

---

# **АРХИТЕКТУРНА АКУСТИКА**

---

**ИНЖ. СТОЙЧО ХРИСТЕВ**

**София  
2014**



## Съдържание:

1. УВОД .....	1
1.1 Предмет и задачи на дисциплината .....	1
1.2 Кратък исторически преглед.....	1
2. ФИЗИЧЕСКА АКУСТИКА.....	3
2.1 ЗВУК И ЗВУКОВИ ВЪЛНИ.....	3
2.1.1 Физическа същност на звука и звуковите вълни. Видове звук.....	3
2.2 ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ЗВУКА И ЗВУКОВОТО ПОЛЕ.....	4
2.3 ВИДОВЕ ЗВУКОВИ ВЪЛНИ И ТЯХНОТО ОБРАЗУВАНЕ.....	7
2.4 ОСНОВНИ ФИЗИЧЕСКИ ЕФЕКТИ В ЗВУКОВОТО ПОЛЕ.....	11
2.4.1 Затихване и поглъщане на звука.....	11
2.4.2 Дифракция .....	12
2.4.3 Интерференция. Стоящи вълни. ....	12
2.4.4 Пречупване на звука. Рефракция. ....	14
2.4.5 Отражение. ....	14
2.4.6 Ефект на Доплер.....	15
3. ПСИХОАКУСТИКА.....	16
3.1 Субективно слухово възприятие.....	16
3.1.1 Човешко ухо.....	16
3.1.2 Възприятие по ниво.....	18
3.1.3 Възприятие по честота. Ефект на маскировка .....	23
3.1.4 Бинурален ефект.....	25
4. АРХИТЕКТУРНО - СТРОИТЕЛНА АКУСТИКА.....	27
4.1 РАЗПРОСТРАНЕНИЕ НА ЗВУКА В ПОМЕЩЕНИЯ.....	27
4.1.1 Основни понятия.....	27
4.1.2 Основни методи за определяне на параметрите на звуковото поле в архитектурната акустика.....	29
4.1.3 Време на реверберация. Граничен радиус.....	30
4.2 ФАКТОРИ, ОПРЕДЕЛЯЩИ АКУСТИКАТА НА ЗАЛИ.....	32
4.2.1 Време на реверберация.....	32
4.2.2 Времева структура на отраженията.....	34
4.2.3 Разбираемост.....	34
4.2.4 Форма на залата.....	35
4.3 ЗАЛИ С ЕСТЕСТВЕНА АКУСТИКА.....	36
5. ОБЕЗШУМЯВАНЕ.....	39
5.1 ОБЩИ СВЕДЕНИЯ.....	39
5.1.1 Влияние на шума върху организма на човека.....	39
5.1.2 Измерване на шума.....	40
5.1.3 Норми за шумност.....	41
5.2 ОСНОВНИ ПОНЯТИЯ.....	45
5.3 ЗВУКОИЗОЛАЦИЯ.....	45
5.3.1 Изолация на въздушния шум чрез ограждащите конструкции.....	46
5.4 Звукопоглъщане.....	48
5.5 Звукопоглъщащи материали и конструкции.....	50
5.6 Проектиране на обезшумяване.....	52
5.7 Активно обезшумяване и индивидуални средства за защита.....	54
5.8 Изисквания на стандартите.....	54
6. СТУДИЯ.....	56

6.1 Общи сведения. Видове студия. Оптимално време на реверберация.....	56
6.2 ЗВУКОИЗОЛАЦИЯ НА СТУДИЯТА.....	57
6.3 ВЕНТИЛАЦИЯ И ОСВЕТЛЕНИЕ В СТУДИЯТА.....	59
6.4 ЕЛЕКТРОАКУСТИЧНО ОБОРУДВАНЕ НА СТУДИЯТА. РЕВЕРБЕРАТОРИ. АМБИОФОНИЧНИ СИСТЕМИ.....	60



# 1. УВОД

---

## 1.1 Предмет и задачи на дисциплината

---

Акустиката е наука за звука и колебанията на твърдите, течни и газообразни вещества, а архитектурната акустика се занимава със закономерностите на разпространението на звука в помещения и сгради.

## 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 привеждал 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 създал 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.

Забележителната 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 теламембрана, 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. Използувайки камертони и резонатори, Хелмхолц успява да възпроизведе различни гласни. Пак той е създал 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.Сабин 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.

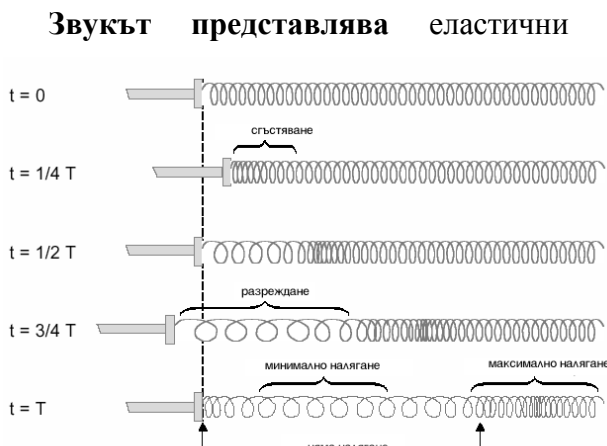




## 2. ФИЗИЧЕСКА АКУСТИКА

### 2.1 ЗВУК И ЗВУКОВИ ВЪЛНИ.

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



интензивност звукови колебания, намиращи се под прага на болезнено усещане, условието за достатъчно малка амплитуда на колебание на частиците винаги е изпълнено. Почти всички разглеждания в настоящата книга са направени при допускането за достатъчно малка амплитуда. Когато това не е спазено, то излишно ще бъде указано.

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, за мащабно моделиране в строителната акустика, както и за целите на ултразвуковата технология.

**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, 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 и в акусто-електрониката.

**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.**

---

### **Линейни 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.

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:

$$p_{ef.} = \frac{p_0}{\sqrt{2}} \quad (2.1)$$

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  $5 \cdot 10^{-6} m$  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  $0^{\circ}\text{C}$  е  $331,7$  метра за секунда. При температура  $20^{\circ}\text{C}$ ,  $c=343,7$  m/s. Зависимостта на скоростта на звука от температурата се дава от израза:

$$c=331,7+0,6.t \quad (2.2)$$

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:

$$\text{tg}\varphi = \frac{q}{w} \quad (2.3)$$

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:

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.4)$$

**Дължина на звуковата вълна** - разстоянието, което изминава разпространяващата се звукова вълна за един период. Означава се с  $\lambda$ , като:

$$\lambda = c.T = \frac{c}{f} \quad (2.5)$$

### 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  $\text{W}/\text{m}^2$  (ват на квадратен метър). За синусоидални колебания:

$$I = p_{\text{ef.}} \cdot v_{\text{ef.}} \cdot \cos \varphi \quad (2.6)$$

Тук  $\varphi$  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  $\rho$  се нарича количеството звукова енергия, намираща се в единица обем. Означава се с буквата  $\varepsilon$  и се измерва в джаули на кубичен метър.

$$\varepsilon = \frac{I}{c} = \frac{p_{\text{ef.}}}{c^2 \rho} \quad (2.7)$$

където  $\rho$  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:

$$\frac{f_{max}}{f_{min}} = 2 \quad (2.8)$$

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:

$$\frac{f_{max}}{f_{min}} = 2^n \quad (2.9)$$

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

$$\frac{f_{max}}{f_{min}} = 2^{\frac{1}{3}} = 1,26 \quad (2.10)$$

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 ограничаващото 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 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 :

$$p = \varphi_1 \left( t - \frac{x}{c} \right) + \varphi_2 \left( t + \frac{x}{c} \right) \quad (2.11)$$

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:

$$p = p_m \cos(\omega t - kx) \quad (2.12)$$

тук  $p_m$  е амплитудата на звуковото налягане.

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

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

Звуковото налягане при плоската звукова вълна не зависи от разстоянието (освен намаляването вследствие на звукопоглъщането, което ще разгледаме по-надолу и което е характерно за всички видове звукови вълни).

Колебателната скорост съответно е:

$$v = v_m \cos(\omega t - kx) \quad (2.13)$$

Акустичният импеданс е чисто активен и е равен на:

$$z = \frac{p}{v} = \rho c \quad (2.14)$$

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

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

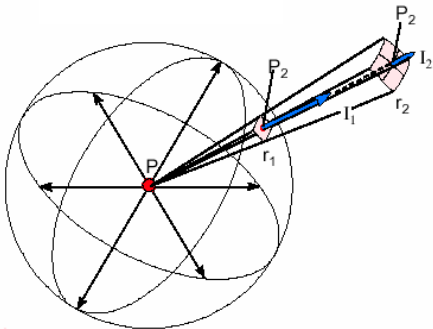
Вследствие на чисто активния акустичен импеданс не съществува фазова разлика между звуковото налягане и скоростта на движение на частиците. Колебателната скорост

на частиците е  $v = \frac{p}{\rho c}$ , а преместването им е

$$\xi = \frac{p}{\omega \rho c}$$

Интензивността на звука при плоска вълна е:

$$I = p_{\text{ef.}} \cdot v_{\text{ef.}} = \frac{p_{\text{ef.}}^2}{\rho c} \quad (2.15)$$



Фиг.2.3

(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:

$$p = \frac{p_1}{r} \left[ \varphi_1 \left( t - \frac{r}{c} \right) + \varphi_2 \left( t + \frac{r}{c} \right) \right] \quad (2.16)$$

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 на сферата

$p_1$  - 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. За това интензивността на звука с отдалечаването от звукоизточника намалява по квадратичен закон:

$$I_r = \frac{I_1}{r^2} \quad (2.17)$$

Където  $I_1$  е интензивността на единица разстояние от звукоизточника.

