

# Акустика

Наука о получении, распространении, взаимодействии с веществом и восприятии звука

# Звук

Звук – упругие волны в среде в диапазоне частот 16-20000 Гц, воспринимаемые ухом. В более широком смысле звуком называют также инфразвук (частоты ниже слышимых) и ультразвук (частоты выше слышимых ухом). Волны эти продольные и создаются неким колеблющимся телом, передающим колебания упругой среде. Связь частоты и длины волны  $v=c/\lambda$ . Если скорость волны в среде  $c$  не зависит от частоты (как в обычном звуке, например), говорят, что в среде отсутствует дисперсия.

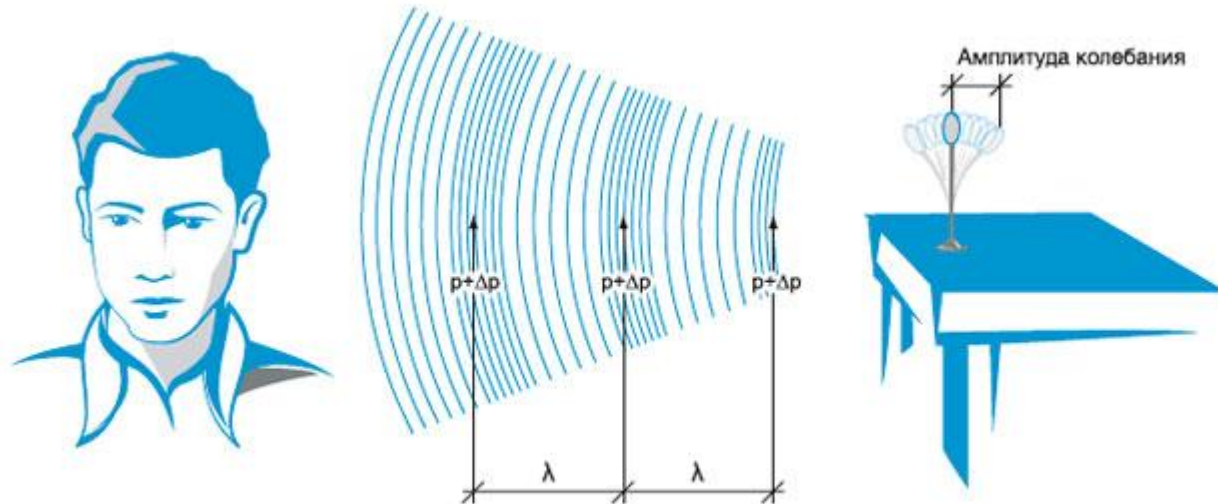
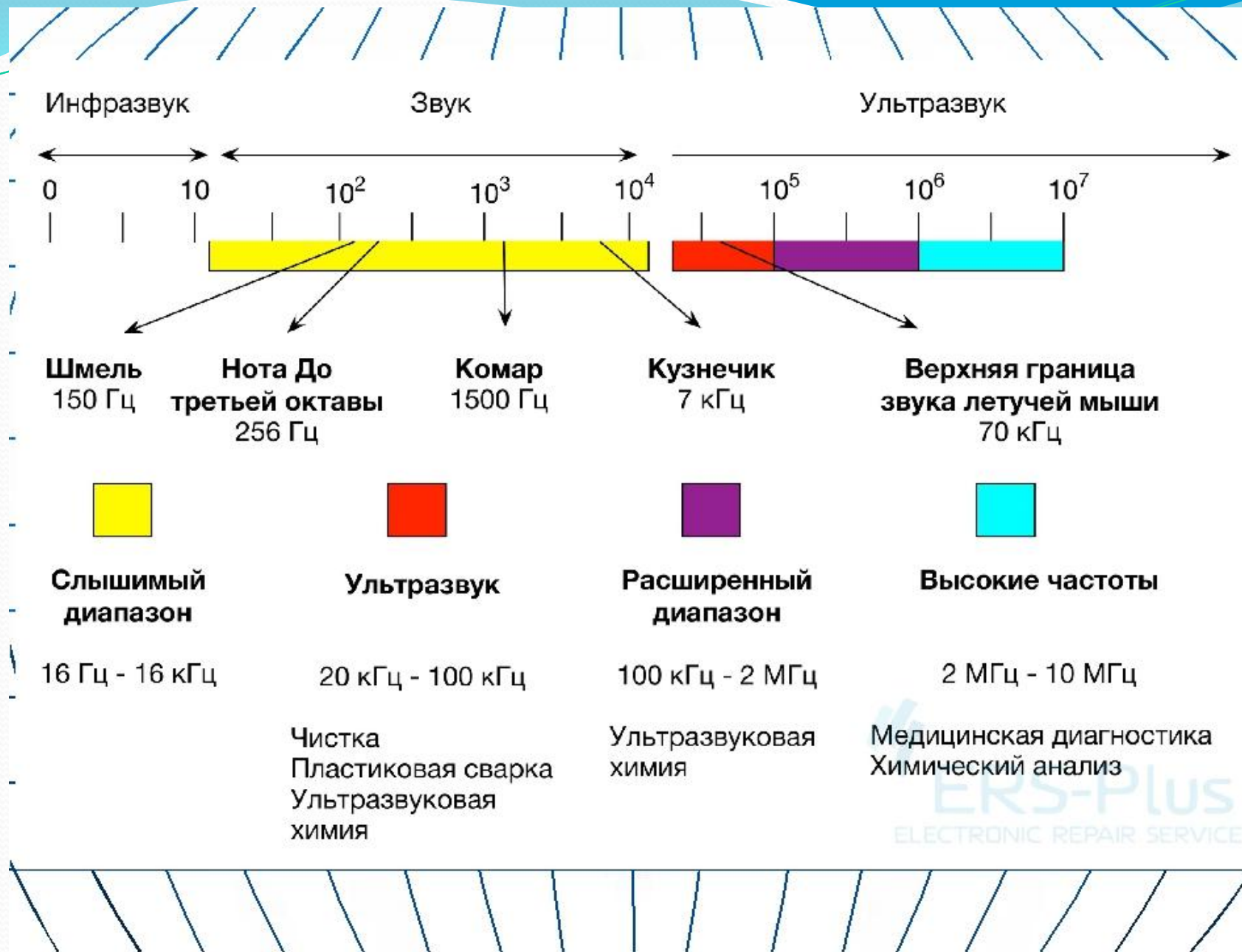
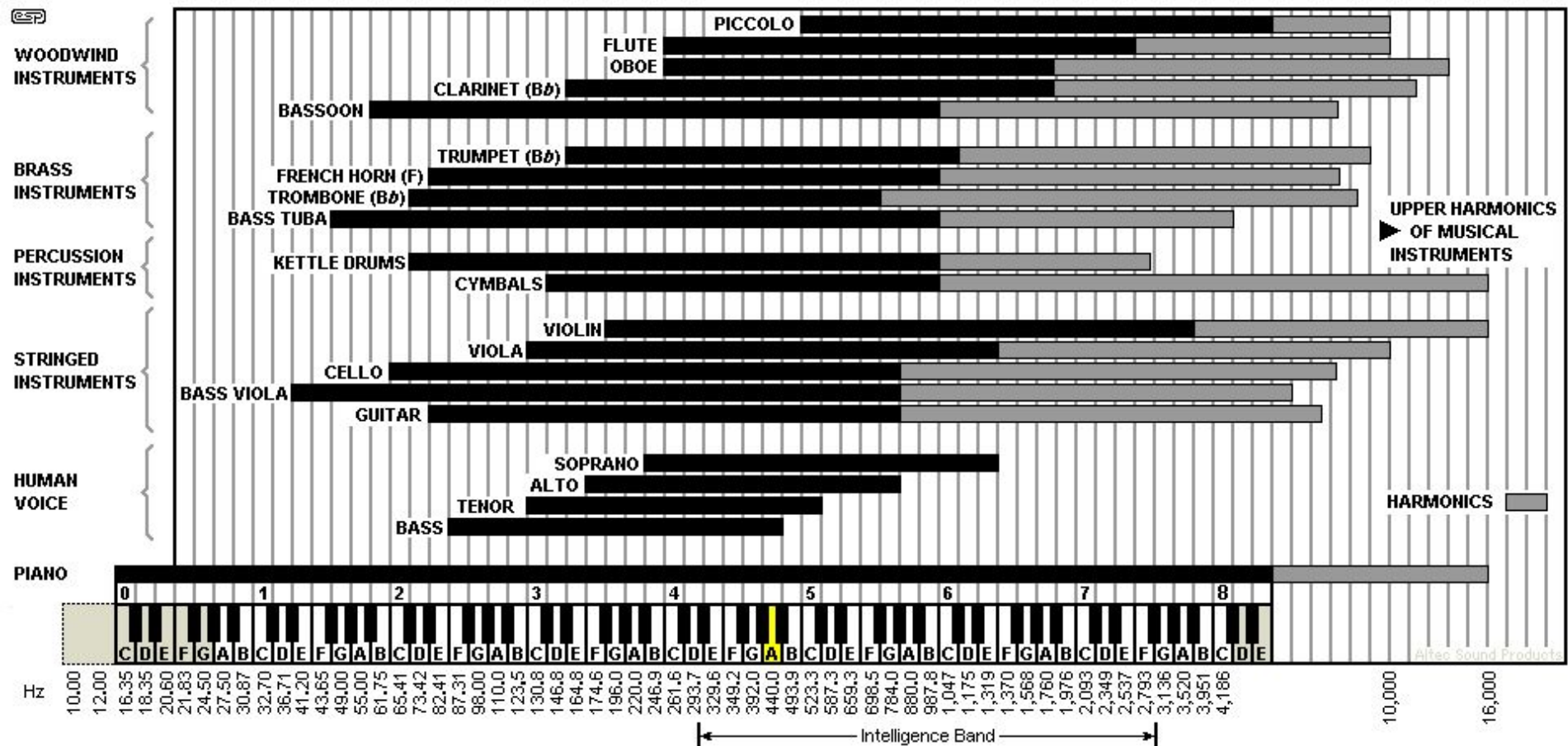


