;

R_i – звукоизолация на конструкциите;

A – еквивалентна площ на звукопоглъщане.

За практиката е достатъчно да се определи не честотната характеристика на нивата на звуковото налягане, а средната стойност на L .

Звукоизолацията на ударния шум става с помощта на покрития, поставяни върху носещата плоча, като например мокет, който поглъща голяма част от енергията на удара като се деформира.

По-добра изолация на този вид шум се получава при използването на многослойна конструкция, представляваща еластичен слой, поставен върху носещата плоча и върху него поставен твърд слой – дюшеме, паркет и др. В някои особени случаи се поставят и специални пружиниращи елементи. Звукоизолиращите материали след няколко месеца или години постепенно променят свойствата си и звукоизолацията намалява с 2 до 6 dB.

5.4. Звукопоглъщане

Когато шумът не може да бъде изолиран или намален на мястото на възникването си, в самото помещение се прилага звукопоглъщане. Този метод е ефикасен при незначително начално звукопоглъщане – коефициента на звукопоглъщане за 1000 Hz да е под 0,25. Практическото намаляване на шума при този метод е около 6 до 8 dB.

Най-голяма ефективност на звукопоглъщането може да се получи в точките, разположени в зоната на отразения звук (далече от източниците) където звуковото поле се определя изключително от енергията на отразения звук.

Намаляването на нивото на шума за сметка на звукопоглъщането се увеличава с намаляването на обема на помещението. Но по-голямо значение от обема има височината на помещението. Ефективността на звукопоглъщането за производствени помещения с голяма площ на пода при сравнително малка височина зависи от отношението на разстоянието между източника на шум и изследваната точка към

височината на помещението. При $\frac{L}{H}=0,5$ ефективността на звукопоглъщането е 2 до 4 dB, при $\frac{L}{H}=2$ тя е 10 dB, а при $\frac{L}{H}=6$ - 12 dB.

За постигане на най-голям ефект от звукопоглъщането, целесъобразно е да се обработва с поглъщители както тавана на помещението, така и горната част на стените. Препоръчва се при възможност да се поставят напречни висящи паравани с двустранно разположение на поглъщители. Тези диафрагми или паравани от една страна увеличават площта на звукопоглъщане, а от друга страна служат и за екрани. Често се използват и звукопоглъщащи тела, представляващи геометрични тела от звукопоглъщащ материал, които се закачват да висят от тавана на разстояние около 0,5 м. В цеховете е целесъобразно да се разполагат тези тела на минималното възможно разстояние до източника на шума.

Снижението на нивото на звуково налягане вследствие на акустична обработка на производствени помещения в зоната на отразения звук е:

$$\Delta L = 10 \lg \frac{B_1}{B} \quad (5.10)$$

Тук B и B_1 са константи на помещението преди и след обработката. Константата B_1 се определя по следния начин:

Най-напред се определя еквивалентната площ на звукопоглъщане на повърхностите които не са заети от звукопоглъщители - A' по формулата:

$$A' = \alpha_{cp} (S - S_{обл.}) \quad (5.11)$$

където α_{cp} - среден коефициент на звукопоглъщане в помещението преди акустичната обработка и $\alpha_{cp} = \frac{B}{(B+S)}$;

S - сумарна площ на заграждащите повърхности;

$S_{обл.}$ - площта на звукопоглъщаща облицовка.

Следващата стъпка е определянето на сумарното допълнително звукопоглъщане

ΔA по формулата:

$$\Delta A = \alpha_{обл.} S_{обл.} + A_{з.т.} n \quad (5.12)$$

Тук $\alpha_{обл.}$ е коефициента на звукопоглъщане на конструкцията на облицовката;

$A_{з.т.}$ - еквивалентната площ на звукопоглъщане на едно звукопоглъщащо тяло;

n - брой на звукопоглъщащите тела.

Средния коефициент на звукопоглъщане на акустически обработеното помещение е:

$$\alpha_{cp,1} = \frac{(A' + \Delta A)}{S} \quad (5.13)$$

Тогава константата на помещението се определя по формулата:

$$B_1 = \frac{A' + \Delta A}{1 - \alpha_{cp,1}} \quad (5.14)$$

Стойността на B_1 се взема от таблица 5.1 за 1000 Hz, а за да се получи стойността за другите стандартни честоти се умножава по коефициент взет от таблица 5.2.