И тук отклонението от този закон в практиката се дължи на звукопоглъщането.

Знаем, че:

$$I = \frac{p^2}{\rho c} \quad (2.18)$$

Следователно, звуковото налягане на разстояние  $r$  от звукоизточника е:

$$p_r = \frac{1}{r} \sqrt{I_1 \rho c} = \frac{1}{r} p_1 \quad (2.19)$$

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

$$p = \frac{p_m r_0}{r} \cos(\omega t - kr) \quad (2.20)$$

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:

$$v = \frac{\frac{p_m r_0}{r}}{\rho c \frac{k^2 r^2 + jkr}{1 + k^2 r^2}} \cos(\omega t - kr) \quad (2.21)$$

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:

$$kr = \frac{2\pi r}{\lambda} \ll 1 \quad \text{или} \quad r \ll \frac{\lambda}{2\pi} \quad (2.22)$$

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

$$r \gg \frac{\lambda}{2\pi} \quad (2.23)$$

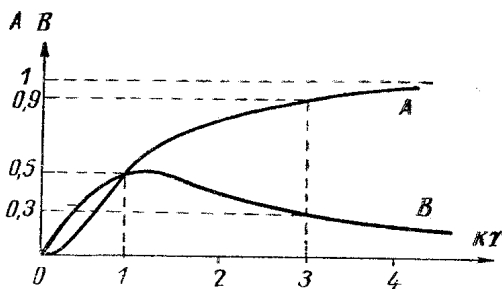
При изпълнението на първото условие, за близкото звуково поле можем да пренебрегнем събираемото  $k^2 r^2$ . Тогава амплитудата на колебателната скорост ще намалява с квадрата на разстоянието  $r$ :

$$v_m = \frac{p_m r_0}{\rho c k} \cdot \frac{1}{r^2} \quad (2.24)$$

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 единиците, 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:

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



Фиг.2.4

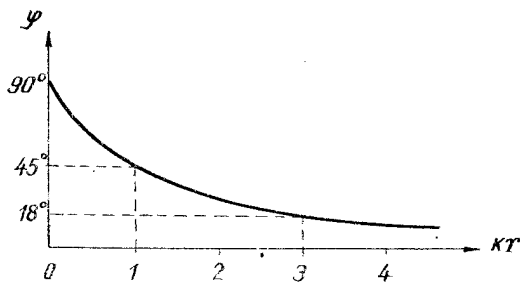
Характерното в случая е, че в далечното звуково поле звуковото налягане и скоростта на трептене са във фаза.

По определение акустичният импеданс е  $z = \frac{p}{v}$  и от съответните изрази получаваме:

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

(2.26)

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. 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



Фиг.2.5

От фигурата се вижда, че когато разстоянието  $r$  е много по-малко от дължината на излъчваната звукова вълна, реактивното съпротивление преобладава над активното. При  $kr=1$ , което съответствува на  $r = 0,16\lambda$  двата компонента се изравняват помежду си и са равни на половината от акустичния импеданс на плоска вълна. При по-нататъшно нарастване на аргумента  $kr$ , което съответствува на увеличаване на разстоянието, активната компонента постепенно клони към 1, а реактивната към нула, и акустичното съпротивление клони към стойността си за плоска звукова вълна  $-\rho c$ .

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

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{kr} \quad (2.27)$$

Изменението на фазовия ъгъл е дадено графично на фиг.2.5

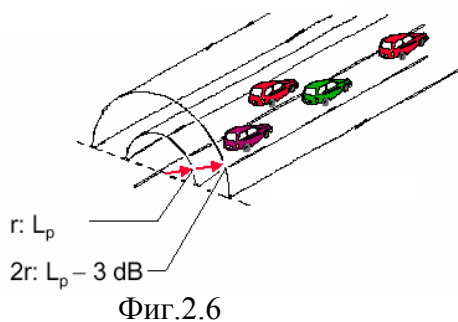
Вижда се, че за разстояния, по-големи от една дължина на вълната, сферичната вълна може да се апроксимира с плоска, като разбира се, се държи сметка за различния закон за изменението на звуковото налягане от разстоянието.



**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** При тях движението се извършва по посока на разпространение на вълната. Този вид вълни представляват последователно сгъстяване и разреждане на частиците. В течностите и газовете съществуват само такива вълни.

**-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):

Честота, Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Затихване, dB/km	0,8	1,2	2,0	4,0	8,8	22,2

Табл.2.1

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  $\alpha_k$ , който показва на какво разстояние амплитудата на вълната намалява е пъти.

$$p = p_0 e^{-\alpha_k x} \quad (2.28)$$

**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**  $\tau$ . В даден газ при определена температура  $\tau$  е право пропорционално на броя удари между молекулите на газа, необходими за възбуждане на съответните степени на свобода. Влиянието на релаксационните процеси върху звуковата вълна зависи от отношението между периода на вълната и времето на релаксация. Колкото по-малко е отношението  $\tau/T$ , толкова по-пълно успява да се възстанови нарушеното равновесие.

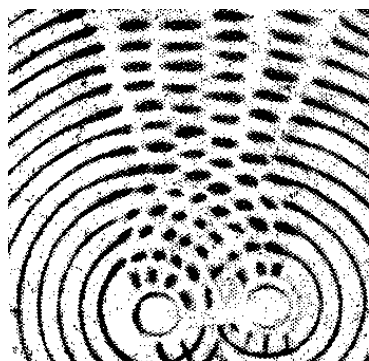
## 2.4.2 Дифракция

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

результатното 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:

$$p'_m = 2p_m \cos kr \quad (2.29)$$

При стойности на  $kr$ , за които  $\cos kr = 0$ , амплитудата на звуковото налягане също е нула. Картината не се изменя в пространството и тези точки остават на едно и също място и се наричат възли. Съответно при стойности на  $kr$ , за които  $\cos kr = 1$  амплитудата е  $p'_m = 2p_m$  и точките, в които е изпълнено това условие се наричат върхове. Разстоянието от излъчвателя, на което се намират върховете е:

$$r = n \frac{\lambda}{2} \quad (2.30)$$

Съответно за възлите тази зависимост е:

$$r = (2n + 1) \frac{\lambda}{4} = n \frac{\lambda}{2} + \frac{\lambda}{4} \quad (2.31)$$

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.

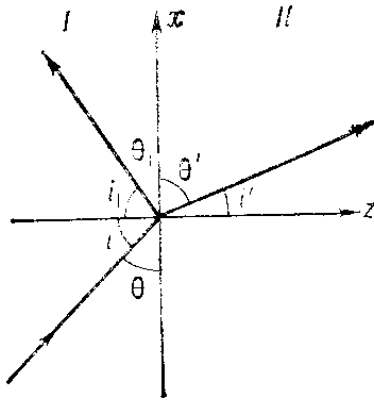
4) Фазовата разлика между звуковото налягане и скоростта на трептене е винаги  $\pi/2$ , и следователно върховете на звуковото налягане съвпадат с възлите на колебателната скорост и обратно.

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, като общото и количество не се изменя.

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.

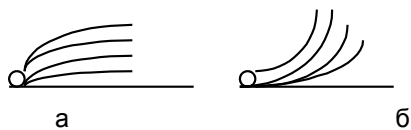
#### 2.4.4 Пречупване на звука. Рефракция.



Фиг.2.8

Звуковата вълна, падайки върху разделителната повърхнина на две среди 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



Фиг.2.9

звукоизлъчвателите се поставят по-високо.

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.

#### 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.

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

$$P_{omp} = P_{nad} \cdot \frac{z_{nad} - z_{omp}}{z_{nad} + z_{omp}} = P_{nad} \cdot \beta e^{j\psi} \quad (2.32)$$

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

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

$\beta$  - модул на коефициента на отражение по звуково налягане.

$\psi$  - фазова разлика между падаща и отразена вълна.

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

Коефициентът на отражение по интензивност е:

$$\alpha_{omp} = \left( \frac{z_{nad} - z_{omp}}{z_{nad} + z_{omp}} \right)^2 = \left( \frac{P_{omp}}{P_{nad}} \right)^2 = \beta^2 \quad (2.33)$$

Ако изместването на фазата на звуковото налягане при отражение е  $0^\circ$ , (отражение от твърда преграда), 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  $0^\circ$  и  $180^\circ$  възлите и максимумите се изместват от разделителната повърхност.