Рисунок 5. Образование зон повышенного и пониженного давления в звуковой волне





# Основные характеристики звука

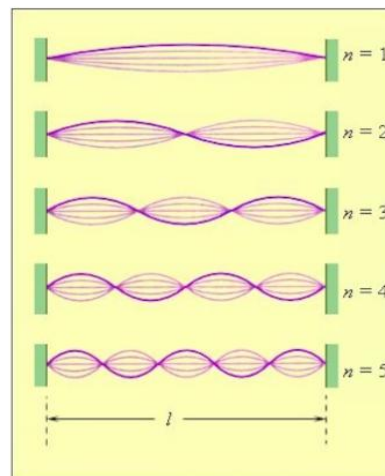
Тон – звук, представляющий собой гармоническую волну заданной частоты.  $A\sin(\omega t - kx)$ . Ясно, что характеристиками звука будут амплитуда колебаний среды  $A$  и связанная с ней **громкость**. И (герцевая) частота колебаний  $\nu = \omega/2\pi$  и связанная с ней **высота тона**. Ясно, что тоны одной частоты от разных источников воспринимаются ухом совершенно одинаково. Камертон – устройство для получения данного тона.

# Обертоны. Нота

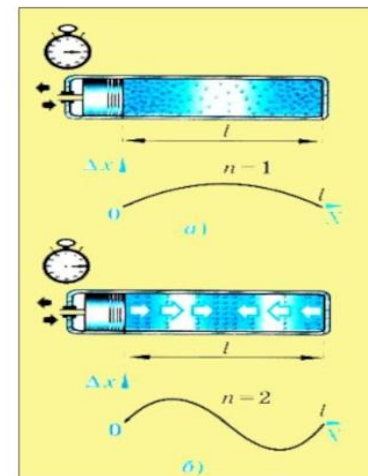
Почему мы различаем звучание одной и той же ноты, сыгранной на разных музыкальных инструментах. Очевидно, состав звука разный. Хотя нота одна и та же. Нота представляет собой сочетание основного тона и его обертонов (старших тонов), которые по частоте кратны основному тону, поэтому звучат в унисон с ним. Они генерируются в резонаторе как стоячие волны кратных частот. Совокупность обертонов в ноте называется спектром, или по- музыкальному, тембром. Нота, таким образом, это не одно гармоническое колебание, а набор колебаний кратных частот. Именно по различию спектров колебаний, мы различаем звучание ноты разных инструментов.

## Стоячие волны

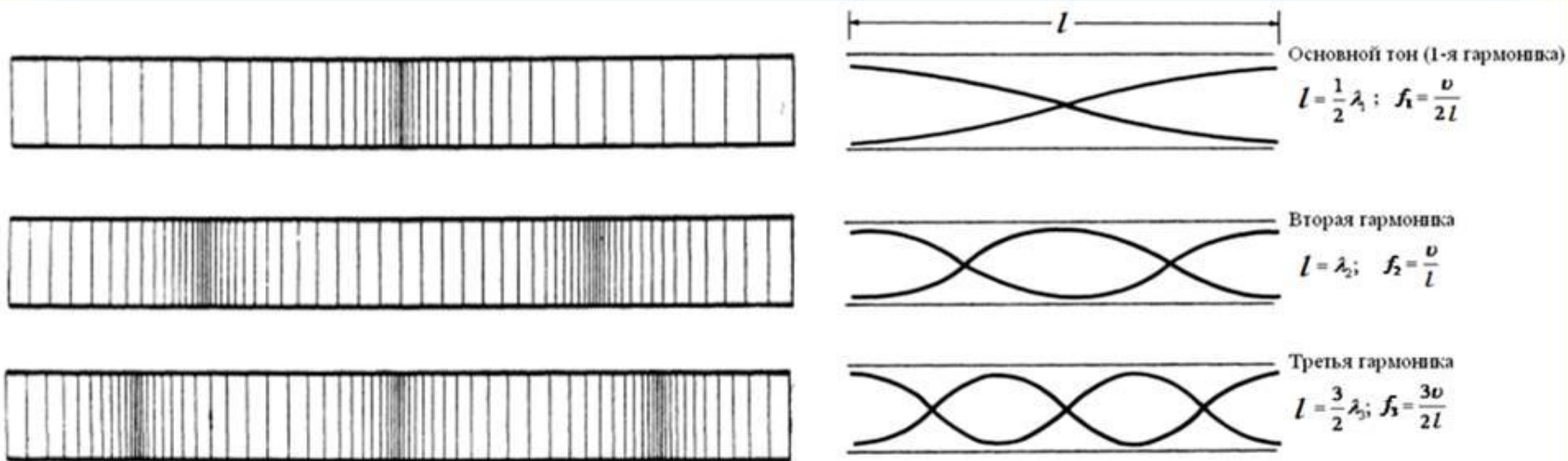
в струне



в воздушном столбе



## ВОЗМОЖНЫЕ ТИПЫ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ ОТКРЫТОЙ ТРУБЫ



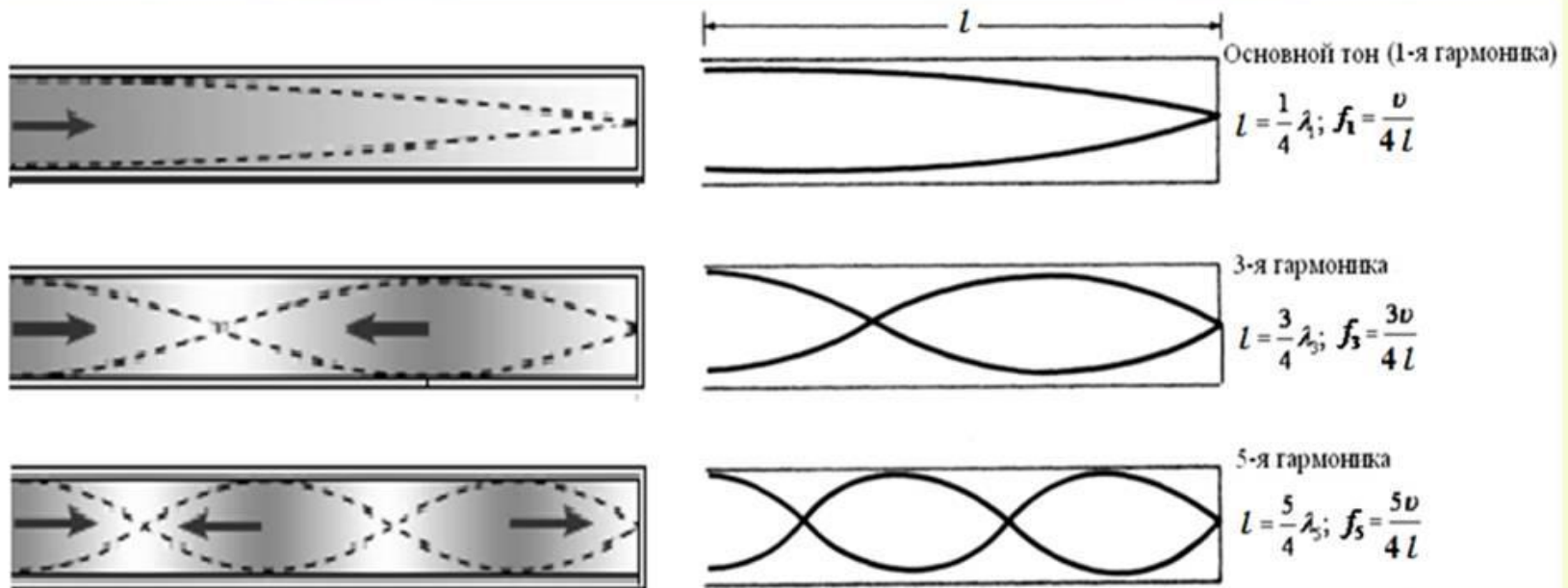
Графики показывают амплитуду смещения колеблющихся частиц воздуха внутри трубы.