табл.5. 1

Описание на помещението	B_{1000}, m^2
С малко хора (металообработващи и металургични цехове, машинни зали, изпитателни лаборатории и др.)	V/20
С твърди мебели и много хора или с меки мебели и малко хора (лаборатории, тъкачни и дървообработващи цехове, кабинети и др.)	V/10
С много хора и меки мебели (административни помещения, конструкторски зали, аудитории, чакални, жилищни помещения и др.)	V/6
Помещения със звукопоглъщаща облицовка на тавана и част от стените	V/1,5

82

табл. 5.2

Обем на помещението V, m^3	Множител при стандартни честоти, Hz							
	63	125	250	500	1000			
< 200	0,8	0,75	0,7	0,8	1	1,4	1,8	2,5
200 - 1000	0,65	0,62	0,64	0,75	1	1,5	2,4	4,2
> 1000	0,5	0,5	0,55	0,7	1	1,6	3,0	6,0

5.5. Звукопоглъщащи материали и конструкции

Звукопоглъщащите материали и конструкции се използват за увеличаването на звукопоглъщането в помещения и зали с цел намаляване на времето на реверберация или намаляването на нивото на шума.

Звукопоглъстителите могат да бъдат подразделени на следните групи:

- Порести материали
- Резониращи панели
- Конструкции с перфорирано покритие
- Звукопоглъщащи тела

Звукопоглъщането в порестите материали се дължи на триенето при движението на въздуха в порите на материала, в следствие на което енергията на звуковата вълна се превръща в топлина. Този вид звукопоглъщащи материали обикновено се оформят във вид на листове, които се монтират върху плътния материал на стената или на определено разстояние от нея. Акустичния импеданс на тези материали в болшинството от случаи е по-малко от това на въздуха, докато на плътните материали е по-голяма. Най-добро поглъщане се получава при монтиране на листа от



1. мембрана
2. корпус
3. звукопоглъщащ материал

Фиг.5.3

порест звукопоглъстител на разстояние $\lambda/4$ от стената, малко по-малко при разстояние $\frac{3}{4}\lambda$ и $\frac{5}{4}\lambda$, което се запазва и при по-голямо разстояние. Звукопоглъщането се подобрява и при оформяне на плочите във вид на пирамиди или клинове. За поглъщащ материал, чиито размери са сравними с дължината на вълната коефициентът на

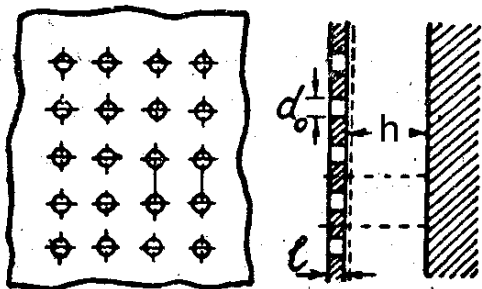
звукопоглъщане зависи от съотношението между размера на плочата и дължината на вълната. Например, при равна звукопоглъщаща повърхност, по-голямо поглъщане се получава с няколко тесни завеси, от колкото с една широка.

Материалът, от който се изработват порестите поглътители бива или зърнест (ситни камъчета, пемза, шлака, керамзит и др., свързани с някакво свързващо вещество) или влакнести (минерална вата, стъклено или високополимерно влакно).

При тях за средни и високи честоти $\alpha = 0,4 - 0,6$.

Резониращите панели биват мембранни и на базата на кухи резонатори.

Мембраните поглътители представляват опъната върху рамка мембрана, изработена от платно, изкуствена кожа и други подобни материали, като в някои случаи се използва дори тънък шперплат. Зад мембраната се намира добре демпфаш материал (пореста гума, дунапрен, строителна вата и др.). Този вид поглътители се наричат щитове на Бекеши (фиг.5.3). При този вид поглътители максимално поглъщане се получава на



Фиг.5.4.

резонансната честота:

$$f_k = \frac{k}{2l} \sqrt{\frac{F}{\rho_n t b}} \quad (5.15)$$

Тук F - сила на опън на мембраната.

t - дебелина на мембраната.

l, b - дължина и широчина на мембраната

k - номер на резонанса.

ρ_n - плътност на материала на мембраната.

Например, за щит на Бекеши с размери 2×1 m с мембрана, изработена от платно с дебелина $0,2$ mm. и плътност 200 kg/m^2 , опънато със сила $1,6 \text{ N}$, резонансната честота е 50 Hz , втората е 100 Hz и т.н. Стойността на α зависи от свойствата на демпфашия материал.