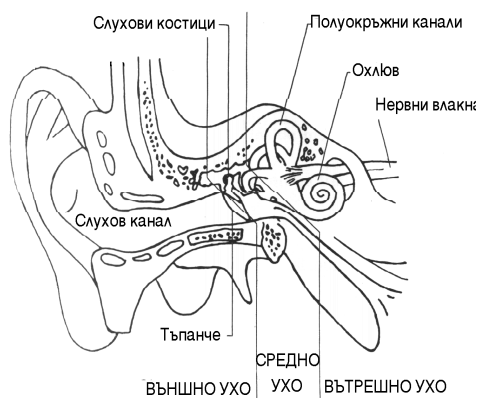
#### 2.4.6 Ефект на Доплер

Ефектът 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.

## 3. ПСИХОАКУСТИКА

### 3.1 Субективно слухово възприятие

#### 3.1.1 Човешко ухо



Фиг.3.1

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.

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 и е свързано с чукчето в средното ухо, заедно с което образува акустичен трансформатор, даващ усиление около 27 db .

Средно ухо представлява кухина, 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 базилярната ( основна ) и Райснерова (вестибуларна) мембрани. Базилярната мембрана по края е закрепена за костни издатини, които продължават по цялата дължина на

Фиг.3.2

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 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 намираща се откъм овалното прозорче и наричаща се “скала вестибули”(вестибуларно пространство) чрез отвърстие, наречено хеликотрема, се свързва с частта намираща се под базиларната мембрана и наричаща 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.

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 постоянното 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.

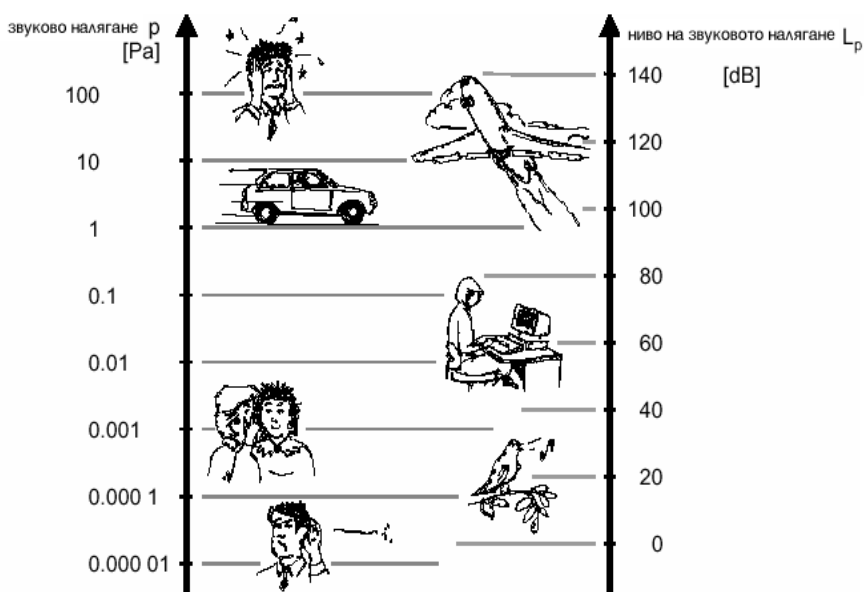
Ухото не извършва точен честотен анализ, а интегрира за един период приблизително 50 милисекунди. Този привиден недостатък всъщност е необходимост, за да може човек да различава взривните съгласни на речта (Б,П и др.). Освен това благодарение на него простото ехо довежда до нарастване на гръмкостта, 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.

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.

### 3.1.2 Възприятие по ниво

#### Зона на слуховото възприятие



Фиг.3.3

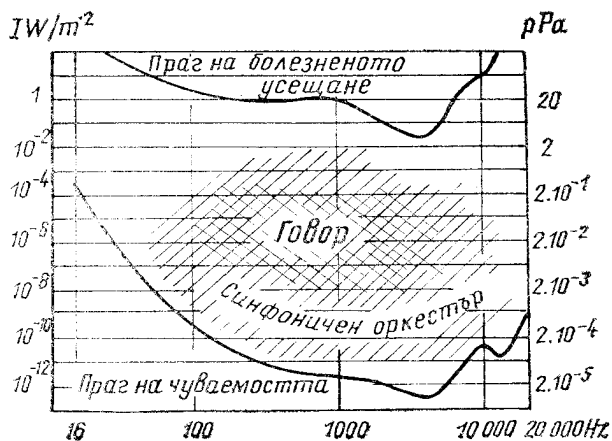
Както вече казахме в предния раздел, възприятието за ниво ( сила ) на звука се базира на броя на импулсите, които се предават по слуховия нерв. При кратковременно възбуждане броя импулси, възникващи за единица време е два до четири пъти повече, отколкото при дълговременно възбуждане. Следователно кратковременните процеси и в частност тези, които възникват при преходните процеси се оценяват от ухото като по-силни от дългите тонове. Ако при колебанието на основната

мембрана влакнцата на нервните клетки не се деформират между нея и мембрана текторис, не възниква усещане за звук. В момента, в който влакнцето 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  $2 \cdot 10^{-5} Pa$ , 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 на болезненото усещане, и той е при звуково налягане  $3 \cdot 10^6$  пъти по-голямо от това на прага на чуваемост, дефиниран



Фиг.3.4

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 чуемия 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.

### 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:

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

Тук  $\Delta I$  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 %).

### Логаритмични нива. Децибелна скала.

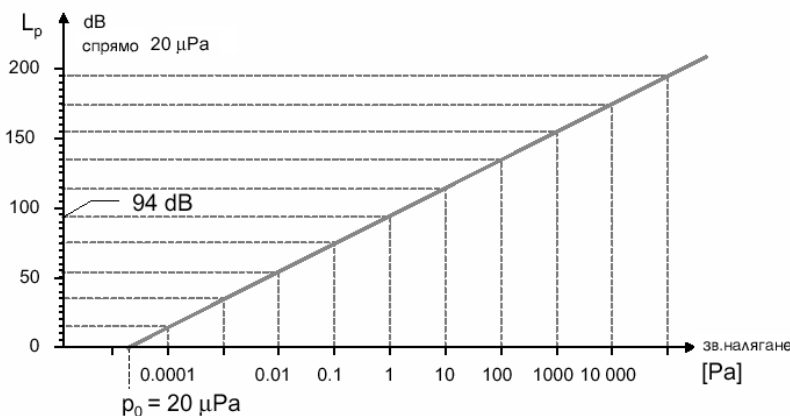
В техниката широко се използва децибелната скала точно поради нейното съответствието на психо физичния закон на Вебер - Фехнер. За енергетичните величини като мощност, енергия, интензивност на звука и т.н. логаритмичното ниво се определя по формулата:

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

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

$$N = 20 \lg \frac{p}{p_0} \quad (3.6)$$

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:

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


Фиг.3.5.

Графика за преминаване от звуково налягане в ниво на звуковото налягане

За интензивността формулата е:

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

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

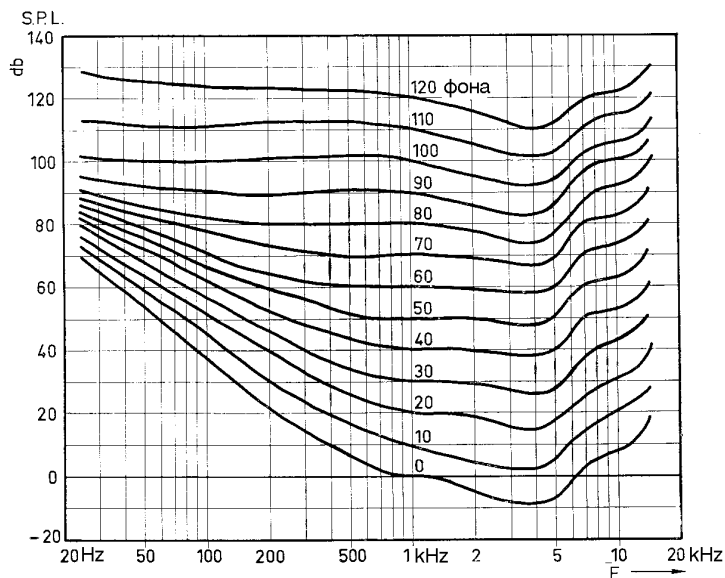
Трябва да напомним, че нивото на звуковото налягане съвпада с нивото на усещане само за чист тон с честота 1000 херца.

## 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 на нивото на усещане съответства различно по сила усещане, защото коефициента  $A$  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:

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

## 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.

Номер на критичната лента.	Централна честота на лентата, Hz	Широчина на лентата, Hz
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

Табл.3.1

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.