Если диаметр трубы мал по сравнению с ее длиной (что обычно имеет место), то пучности возникают очень близко к концу трубы, что и показано на рисунке.

## Закрытая труба с одной стороны

В закрытой трубе на ее закрытом конце всегда возникает узел смещений, а на открытом конце – пучность.

На основной частоте колебаний внутри трубы уместается только четверть длины волны  $l = \lambda/4$ .



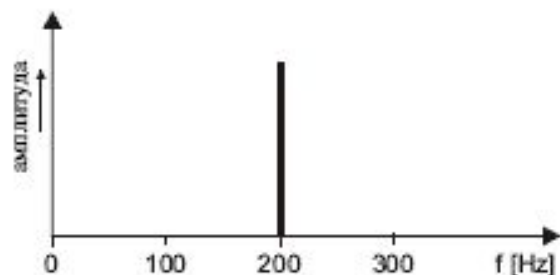
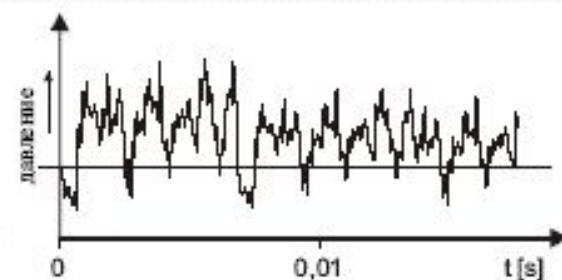
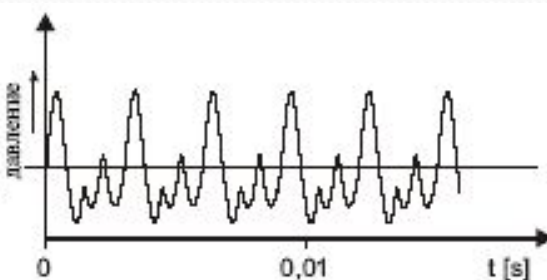
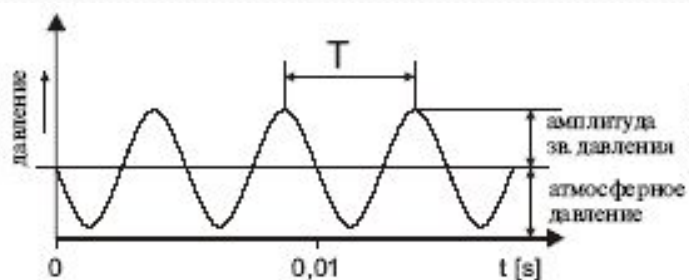
Возможные типы колебаний для закрытой с одной стороны трубы

$$f_m = \frac{v}{4l}(2m - 1) \quad \text{где } m=1, 2, 3, 4, \dots$$

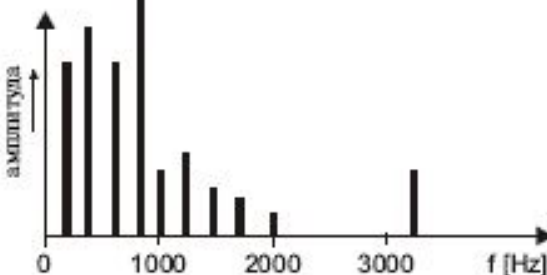


# Музыкальные звуки и шумы

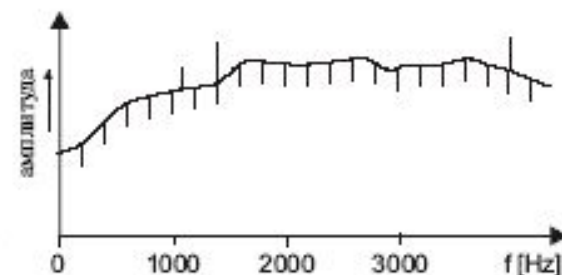
Если к чистому тону, добавить обертона (звучащие ему в унисон), то получится нота (составной тон). Спектральный состав ноты дискретный, высота линии показывает, насколько интенсивно звучит данный обертон, некоторые обертона могут отсутствовать. Шум – это набор звуков с непрерывным распределением частот, из него нельзя выделить отдельные тона.