Интерес представляват мембранните резонансни поглътители, представляващи тънки пластмасови панели, върху които с помощта на изтеглена от пластмасовия лист гънка са оформени мембрани с различен диаметър и от там с различна резонансна честота. Това позволява звукопоглъщане в широк честотен обхват с помощта на един панел. При комбинирането на мембранен поглъtitел от този тип с поглъtitел с резонатор на Хелмхолц, описан по-долу в един панел, може да се получи много добър ефект.

Резонансните поглъtitели с кухи резонатори представляват система резонатори на Хелмхолц, в чието гърло е поставен демпфаш материал. (фиг.5.4.)

Резонансната честота на такъв резонатор е:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{lV}} \quad (5.16)$$

където c - скорост на звука.

S - сечение на гърлото

l - дължина на гърлото

V - обем на резонатора

Ако се използва перфориран лист, за който S е сечението на отвората, t - дебелината на листа, h - разстояние до стената, d - разстояние между отворите, а le - еквивалентна дебелина на листа, то:

$$l_c = t + 0,5\sqrt{\pi S} \quad (5.17)$$

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{l_c d^2 h}} \quad (5.18)$$

Ако вместо отворите са направени процепи, то

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{b}{l_c d h}} \quad (5.19)$$

Тук b -широчина на процепа
 d -разстояние между процепите

Коефициентът на звукопоглъщане зависи от активните загуби в гърлото, а те от своя страна зависят от материала, който най-често бива металическа мрежа или тънък слой вата.

Конструкциите с перфориран покривен лист представляват слой порест материал без свързващо вещество, закрити с перфориран метален или пластмасов лист. Честотната характеристика на такава една конструкция се регулира с изменение на дебелината на порестия материал, неговия вид и гъстотата на перфорацията. Този вид конструкции имат по-малко поглъщане от резонансите, но са по-широколентови прости за изработка и монтаж.

Звукопоглъщащите тела представляват перфорирана кутия с кубична, пирамидална или конична форма, запълнена със звукопоглъщащ материал. Те се закачват колкото може по-близо до източника на звук или в зоните на концентрация на звукова енергия. Тяхната ефективност се оценява с еквивалентната площ на звукопоглъщане A .

5.6. Проектиране на обезшумяване

При проектиране на обезшумяване трябва най-напред да се определят очакваните нива на звуково налягане в обезшумяваните помещения преди осъществяването на мероприятията по борба с шума.

Нивата на звуковото налягане в разчетните точки се определят в зависимост от взаимното положение на тези точки и източниците на шум. Разчетните точки се избират на работните места, или на местата където най-често има хора. При това ако на съответното място се работи седнал, височината на разчетната точка се приема 1,2 м., а ако се работи изправен - на височина 1,6 м. Тези точки могат да се намират както в зоната на прекия звук, когато са в близост до източника на шум, така и в зоната на отразения звук - когато са отдалечени от източника на разстояние, по-голямо от критичния радиус. Когато разстоянието от източника е по-голямо от критичния радиус, може да се приеме че звуковото поле е дифузно.

За да се изберат мероприятията по борба с шума трябва да се определи необходимото намаляване на нивото на звуковото налягане във всяка октавна лента. Това намаляване (при работа на всички източници на шум в помещението се определя по формулата:

$$\Delta L = L - L_{\text{норм.}} \quad (5.20)$$

Тук L - ниво на звуковото налягане, създавано от източниците на шум в дадената разчетна точка;

$L_{\text{норм.}}$ - допустимата форма на звуковото налягане в разчетната точка, която се взема от съответния стандарт или норми на ХЕИ.

На базата на необходимото намаляване на нивото на шума се прилагат различните мероприятия. За намаляване на шума е необходимо най-напред да се локализира шумът в самите машини чрез поставяне на звукоизолиращи кожуси върху по-шумните възли като за намаляване масата на кожусите, вътрешната им повърхност се покрива със звукопоглъщащ материал. Отделни, по-шумни машини могат да бъдат изолирани от останалата част на помещението с помощта на заграждащи конструкции или паравани. Понякога е по-целесъобразно, при голям брой шумни машини и малко работници, да се направи вибро и звуко-изолирана кабина с дистанционно управление на машините, в която се разполага обслужващия персонал. С увеличаване на броя на източниците на шум се увеличава и неговото ниво. За по-ефективна борба с шума, там където е технологически възможно се препоръчва групиране на машините по степен на шумност. Ако имаме два източника и нивото на шума предизвикван от единия надвишава това на другия с повече от 6 dB, то шума на по-слабия източник можем да не вземаме в предвид, защото той ще увеличи общия шум с не повече от 1 dB.