### **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

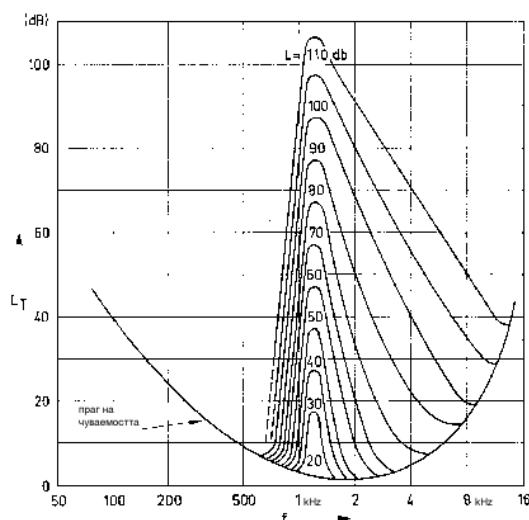
#### Усещане за височина на тона

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 полутона.



Фиг.3.7

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.

### **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 чуваемост 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.

### **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.

### **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.**

**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  $180^\circ$  и става нееднозначна. Затова при високите честоти основно значение придобива амплитудния бинурален ефект.

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 - 1000Hz. Общо взето най-слаба е локализацията за честоти около 1600 херца, където локализацията е в рамките на  $3^\circ$ , което вероятно се обяснява с факта, че там фазовата разлика става двусмислена ( $180^\circ$ ). За честотния обхват от 3 - 6 kHz локализацията е в границите на  $1,5^\circ$  до  $2^\circ$  и за по високите честоти постепенно намалява. Локализацията е много по добра за сложни тонове, от колкото за чисти синусоиди.

### **Бинурално разпознаване на сигнала.**

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

### **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. Бекеша 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. Освен това, 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 прякия 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  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\tau$ , които се дефинират по следният начин:

-Отношението на енергиите на отразения звук към тази на падналия се нарича **коефициент на отражение  $\beta$** :

$$\beta = \frac{E_{omp.}}{E_{над.}} \quad (4.1)$$

Отношението на преминалата през преградата звукова енергия към падналата се нарича **коефициент на звукопроницаемост  $\tau$** :

$$\tau = \frac{E_{пр.}}{E_{над.}} \quad (4.2)$$

Обикновено вместо  $\tau$  се използва индексът на звукоизолация  $R$ . Той представлява разликата на нивата на звуково налягане от двете страни на стената:

$$R = L_1 - L_2 + k = 20 \lg \frac{p_1}{p_2} + 10 \lg \frac{S}{A}, dB$$

Тук  $p_1$  и  $L_1$  са звуковото налягане и нивото на звуковото налягане от страната на стената, където се намира звуковият източник;  $p_2$  и  $L_2$  са звуковото налягане и нивото на звуковото налягане от страната на стената, където се приема звукът;  $S$ -площ на тестваната стена, като ако това е образец, неговата площ е равна на площта на тествания отвор;  $A$ -еквивалентна площ на звукопоглъщане в приемното помещение.

-Отношението на погълнатата енергия към падналата се нарича **коефициент на звукопоглъщане  $\alpha$** :

$$\alpha = \frac{E_{над.} - E_{omp.}}{E_{над.}} \quad (4.3)$$

Тук  $E_{над.}$  е падналата, а  $E_{omp.}$  е отразената звукова енергия.

От друга страна:

$$\alpha = \frac{E_{\text{пог.}} + E_{\text{прем.}}}{E_{\text{пад.}}} \quad (4.4)$$

Тук  $E_{\text{пог.}}$  е погълнатата, а  $E_{\text{прем.}}$  е преминалата звукови енергии. Освен това, очевидна е зависимостта:

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

Коефициентът на звукопоглъщане  $\alpha$  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  $\rho c$  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  $90^\circ$ ) и дифузен коефициент на звукопоглъщане (при всевъзможни ъгли на падане на звуковата вълна). В справочниците обикновено се дава дифузният коефициент на звукопоглъщане  $\alpha_{\text{диф}}$ .

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  $\alpha=0,2$ , отново  $A=1\text{m}^2$ .

Пълно поглъщане на звука е възможно или ако  $\beta=0$  ( т.е. нямаме отражение ) или ако  $\rho_1 c_1 = \rho_2 c_2$  което означава равенство на акустичните импеданси на двете среди, при което се получава пълно проникване на звука от едната среда в другата. От гледна точка на определянето на звукопоглъщането в едно помещение, преминалата в други области на пространството енергия също е погълната. Например, един отворен прозорец или отворени

врата представлява площ, която поглъща 100% от попадналия върху нея звук. Вентилационните отвори също могат да се разглеждат като абсолютни поглъщители.

#### 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:

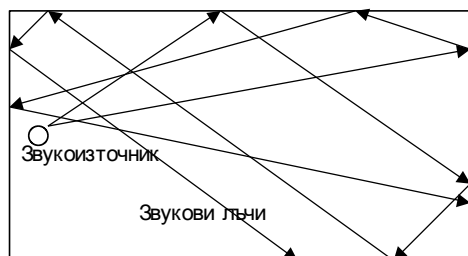
$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad (4.8)$$

Тук  $n_x$ ,  $n_y$  и  $n_z$  е тройка целочислени параметри,  
 $l_x$ ,  $l_y$  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



Фиг.4.1

на звуковата вълна. 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 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 пъти по-голям от дължината на вълната, а за криволинейна повърхност най-малкият 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 :

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

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

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

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

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

Тук  $\varepsilon$  - плътност на звуковата енергия .

$c$ - скорост на звука.

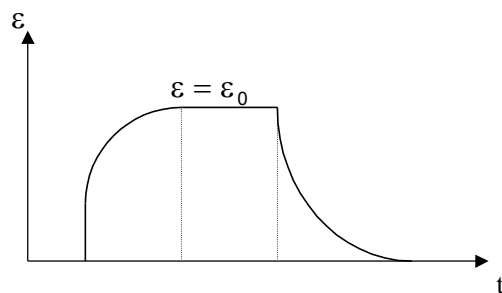
### 4.1.3 Време на реверберация. Граничен радиус.

Нарастването на плътността на енергията в помещението не 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  $\varepsilon$  , която се означава с  $\varepsilon_0$  :

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

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 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. За това, 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



Фиг.4.2

дВ. Това време се нарича стандартно време на реверберация. Определя се по формулата на Сабин:

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

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

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{пр.}} + \varepsilon_{\text{отр.}} \quad (4.14)$$

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

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

От своя страна плътността на енергията на отразената вълна е:

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

Общата плътност е:

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

Тук  $B = \frac{A_{\text{общо}}}{1 - \alpha_{\text{ср.}}}$  - 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:

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

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

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

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

$\Omega$  - 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 звукопогълтителите 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 погълтителите 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 и 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  $l_{cp.}$  и толкова по-малък ще бъде броя отражения за единица време  $n$ . Това довежда до по-бавно затихване на звука:

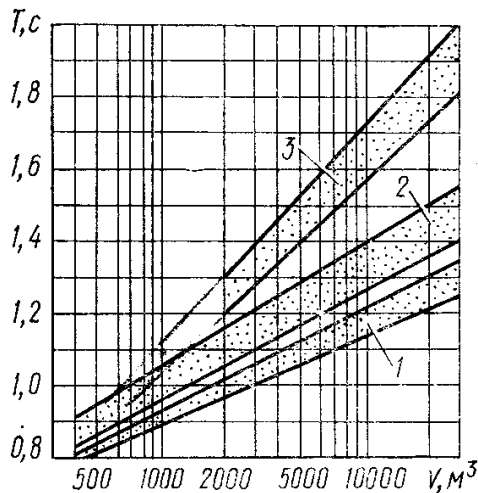
$$l_{cp.} = \frac{4V}{S_{общо}} \quad (4.20)$$

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

$V$ -обем на помещението

Формула 4.13 е вярна за стойности на коефициента на звукопоглъщане  $\alpha_{cp.} \leq 0,2$  (кънтящи помещения). За стойности на този коефициент  $\alpha_{cp.} > 0,2$  е валидна формулата на Еиртинг:

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



Фиг 4 3

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 “.

Изследванията (Vern O. Knudsen) показват, че коефициентът 0,163 във формула 4.22 се променя при различна форма на залата. За това ще го означим с  $k$  и формулата ще добие вида:

$$T = \frac{kV}{S_{общо} \ln(1 - \alpha_{cp.})}$$

При правоъгълна форма на залата или такава с отразяващ балкон, неговата стойност е 0,161, при разглеждане на пространството под балкона като част от обема или при наличието на призматичен таван се увеличава до 0,164. При тези случаи вероятността за отражение от пода и тавана е с 10% по-голяма от вероятността за отражение от стените. За кубична форма на помещението  $k=0,168$ , за помещение със сравнително голяма площ на пода и нисък таван  $k=0,151$  и за театър с ветрилообразна форма и балкон-0,161. В последните три случая по-голямата част от отраженията са от пода и тавана. Тоест, точната формула би трябвало да отчита както дължината на свободния пробег като функция от формата на помещението, така и вероятността за отражение от различните повърхности. За обикновените помещения с правилна форма тези поправки са твърде малки и нямат съществено значение, но при големи помещения с ниски тавани, дълги тесни помещения или такива с особена форма, поправките оказват съществено влияние.