ЧИСТЫЙ ТОН



СОСТАВНОЙ ТОН



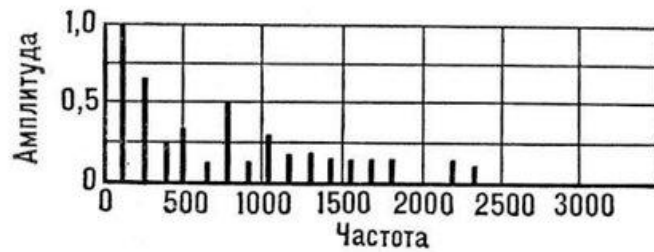
ШУМ

(звук, обладающий непрерывным спектром)

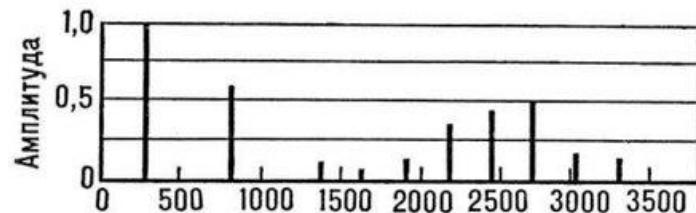
## Примеры спектрального состава музыкальных звуков



Рояль



Кларнет



Воспринимаемая высота тона тоже зависит от тембра звука.

Так, например, высота тона для звуков с богатым спектром определяется слуховой системой даже в том случае, если из них удалить основной тон.

# Немного о теории музыки

Еще Пифагор  
занимался  
выяснением вопроса  
о связи благозвучия с  
длиной струны

## Построение пифагорейской музыкальной гаммы



Если частоты нескольких нот относятся как небольшие целые числа, мы воспринимаем их совместное звучание как благозвучие (консонанс). Это соотношение частот в музыке называется интервалом. Иначе, ноты звучат диссонансно.

Интервалы от ноты До	До	Ре	Ми	Фа	Соль	Ля	Си	До	Ре	Ми	Фа	Соль	Ля	Си
0. Чистая прима ч1	●													
1. Малая секунда м2	●	●												
2. Большая секунда б2	●		●											
3. Малая терция м3	●			●										
4. Большая терция б3	●				●									
5. Чистая кварта ч4	●					●								
6. Т р и т о н ув4/ум5	●						●							
7. Чистая квинта ч5	●							●						
8. Малая секста м6	●								●					
9. Большая секста б6	●									●				
10. Малая септима м7	●										●			
11. Большая септима б7	●											●		
12. Чистая октава ч8	●													●
Вверх	С	Д	Е	Ф	Г	А	В	С	Д	Е	Ф	Г	А	В

# Интервалы и соотношения частот

до-до диез  $277,2 : 261,7 = 1,059\dots$

до-ре  $293,7 : 261,7 = 1,122\dots$

до-ре диез  $311,1 : 261,7 = 1,188\dots 1,2 = \mathbf{6 : 5}$

до-ми  $329,6 : 261,7 = 1,259\dots 1,25 = \mathbf{5 : 4}$

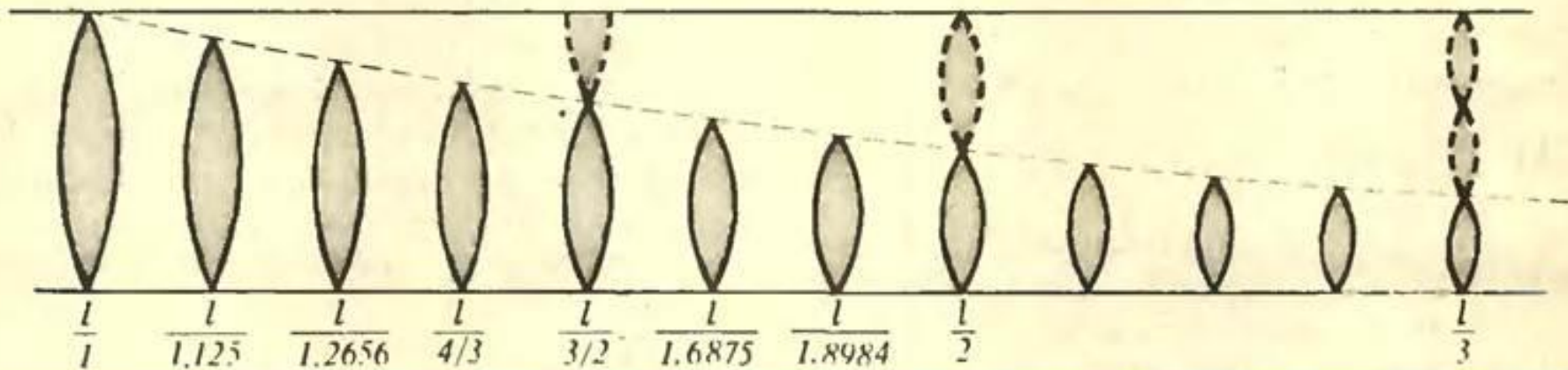
до-фа (кварта)  $349,2 : 261,7 = 1,310\dots \mathbf{4 : 3}$