Частична изолация на работните места може да бъде осъществена с помощта на екрани. Ефективността на екрана зависи от звукопоглъщането и от отношението на разстоянието между източника на шум и разчетната точка **1** към дължината на помещението L , неговата широчина B и височина H . Екрана е ефикасен и в помещение без звукопоглъщаща обработка на вътрешните повърхности при l/L , l/B и l/H , по-малко от 0,5. При стойност на тези отношения по-голяма от 1, ефекта от екраните даже в помещение със звукопоглъщане е слабо ефективно. Освен това, ефективността на екрана може да се повиши при поставянето му колкото се може по-близо до източника, както и при увеличаване на размерите му. Може да се намали отразената звукова енергия, попадаща в областта зад екрана чрез обработка със звукопоглъщащи материали на съответните повърхности. Или, приложението на екраните е ефикасно при малки стойности на l/L , l/B и l/H , докато звукопоглъщането е по-ефективно при големи стойности на тези отношения. При комплексното им прилагане може да се получи намаляване на нивото на шума с 10 dB. Ако едновременно с това се използват звукопоглъщащи тела, разположени както в близост до източника на шум, така и до екрана, намалението може да достигне над 15 dB. Ако източника на интензивен шум се включва само периодически е възможно прилагането на подвижни прегради, които могат да намалят нивото на шума до 20 dB.

5.7. Активно обезшумяване и индивидуални средства за защита

В някои случаи, когато с други средства шумът не може да бъде намален под нормите, се използват индивидуални средства за защита на слуховия апарат от шума – т.н. антифони. Те представляват две черупки, облицовани от вътре със звукопоглъщащ материал, които закриват ушите и се придържат от специална скоба. Неудобството при по-дълговременна употреба е, че запарват кожата. Освен това, ефективността им за ниски честоти е малка.

Едно ново и перспективно направление в обезшумяването е т.н. активно обезшумяване. То се базира на използването на специална звукоусилвателна уредба, която излъчва възприетия от микрофон околнен шум в противофаза, при което в резултат на полученото акустично късо съединение звукът силно намалява по ниво. За да може да се получи този ефект е необходимо във всяка една точка на обезшумяваното пространство идващите от произволна посока звукови вълни и тези, излъчвани от звукоусилвателната уредба да бъдат в противофаза. И това за целия интересуваш ни честотен диапазон. Това разбира се е невъзможно главно поради разликата в изминатия път на идващата от произволна точка звукова вълна и излъчваната от една точка противофазна вълна, което довежда до допълнително дефазирание. Затова този метод е ефикасен в малки пространства като кабините на транспортни средства и др. подобни и за областта на ниските честоти, където дължината на вълната е голяма и малка разлика пътя на двете вълни не е съществена. Метода е особено ефикасен за създаване на активни антифони, от една страна поради малкия обем, който подлежи на обезшумяване, а от друга страна

поради възможността изолирането на високочестотния шум да става с помощта на звукопоглъщащия материал, който за тази честотна област е достатъчно ефикасен. Когато източника на шум е основно от една посока, разполагането на излъчвателя на противофазен звук между него и обезшумяваното пространство дава добър ефект.

Принципът на активното обезшумяване е приложим и за намаляване на вибрациите, които се предават по конструкцията на сградата. За целта в точките на закрепване на източника на вибрации към конструкцията се поставят вибропреобразуватели – двигатели с достатъчно линейна честотна и фазова характеристики, както и виброприемници, които възприемат вибрациите и ги подават на усилвателя на мощност, а от там в противофаза на вибропреобразувателите – двигатели. По този начин вибрациите се гасят в точките където биха преминали от вибриращия механизъм към конструкцията.

Има опити активна обезшумителна система да се комбинира с озвучителната уредба на автомобила, което би дало възможност сравнително евтино да се постигне добър ефект на обезшумяване, но за целта е необходимо всички звена на тази уредба да имат много линейна честотна и фазова характеристики.