За да се отчете поглъщането на въздуха, при оразмеряването на големи помещения се въвежда още една корекция във формула 4.22:

$$T = 0,161 \frac{V}{S_{общо} \ln(1 - \alpha_{cp.}) - 4mV}$$

Тук  $m$  е коефициент на отслабване от поглъщане на звуковата вълна във въздуха.

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

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

Тук  $\alpha_i$  и  $S_i$  са коефициентите на звукопоглъщане и площите на отделните повърхности.

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

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 оптималното, 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 чете 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 (коэффициент  $k_1$ )
- Ниво на гръмкостта на речта (коэффициент  $k_2$ )
- Отношение сигнал шум (коэффициент  $k_3$ )
- Форма и размери на залата (коэффициент  $k_4$ )

Процентът сричкова разбираемост се определя по формулата:

$$ПР=96k_1.k_2.k_3.k_4 \quad (4.24)$$

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 ПР ще бъде неудовлетворително, даже ако всички останали коефициенти са 1.

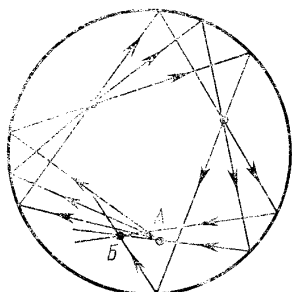
При ниво на звука 70 до 80 dB разбираемостта е най-добра и тогава  $k_2=1$ . При увеличаване на нивото на звука до 100 dB или намаляването му до 60 dB  $k_2$  спада до 0,95. Ниво 50 dB  $k_2=0,9$ , при 40 dB  $k_2=0,8$  и при 30 dB  $k_2=0,65$ .

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.

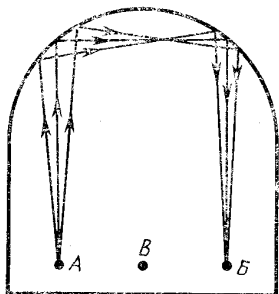


Фиг.4.4

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 Б, където се намира слушателя, е достатъчна за получаване на отчетливо ехо, а в точките  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  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.

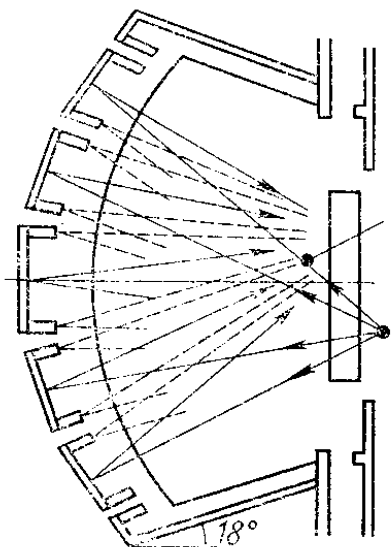
### 4.3 ЗАЛИ С ЕСТЕСТВЕНА АКУСТИКА

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. 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.



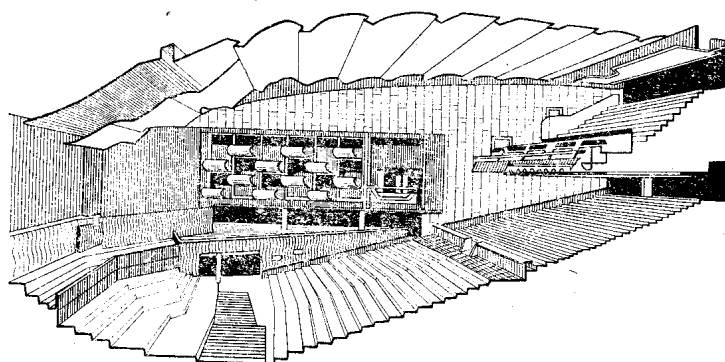
Фиг.4.6

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  $\alpha$ , 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 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.



Фиг.4.7

Концертната зала в Лондон

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 подковообразната 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 спомага 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 непериодични 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:

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

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

## 5.1.2 Измерване на шума

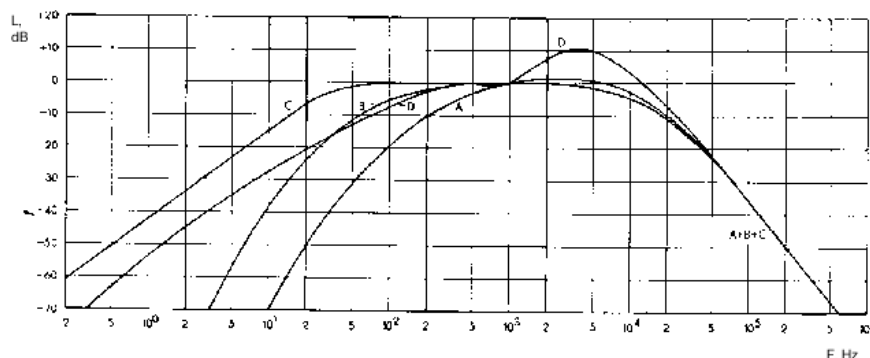
Преди да разгледаме нормите за шумност, трябва да се запознаем с методите за измерване на шума. То става с помощта на специални уреди, наречени шумомери. Те съдържат измервателен микрофон, обикновено кондензаторен, а в последно време все по-често електретен, който също е вид кондензаторен микрофон, но 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 :

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

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 -  $2 \cdot 10^{-5}$  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 А, В, С и D (фиг.5.1).

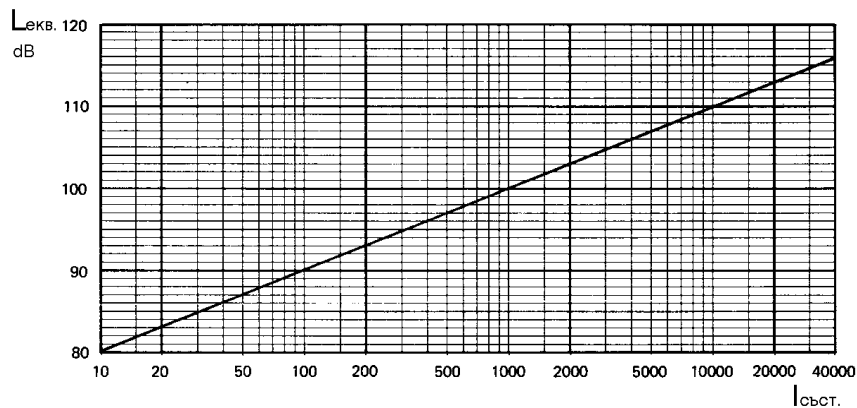


Фиг.5.1

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 А и съответно dB (B), dB (C) и dB (D). 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



Фиг.5.2

$L_{\text{екв.}}$  -еквивалентно ниво на непрекъснатия шум  
 $I_{\text{сбст.}}$  -съставен индекс на шумовата експозиция

анализатори. Те измерват нивото на шума в тесни ленти - октава, терца или потесни 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.

Продължителност на шума за седмица		Ниво на звука в dB (A) - средна точка на класа								
часове	Минут и	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	11 0	350	111 0	3500	11100	
16		5	15	40	12 5	400	126 0	4000	12600	
18		5	15	45	14 0	450	134 0	4500	14200	
20		5	15	50	16 0	550	150 0	5000	15800	
25		5	20	65	20 0	625	198 0	6250	19800	
30		10	25	75	23 5	750	237 0	7500	23700	
35		10	30	90	27 5	875	272 0	8750	27700	
40		10	30	10 0	31 5	100 0	315 0	1000 0	31600	

табл. 5.1

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

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

табл.5.2

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

Табл.5.3

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.

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

табл.5. 4

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)

табл.5.5

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

табл.5. 6

## 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 интересуващото 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 простран-ство;

- **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

#### 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:

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

$\tau$  - 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;

$\mu$  - коефициент на Пуасон;

$\rho$  - 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.

### 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  $\alpha_{cp.}$  - 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  $\Delta A$  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  $V_1$  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.

Описание на помещението	$\hat{A}_{1000}, i^2$
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

табл.5. 1

Обем на помещение то $V, i^3$	Множител при стандартни честоти, Hz							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
< 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

табл. 5.2

## 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 превръщат в топлина. Този вид звукопоглъщащи материали обикновенно се



1. мембрана

2. корпус

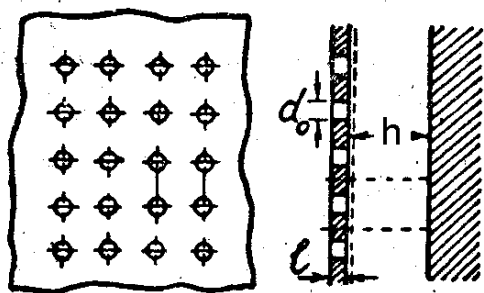
3. звукопоглъщащ материал

Фиг.5.3



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 порест звукопогълтител 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 погълтители 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  $\alpha = 0,4 - 0,6$ .