до-соль (квинта)  $392,0 : 261,7 = 1,498\dots 1,5 = \mathbf{3 : 2}$

до-ля  $440,0 : 261,7 = 1,681\dots$

до-си  $493,9 : 261,7 = 1,887\dots$

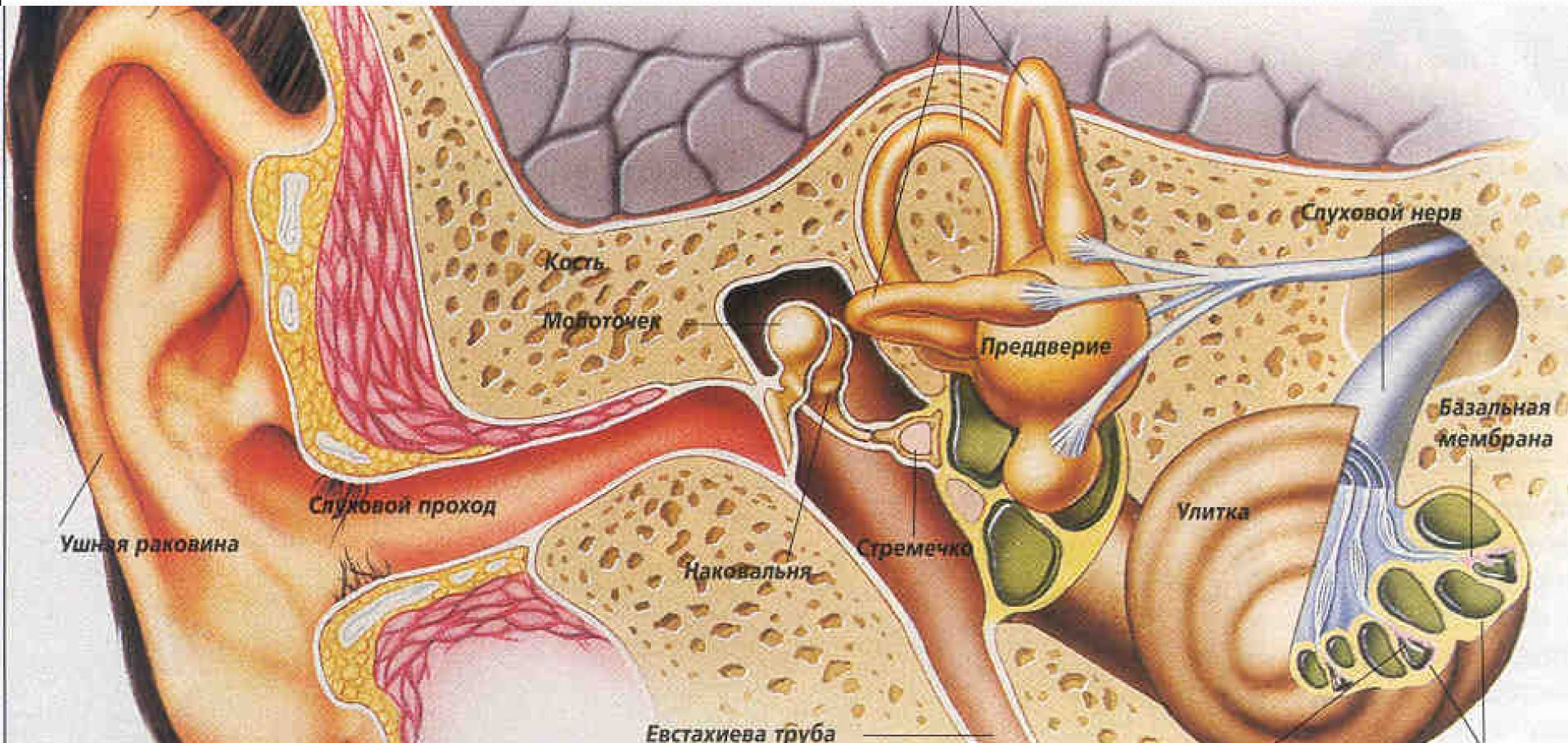
до-до (октава)  $523,4 : 261,7 = \mathbf{2 : 1}$



прима	секунда	терция	квартта	квинта	секста	септима	октава					
$\nu_1$	$1,125 \nu_1$	$(1,125)^2 \nu_1$	$1,333 \nu_1$	$1,500 \nu_1$	$1,125 \cdot 1,5 \nu_1$	$(1,125)^2 \cdot 1,5 \nu_1$	$2 \nu_1$					
до	ре	ми	фа	соль	ля	си	до	ре	ми	фа	соль	

# Громкость

Весьма непростой вопрос. Ясно, что звук воспринимается громче, если избыточное давление на барабанную перепонку больше. Кстати, неплохо бы вспомнить анатомию слухового аппарата человека



# Субъективность восприятия звука

Во-первых, ухо может воспринимать звуки, отличающиеся по громкости более чем в миллион раз. Поэтому равномерная шкала громкости не годится. Во-вторых, разные частоты ухо воспринимает по-разному. Как любой прибор, оно менее чувствительно на границах области восприятия. Кроме того, слух у разных людей немного отличается.

Первую проблему решает введение логарифмической шкалы, в которой на оси громкости откладываются степени числа 10.

Вторую проблему решают кривые слышимости, которые переводят абсолютный уровень громкости (в дБ) в субъективно воспринимаемый человеком (в фонах, которые по сути тоже дБ, но привязанные к чувствительности уха на данной частоте).



- **Интенсивность звука  $I$**  – это количество энергии, переносимое звуковой волной за единицу времени через единицу площади поверхности, перпендикулярной к направлению распространения волны:

$$I = P^2/\rho c,$$

- $I$  – интенсивность звука, Вт/м<sup>2</sup>;  $P$  – звуковое давление, Па;  $\rho$  – плотность среды, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – скорость звука в среде, м/с.

- Увеличение интенсивности и давления звука в 10 раз соответствует приросту ощущения на 1 единицу, названную белом (Б):

$$L = \lg \frac{I}{I_0} = 2 \lg \frac{P}{P_0} \quad , \text{ Бел},$$

где  $I_0$  и  $P_0$  - исходные значения интенсивности и звукового давления (интенсивность и давление звука на пороге слышимости).

- За исходную цифру 0 (ноль) Бел принята пороговая для слуха величина звукового давления  $2 \cdot 10^{-5}$  Па (порог слышимости или восприятия).
- Весь диапазон энергии, воспринимаемой слухом как звук, укладывается при этих условиях в 13—14 Б. Для удобства пользуются не белом, а единицей в 10 раз меньшей – децибелом (дБ), которая соответствует минимальному увеличению силы звука, различаемому ухом.

Пока не привыкли к логарифмам, заметим, что с увеличением давления  $B$  10 раз, громкость возрастает на 20 дБ.

## Границы человеческого слуха

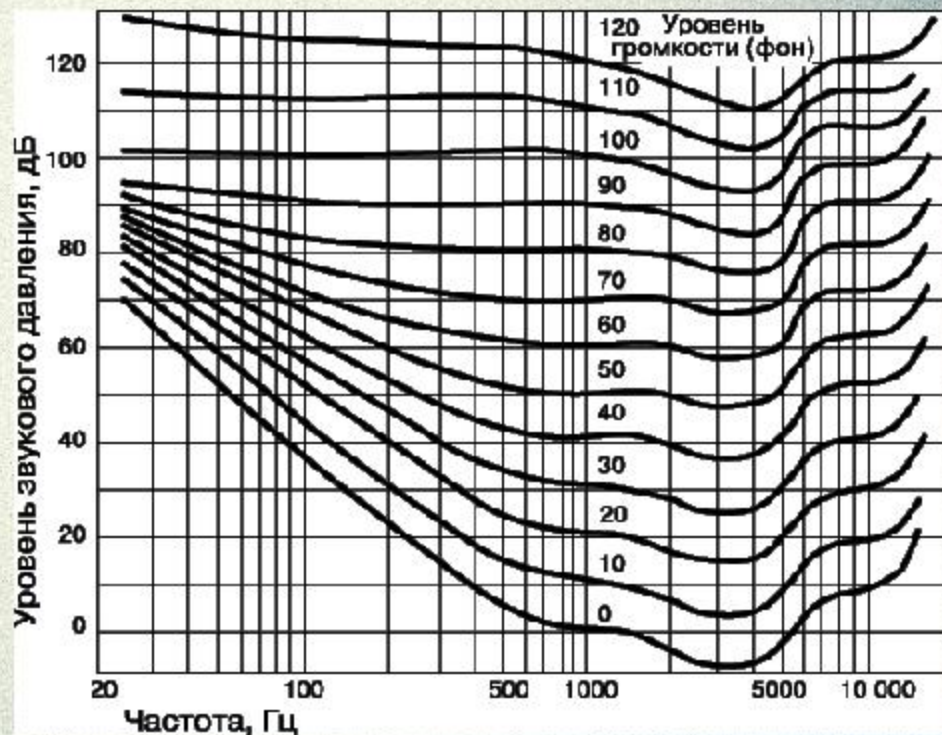


## Громкость

Уровень звукового давления не связан простой зависимостью с психологическим восприятием громкости. Первый из этих факторов объективный, а второй - субъективный. Эксперименты показывают, что восприятие громкости зависит не только от интенсивности звука, но и от его частоты и условий эксперимента. Громкости звуков, не привязанных к условиям сравнения, сравнивать невозможно. Например, при частоте тона 200 Гц необходим уровень звука в 60 дБ, чтобы он воспринимался как равногромкий тону 1000 Гц с уровнем звукового давления 50 дБ.

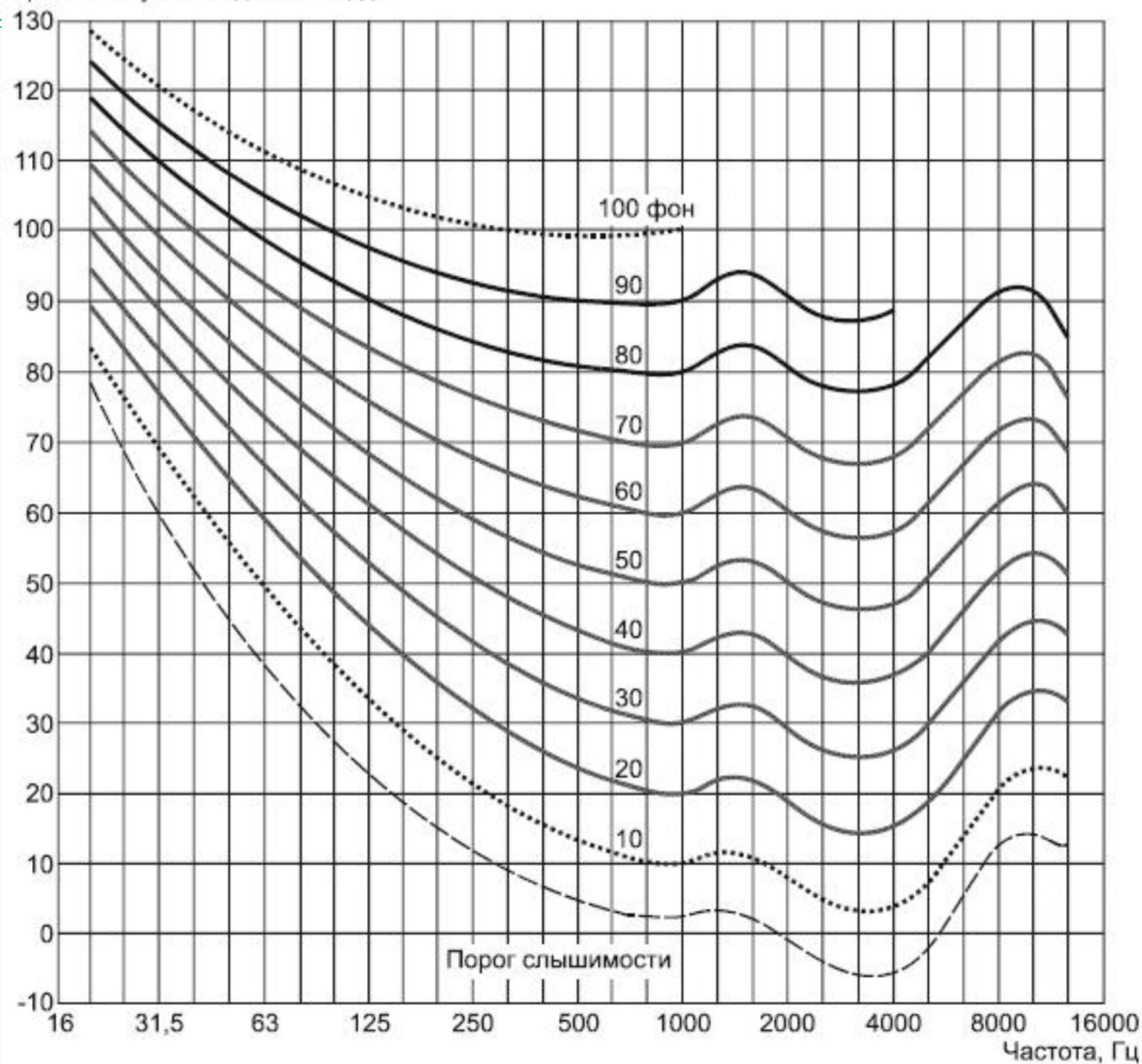
Эти кривые используются для определения фона - единицы уровня громкости, которая тоже измеряется в децибелах. Фон - это уровень громкости звука, для которого уровень звукового давления равногромкого стандартного чистого тона (1000 Гц) равен 1 дБ. Так, звук частотой 200 Гц при уровне 60 дБ имеет уровень громкости в 50 фонов. Нижняя кривая на рис. 9 - это кривая порога слышимости хорошего уха.