Фиг.5.4.

Резониращите панели биват мембранни и на базата на кухи резонатори.

Мембраните погълтители 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 демпфащ материал (пореста гума, дунапрен,

строителна вата и др.). Този вид погълтители се наричат щитове на Бекеш (фиг.5.3). При този вид погълтители максимално поглъщане се получава на резонансната честота:

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

Тук  $F$  -сила на опън на мембраната.

$t$ - дебелина на мембраната.

$l, b$ -дължина и широчина на мембраната

$k$ -номер на резонанса.

$\rho$  -плътност на материала на мембраната.

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

Интерес представляват мембранните резонансни погълтители, 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 погълтител от този тип с погълтител с резонатор на Хелмхолц, описан по-долу в един панел, може да се получи много добър ефект.

Резонансните погълтители с кухи резонатори представляват система резонатори на Хелмхолц, в чието гърло е поставен демпфащ 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 отвора,  $t$  - дебелината на листа,  $h$  - разстояние до стената,  $d$  - разстояние между отворите, а  $l_e$  - еквивалентна дебелина на листа, то:

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

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

Ако вместо отворите са направени процепи, то

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

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:

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

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  $l$  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 периодично 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 продължителна 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 височестотния 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.

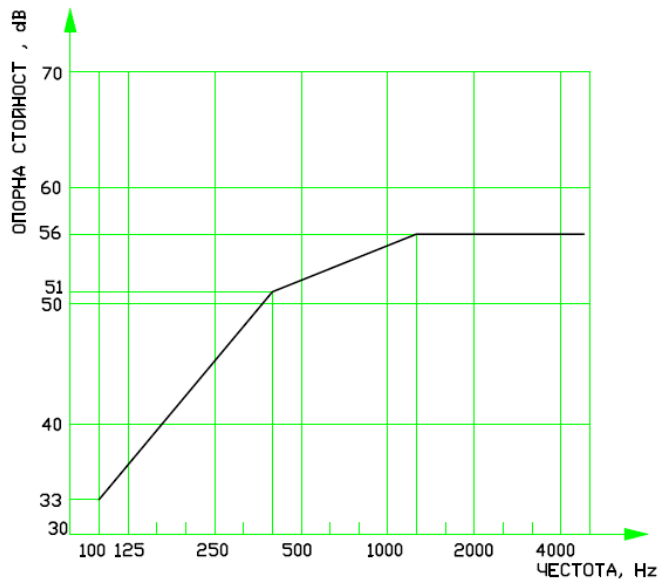
## 5.8 Изисквания на стандартите.

---

Съгласно БДС EN ISO 717 се използва така наречения претеглен индекс на звукоизолацията, който за въздушен шум се означава с  $R'_w$ , а за ударен шум  $L'_{U,w}$ . Той се определя спрямо нормативната честотна характеристика за съответния звук.

За въздушен шум:

$$R'_w = 52 + \Delta L, dB$$



Фиг.5.

Тук  $\Delta L$  е поправката в dB, която се получава при сравняване на измерената честотна характеристика на стената и нормативната характеристика на фиг. 4.1.

Определянето на  $\Delta L$  става, като за централните честоти на стандартните терци се определят отклоненията, разположени под нормативната графика. Намира се средноаритметичната стойност на отклоненията и ако тя е по-малка или равна на 2dB, и максималното отклонение за честотите между 315 и 2500 Hz е под 8 dB, се приема  $\Delta L=0$ .

В противен случай нормативната графика се транслира надолу на четно число dB, докато средното и максимално отклонение от така

изместената графика не достигнат посочените стойности. Стойността на  $\Delta L$  е равно на стойността на преместването на нормативната графика със знак минус.

## 6. СТУДИЯ

---

---

### 6.1 Общи сведения. Видове студия. Оптимално време на реверберация.

Звуково студио се нарича специално помещение, предназначено за запис или директно излъчване по радиото или телевизията на звукови картини и програми. В зависимост от предназначението си, студията биват:

- Речеви студия
- Студия за общо предназначение
- Музикални, които според обема си биват: големи, средни и малки
- Дублажни
- Литературно - драматични комплекси
- Телевизионни

Размерите на студиото зависят от броя изпълнители, като оптималния обем може да бъде определен по формулата:

$$V=21N+55 \text{ m}^3 \quad (12.1)$$

където  $N$  - брой изпълнители

Тази формула важи до обем на студиото  $2000 \text{ m}^3$ . При по-голям обем броя изпълнители се определя по формулата:

$$N = \frac{V^{\frac{2}{3}} \lg V}{8} \quad (12.2)$$

За да се отчете различната акустична мощност на музикалните инструменти се използват приведени изпълнителски единици. Например, за духова музика броя изпълнители се умножава по 1,25, докато за оркестър изпълняващ народна музика коефициентът е 0,5.

Оптималното отношение на размерите на студиото - дължина  $l$ , широчина  $b$  и височина  $h$  за малки и средни студия е:

$$h/b=b/l ; h+b=l ; l:b:h=2,62:1,62:1$$

тогава:

$$\begin{aligned} h &\approx 0,6\sqrt[3]{V} \\ b &\approx \sqrt[3]{V} \\ l &\approx 1,6\sqrt[3]{V} \end{aligned} \quad (12.3)$$

Ако  $h$  се получи по-малко от  $3\text{m}$ ., размера се закръглява на тази стойност.

Обикновено обемът на студията е:

- Речево - за 1-2 изпълнителя -  $75$  до  $120 \text{ m}^3$ .
- Камерно за 2-8 изпълнителя -  $200$  до  $300 \text{ m}^3$ .
- Малко концертно 20-30 изпълнителя -  $4070$  до  $700\text{m}^3$ .
- Средно концертно - 60-80 изпълнителя -  $1800$  до  $3000\text{m}^3$ .

- Голямо концертно 3000 до 6000m<sup>3</sup>.
- Литературно - драматично - 600 до 1000m<sup>3</sup>.
- Постановъчни студия - 3 до 6 хиляди m<sup>3</sup>.

В концертните студия времето на реверберация трябва да бъде от 1 сек. за малките до 1,7 сек. за големите студия, като в зависимост от стила и характера на изпълнението, оптималното време на реверберация е различно. Например, при едно и също помещение, класическата симфонична музика изисква време на реверберация 1,54 сек., симфоничната романтична - 2,07 сек., съвременната симфонична - 1,48 сек. като отклонение с 0,1 сек. от тези стойности вече се забелязва от експертите. В речевите студия за предаване на информация оптималното време на реверберация е 0,4 до 0,5 сек. а в студията за художествено слово - 0,7 до 0,8 сек. при обем на студиото около 500 м<sup>3</sup>.

Теоретично времето на реверберация T може да се определи по следните формули:

-За концертни студия:

$$T_{\text{опт.}}=0,5lgV-0,1$$

-За по малки музикални студия:

$$T_{\text{опт.}}=0,45lgV-0,3$$

-За речеви :

$$T_{\text{опт.}}=0,4lgV-0,4$$

Като се има пред вид необходимостта от изменение на времето на реверберация при различни програми, явна е необходимостта в концертните студия и в тези за литературно - драматични програми да се осъществи променливо звукопоглъщане. То се осъществява или с помощта на въртящи се колони с различно звукопоглъщане от различните страни, като част от колоната е скрита в стената, или с помощта на закриване на част от стените с отразяващи щитове. Това са доста сложни методи, свързани с наличието на тежки механизми.

По прост метод за регулиране на времето на реверберация е метода на еквивалентната реверберация, базиращ се на промяната на разстоянието между микрофона и изпълнителя:

$$\frac{1}{T_{\text{екв.}}} = \frac{1}{T} + \frac{1}{1,2} \lg \frac{R+1}{R} \quad (12.4)$$

Тук T е измереното време на реверберация на помещението.

R-акустично отношение

$$R = \frac{50,3r^2(65T - V)}{V.S.\Omega} \quad (12.5)$$

r -разстояние на микрофона от изпълнителя

Ω-коэффициент на осова концентрация на източника

V,S -обем и площ на околните повърхности на помещението.

## 6.2 ЗВУКОИЗОЛАЦИЯ НА СТУДИЯТА

---

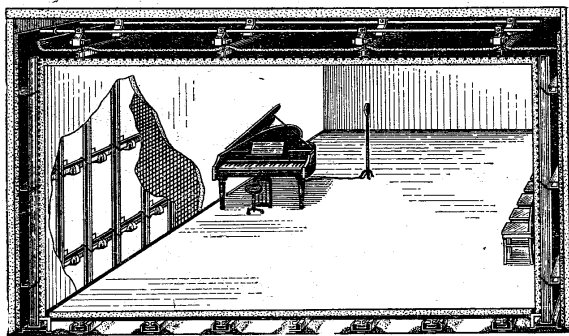
За да може да се записва или излъчва звукова програма с достатъчно широк динамичен диапазон без да се проявява пречещо влияние на шума, последния не трябва да надвишава нивото 15-20 db. Шумовете в студиото биват три вида:

-Шумове, възникващи в студиото вследствие на предаване на вибрации по конструкцията.

-Шумове, проникващи в студиото от околното пространство по въздушен път.

-Шумове, създавани от някакви механизми в студиото - вентилация, отопление, осветителни тела и др.

Всички мерки, които се вземат за изолиране на външните шумове намаляват тяхното ниво с определена стойност - например, 65 dB. Някои източници на шум са твърде мощни - например, реактивен самолет, прелитащ на малка височина създава звуково налягане около 90 dB, а въздушния удар, възникващ при прелитане на свръхзвуков самолет е с налягане 8 г/см<sup>2</sup>, отговарящо на звуково налягане над 140 dB. Влаковете, трамваите и метрото, както и други тежки транспортни машини създават вибрации на почвата, които се предават на конструкцията на студиото, която ги излъчва във вид на звук вътре в него. Всичко това



Фиг.12.1

зисква студията да се строят далече от летища, гари, ж.п. линии, натоварени улици и други източници на силен шум и вибрации.

Конструкцията на сградата, в която се разполага студиото трябва да бъде масивна, по възможност сградата да бъде построена на твърд грунд. Помещенията, заобикалящи студиото трябва да бъдат тихи (складове, архиви и др. ), за да могат да се използват като акустичен екран. Не се препоръчва две студия да бъдат в

съседни помещения. С цел намаляване на предаването на вибрации от околната среда към конструкцията на студиото трябва да се отстрани твърдата механична връзка между тези елементи и останалите части на сградата. Това може да бъде постигнато чрез поставяне на студиото на отделен фундамент, отделен от общия такъв на сградата чрез пясъчна възглавница или виброизолиращи подложки ( гума, кече и др. Подобни ). Освен това, особено когато студиото не е на приземния етаж, се прилага конструкция от типа “ кутия в кутия”, като цялата кутия на студиото се разполага вътре в по-голямо помещение, като лежи на еластични елементи - пружини, гумени тампони и др. (Фиг.12.1).

Освен по вибропът външния въздушен шум прониква в студията през евентуални процепи и пори в материалите на стените на студията. За да се намалят възможностите за такова проникване вратите на студията се правят двойни и със специални гумени уплътнения. Външни прозорци въобще не се правят, а вътрешните (между студиото и апаратната) се правят двойни или тройни, като стъклата не са успоредни и са монтирани към рамките с гумени уплътнения.

Друг път за проникване на въздушния шум са околните повърхности на студиото - стени, под, таван. При попадане на звукова вълна върху такава повърхност, последната се разколебава подобно на мембрана, управлявана от масата. Следователно, при увеличаване на дебелината на стената и относителното тегло на материала, от който е изградена, се намалява амплитудата на трептене, а от там се подобрява звукоизолацията. Но увеличаването на дебелината на стената над определени граници е икономически не изгодно. Например, увеличаването на дебелината на тухлена стена от 10 до 20 см. подобрява звукоизолацията с 5 dB , но със същата стойност го увеличава и удебеляването на стената от 20 на 40 см. По изгодно е да се използват многослойни конструкции с въздушна междина между слоевете, при които част от звуковата енергия се разсейва от границите между слоевете и това силно увеличава звукоизолацията.

Шумът и вибрациите от машини ( вентилатори, помпи на отопление и др. ) се намалява чрез поставяне на виброизолиращи тампони между фундамента и опорите на машината.



## 6.3 ВЕНТИЛАЦИЯ И ОСВЕТЛЕНИЕ В СТУДИЯТА

Вентилационната система е много важна за студиото, защото поради невъзможността да се използват външни прозорци и необходимостта от уплътняване на вратите, целия необходим пресен въздух се доставя от вентилацията. Тя трябва да осигурява обмен на въздуха 5-7 пъти в час. От друга страна, тръбите на вентилацията са път за проникване на шума за избягване на това се използват акустични филтри от следните видове:

- Тръби, облицоване вътре със звукопоглъщащ материал
- Парчета тръба с различен диаметър
- Камерни филтри
- Контактни филтри

За парче тръба с постоянно сечение, облицовано от вътре със звукопоглъщащ материал, затихването е:

$$\Delta L = \frac{\alpha p l}{S} \quad (12.6)$$

Тук  $\alpha$  -коэффициент на звукопоглъщане на облицовачния материал.

$l$ -дължина на тръбата

$p$ -периметър на сечението на тръбата

$S$ -площ на сечението

За филтри, състоящи се от парчета тръба с различно сечение, затихването е:

$$\Delta L = 10n \lg \frac{1+A}{1-A} \quad (12.7)$$

Където:

$n$ -брой звена

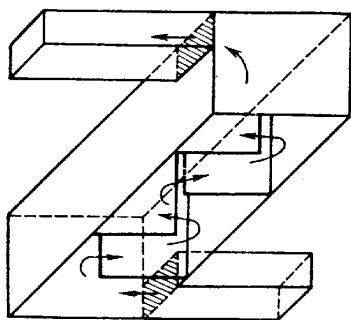
$$A = \frac{\sqrt{1 + \frac{4\omega_0^2}{\omega^2}}}{1 - \frac{2\omega_0^2}{\omega^2}}$$

$$\omega_0 = c \sqrt{\frac{S_1}{S_2 l_1 l_2}}$$

$S_1 \ll S_2$  -напречно сечение на тръбите

$l_1, l_2$  -дължина на тръбите

Камерния филтър представлява редица от камери, чиито входове и изходи не са на една права линия (фиг.12.2) и представляващи разширения на вентилационната тръба.



Фиг.12.2

Вътрешните стени на камерите са облицовани със звукопоглъщащи материали, които трябва да бъдат негорящи.

Контактните филтри представляват ред паралелни канали, на които е разделен въздухопровода. Каналите също са облицовани със звукопоглъщащ материал.

Изходните отвори на каналите на вентилационната система в студиото се екранират с помощта на щит, разположен на известно разстояние от отвора, а самия отвор се извива под прав ъгъл и в него се поставят направляващи лопатки, разбиващи въздушната струя. Тези мерки намаляват завихрянето на въздушния поток и намаляват шума от вентилацията.

Пак поради липсата на външни прозорци, в студията е необходимо изкуствено осветление, което трябва да бъде равномерно, без сенки и ярки бликове, като минимална осветеност е 80 лукса, а максималната - 150-200 лукса, като се предпочита отразената светлина, с изключение на лампите за локално осветление и прожекторите в телевизионните студия.

В осветителните тела не трябва да има звънтящи части, които биха могли да прозвънтят при влизане в резонанс с някои звънци в студиото, като при необходимост се поставят гумени подложки и уплътнения. Освен това в тях не трябва да има възли, издаващи звук, като дросели, стартери на луминисцентни лампи и др. Захранващите проводници на осветителните тела биха могли да станат източник на електрически брум, индуктиран в микрофонните кабели, поради което трябва да бъдат екранирани.

Отоплението в съвременните студия се осъществява с климатична инсталация, комбинирана с вентилацията. Възможно е в някои студия да има радиатори на парно отопление, които биха могли да се превърнат в източник на шум вследствие на предаване на вибрации по тръбите от работещи помпи за циркулация или други механизми. За да се избегне това, тръбите трябва да бъдат отделени вибрационно от основния щранг с помощта на гъвкава връзка.

#### **6.4 ЕЛЕКТРОАКУСТИЧНО ОБОРУДВАНЕ НА СТУДИЯТА. РЕВЕРБЕРАТОРИ. АМБИОФОНИЧНИ СИСТЕМИ.**

Електроакустичното оборудване на студията включва микрофони, озвучителни тела в апаратната, устройства за регулиране времето на реверберация, изкуствени ревербератори амбифонична система.

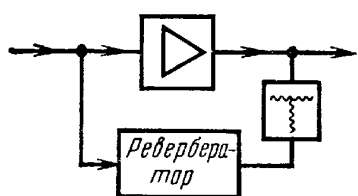
В комплекта микрофони на студиото влизат микрофони с различна характеристика на насоченост - ненасочени, двустранно насочени ( с характеристика осмица ), кардиодни, остронасочени, а също така и микрофони с различни честотни характеристики, като говорни ( с подем 6 dB окт.) и концертни - с равномерна честотна характеристика. В големите студия броят на микрофоните достига 15 - 20 броя.

Озвучителните тела в апаратната трябва да бъдат две за прослушване на стереопрограми, като изискванията към

равномерността на честотната им характеристика и нелинейните им изкривявания са много високи. При прослушване на говорни програми понякога се използват битови озвучителни тела, които също трябва да бъдат от висок клас.