Диапазон слышимых частот простирается примерно от 20 до 20000 Гц.



Видно, что одно и то же количество дБ, воспринимается ухом как разное количество фон, в зависимости от частоты. Например, звук с частотой 125 Гц со звуковым давлением 20 дБ уже не слышен (он ниже порога слышимости), в то же время как на частоте 2000 Гц порог слышимости на 20 дБ ниже

Уровень звукового давления, дБ



Порог слышимости

Частота, Гц

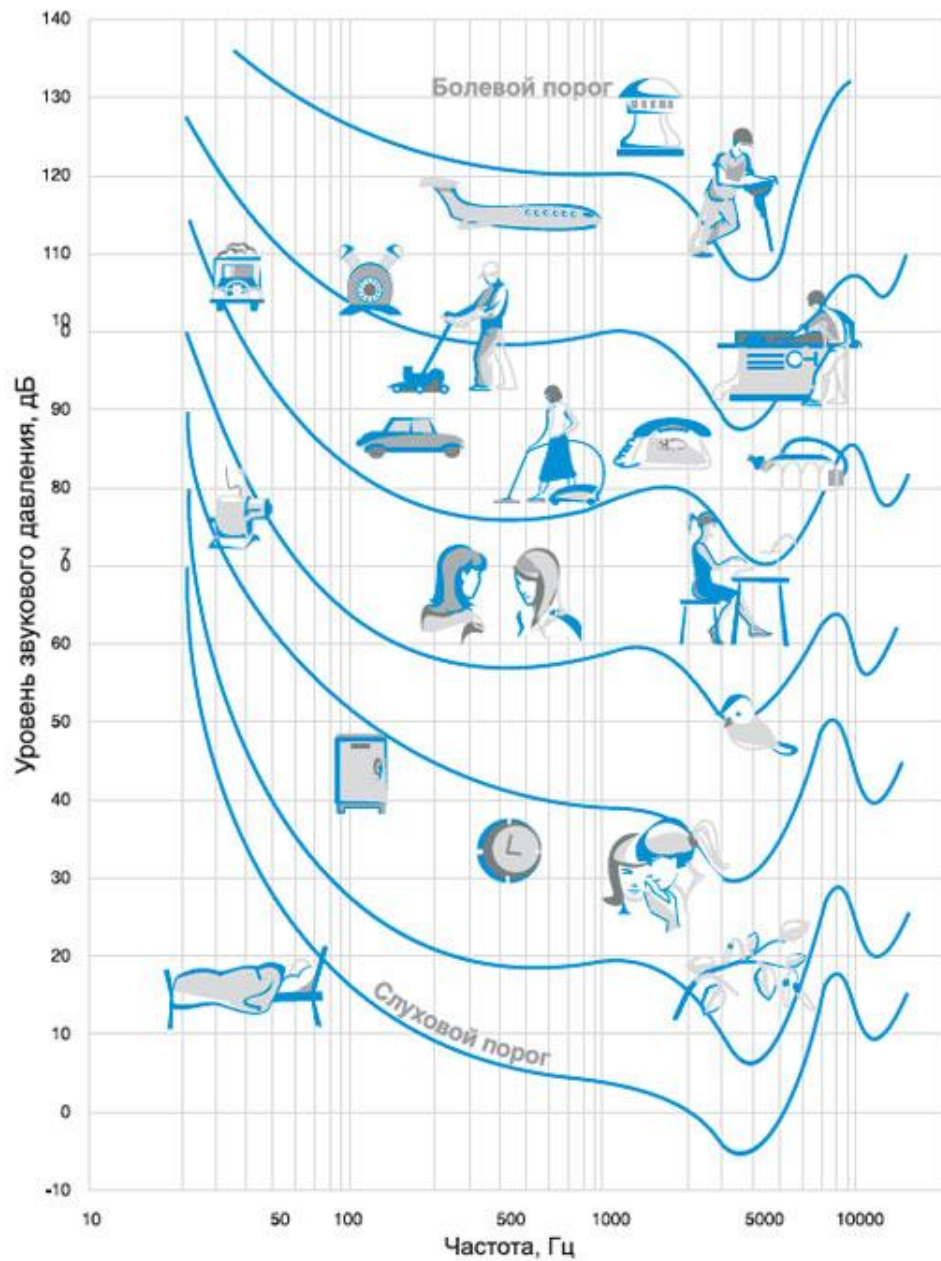


Рисунок 6. Распределение шума по уровню звукового давления и частота