В речевите студия диктора трябва да разполага с резервен микрофон и възможност за прослушване на програмата с помощта на слушалки.

Устройствата за регулиране на времето на реверберация включват въртящи се колони, подвижни щитове и др.



Фиг.12.3

определено време на реверберация, след което така обработения сигнал се смесва с основния (фиг.12.3).

Регулирането на времето на реверберация по електронен път става с помощта на амбифонични системи, които ще разгледаме по-нататък.

Устройствата за изкуствена реверберация (ревербератори) биват магнитни, пружинни, листови и ехо-камери. При работата си тези устройства обработват сигнала така, че той в една или друга степен става подобен на сигнала, получаван в помещение с

Ефектът, наподобяващ съответното време на реверберация се създава с помощта на смесването на една или друга пропорция на основния и обработен сигнал, както и чрез изменение на реверберацията в самото устройство. Еквивалентното време на реверберация се определя по формулата:

$$\frac{1}{T_{\text{екв.}}} = \frac{1}{T_{\text{рев.}}} + \frac{1}{1,2} \lg \left( 1 + \frac{P_{\text{осн.}}^2}{T_{\text{рев.}}^2} \right) \quad (12.8)$$

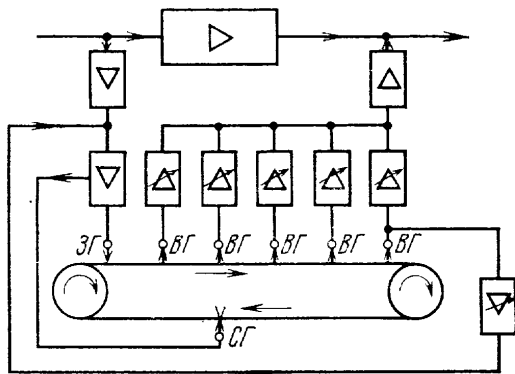
Тук:

$T_{\text{рев.}}$  - Времето на реверберация на ревербератора

$P_{\text{осн.}}$  и  $P_{\text{рев.}}$  - нива на основния и ревербериращ сигнал на входа на смесителя.

Блокова схема на магнитен ревербератор е показана на фиг.12.4

При него се използва магнитна лента, свързана в затворен контур така, че се върти безкрайно. По дължината на затворения контур са разположени записваща глава и на известни разстояния от нея няколко възпроизвеждащи глави, а след тях - изтриващата глава. От последната възпроизвеждаща глава се взема сигнал за обратна връзка и се подава отново на входа на записващия усилвател, а сигналите от възпроизвеждащите глави от ВГ<sub>1</sub> до ВГ<sub>n</sub> с постепенно намаляваща амплитуда се смесват с основния сигнал. В резултат се получават многократно повтарящи се сигнали със закъснение спрямо основния сигнал, отговарящо на разстоянието между записващата глава и съответната възпроизвеждаща



Фиг.12.4

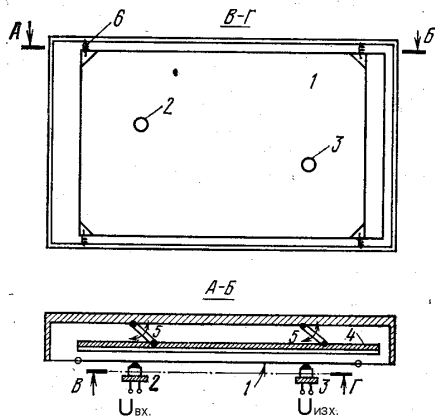
глава и на скоростта на движение на лентата. Недостатък на този вид ревербератор е наличието на тонална окраска на отзвучите поради точната повтаряемост на закъсняващите сигнали. Магнитният ревербератор позволява да се изменя времето на реверберация в широки граници - от 0,5 до 5 сек., като при по високи стойности на  $T$  могат да доведат до самовъзбуждане.

Пружинният ревербератор представлява излъчвател и приемник, свързани помощта на винтова пружина.

Излъчвателя представлява електродинамичен високоговорител, които вместо мембрана има устройство за захващане на пружината. Приемника е подобен на дозата на грамофон, като вместо игличка има устройство за възприемане на вибрациите от винтовата пружина. Вибрациите, възбудени от излъчвателя в пружината достигат със закъснение до приемника поради еластичността на пружината, след което се отразяват от неподвижния край на пружината и отново достигат с намалена амплитуда и ново закъснение до приемника и т.н. до затихване. Времето на реверберация може да се регулира чрез създаване на различен

опън на пружината. Недостатък на този вид ревербератор е тесния честотен обхват и едномерността на отраженията, които създават неестествена окраска на звука.

Листовият ревербератор представлява стоманен лист с дебелина 0,4 - 0,5 мм. И размери 1 на 2 м., който е закрепен за ъглите вертикално в рамка (фиг.12.5) Сигнала се възбужда с помощта на електродинамичен излъчвател, подобен на този на пружинния ревербератор, при което колебанията се



Фиг.12.5

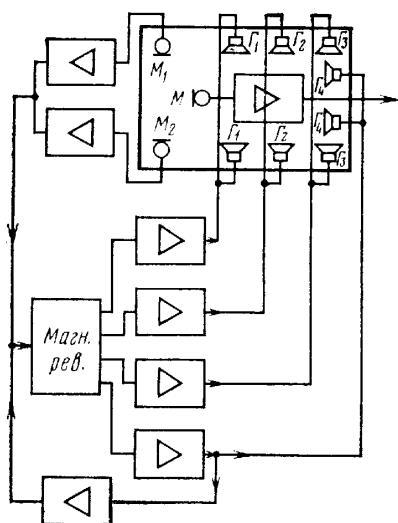
разпространяват във всички посоки на листа, отразяват се от краищата му и попадат в точката на приемане, където е закрепен виброприемника. В резултат на многократните отражения се получава сложна звукова картина, наподобяваща реверберацията в помещение. За регулиране на затихването зад листа е разположен лист от демфащ материал, който може да се доближава и отдалечава до металния лист. Времето на реверберация се изменя от 0,6 до 6 сек. в областта на средните честоти, като при голямо разстояние между погълтителя и листа времето на реверберация за ниски честоти може да достигне 16 сек., докато в същото време за високи честоти то е 2 сек. Тази зависимост на времето на реверберация от честотата е най-съществената недостатък на листовия ревербератор, но по качество на звучене той се доближава до това на помещение макар, че има двумерно разпределение на собствените честоти а не тримерно.

Ехо - камерата представлява помещение с обем 80-100 м<sup>3</sup>, чиито стени са гладки, без пори и не са успоредни. Вътре в това помещение е разположен излъчвател ( висококачествено озвучително тяло ) и приемник ( микрофон с линейна честотна характеристика ). Времето на реверберация е около 7 сек., като някои ехокамери могат да бъдат настройвани за две времена на реверберация. Регулирането на необходимото време на реверберация става чрез смесване в определена пропорция на основния и обработен сигнал. Ехо камерите дават звучене най-близко до естественото, но са скъпи и обемисти съоръжения.

Амбиофоничната система представлява специална озвучителна система, в която чрез използване на акустичната обратна връзка се регулира времето на реверберация. Схемата на една амбиофонична система е показана на фиг.12.6.

Освен основния микрофон в помещението се разполагат поне още два микрофона M<sub>1</sub> и M<sub>2</sub>, които са отдалечени от изпълнителите. Техния сигнал след усилване се подава в различни канали за възпроизвеждане, като озвучителните тела се намират в същото помещение и имитират отразените лъчи, които се възприемат от микрофоните и отново се подават в системата. Понякога в амбиофоничната система се въвежда допълнително закъснение с помощта на магнетофонен ревербератор.

Многократното повторение на имитираните отражения предизвиква увеличение на реверберацията в сравнение със собственото време на реверберация на помещението, като може да бъде увеличено до 5-7 сек., но на практика не се използва време на реверберация по-голямо от 4 сек. поради опасност от самовъзбуждане.



Фиг.12.6

Изискванията към равномерността на честотната характеристика на елементите на амбиофоничната система са много високи. Една неравномерност от 6 dB в работния честотен обхват вече не позволява получаването на време на реверберация, съществено различно от това на залата.

Амбиофоничната система се възбужда от дифузната съставка на звуковото поле. Генерация започва, когато усилването по цялата верига стане равно на 1, т.е. когато коефициентът на усилване стане:

$$k_u = \frac{1}{E_M} \cdot \frac{1}{E_{в.г.}} \cdot \frac{p_1}{p_{диф.}}$$

(12.9)

E<sub>М</sub>-чувствителност на микрофона, mV/Pa.

E<sub>в.г.</sub>-чувствителност на високоговорителя, Pa/W<sup>1/2</sup>.

p<sub>диф.</sub>-дифузна съставка на звуковото налягане

$p_1$ -звуково налягане, създавано от един високоговорител на разстояние 1 метър.