

---

БИБЛИОТЕКА ПЕДИАТРИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

---

**В.П. СИДОРОВ**

---

# **ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИКЕ**

**Часть 1**

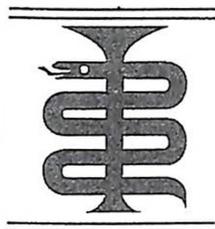
**БИОАКУСТИКА**

---

*Санкт-Петербург*

---

Министерство  
здравоохранения  
Российской Федерации



Санкт-Петербургский  
Государственный  
Педиатрический  
Медицинский  
Университет

---

---

В.П. СИДОРОВ

ПРАКТИКУМ  
ПО ФИЗИКЕ

Часть 1  
БИОАКУСТИКА

УДК 577.3

ББК 28.071

С34

**Сидоров, В.П.**

**С34** Практикум по физике: в 3ч. / Часть 1. Биоакустика. Учебно-методическое пособие для студентов 1 курса. / В.П. Сидоров. – СПб.: СПбГПМУ, 2018. – 48 с.

**ISBN 978-5-907065-42-0**

«Практикум по физике. Часть 1» – пособие для самостоятельной подготовки студентов к семинарским занятиям и лабораторным работам при изучении учебной дисциплины «Физика, математика».

В части 1 сгруппированы материалы по биоакустике, по следующим разделам: измерения, погрешности измерений, колебания и волны, звук, ультразвук, инфразвук, физика слуха, аудиометрия.

По каждому разделу приведены контрольные вопросы.

**Рецензенты:**

*Немов С.А., д. ф -м. н., профессор. Кафедра технологии и исследования материалов СПбПУ им. Петра Великого.*

*Тихомирова А.А., к. э. н., доцент. Кафедра медицинской информатики СПбГПМУ.*

УДК 577.3

ББК 28.071

*Утверждено учебно-методическим советом Государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации*

**ISBN 978-5-907065-42-0**

© СПбГПМУ, 2018

## ВВОДНОЕ ЗАНЯТИЕ

### 1. Измерения. Единицы измерений в системе СИ

*Измерение – это процесс сравнения исследуемой величины с ее значением, принятым за единицу.*

Международная система единиц СИ (System International) имеет в своей основе следующие девять единиц измерения:

Таблица 1

Основные единицы системы СИ

Величина	Обозначение	Наименование
Длина	1м	метр
Масса	1кг	килограмм
Количество вещества	1моль	моль
Время	1с	секунда
Сила электрического тока	1А	ампер
Температура	1К	кельвин
Сила света	1кд	кандела
Плоский угол	1рад	радиан
Телесный угол	1ср	стерадиан

Из этих основных единиц выводятся все производные единицы; некоторые из них приедены в табл. 2.

Таблица 2

Некоторые производные единицы системы СИ

Величина	Обозначение и связь с другими величинами	Наименование
Частота колебаний	$1\text{Гц} = 1\text{ 1/с} = 1\text{ с}^{-1}$	герц
Сила	$1\text{Н} = 1\text{ кг м/с}^2$	ньютон
Давление	$1\text{ Па} = 1\text{ Н/м}^2$	паскаль
Энергия, механическая работа	$1\text{Дж} = 1\text{ Н}\cdot\text{м}$	джоуль
Мощность	$1\text{Вт} = 1\text{ Дж/с}$	ватт
Электрический заряд	$1\text{Кл} = 1\text{ А}\cdot\text{с}$	кулон
Напряжение, электрический потенциал	$1\text{В} = 1\text{ Дж/Кл}$	вольт
Емкость	$1\text{Ф} = 1\text{ Кл/В}$	фарад
Электрическое сопротивление	$1\text{ Ом} = 1\text{ В/А}$	ом
Электрическая проводимость	$1\text{ См} = 1\text{ А/В}$	сименс
Магнитная индукция	$1\text{Тл} = 1\text{ Н/А}\cdot\text{м}$	тесла
Поток магнитной индукции	$1\text{Вб} = 1\text{ Тл}\cdot\text{м}^2$	вебер
Индуктивность	$1\text{ Гн} = 1\text{ Вб/А}$	генри
Световой поток	$1\text{лм} = 1\text{ кд/ср}$	люмен
Освещенность	$1\text{лк} = 1\text{ лм/м}^2$	люкс
Активность изотопа	$1\text{Бк} = 1\text{ расп./с} = 1\text{ с}^{-1}$	беккерель
Поглощенная доза излучения	$1\text{Гр} = 1\text{ Дж/кг}$	грей
Эквивалентная доза	$1\text{Зв} = 1\text{ Дж/кг}$	зиверт

Заглавная буква в обозначении единицы измерения означает, что эта единица названа в честь известного физика (Герц, Паскаль, Ом, и др.). Обозначения, не связанные с именами собственными, пишутся с прописной буквы (1кг, 1кд, 1лм, и т.д.).

## 2. Некоторые внесистемные единицы измерений

**Давление.** Единица давления в системе СИ – паскаль (Па).

Внесистемная единица – *миллиметр ртутного столба* (мм рт. ст.)

Связь между ними:  $1 \text{ мм рт. ст.} = 133 \text{ Па}$ ;  $1 \text{ Па} = \frac{1}{133} \text{ мм рт. ст.}$

**Температура** – мера внутренней энергии тел.

Единица температуры в системе СИ – один градус Кельвина (1К).

Нулевая точка в шкале Кельвина сдвинута относительно нулевой точки в шкале Цельсия на 273,16 градуса:  $T(\text{К}) = 273,16 + t(^{\circ}\text{C})$ .

Градус Кельвина (1К) и градус Цельсия ( $1^{\circ}\text{C}$ ) равноценны.

**Энергия.** Единица энергии в системе СИ – джоуль (Дж).

Внесистемная единица – *калория* (кал).

Связь между ними:  $1 \text{ кал} = 4,19 \text{ Дж}$ ;  $1 \text{ Дж} = 1 / 4,19 \text{ кал} = 0,24 \text{ кал}$ .

Внесистемная единица – *электронвольт* (эВ) – энергия, которую приобретает электрон, прошедший ускоряющую разность потенциалов величиной в один вольт. Заряд электрона  $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ .

Связь с джоулем:  $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ .

Внесистемная единица – *киловатт-час* (кВт·час). Введена на ос-

нове

формулы, определяющей мощность:  $P = E / t$ . Отсюда – выражение для энергии:  $E = P \cdot t$  и единица измерения кВт·час. Эта единица широко применяется при учете производства и потребления электроэнергии.

**Время.** Единица времени в системе СИ – секунда (с).

Внесистемные единицы:  $1 \text{ мин} = 60 \text{ с}$ ;  $1 \text{ час} = 3600 \text{ с}$ .

**Мощность.** Единица мощности в системе СИ – ватт (Вт).

Внесистемная единица – *лошадиная сила* (л.с.)

Связь между ними:  $1 \text{ л.с.} = 720 \text{ Вт} = 0,72 \text{ кВт}$ ,  $1 \text{ кВт} = 1,38 \text{ л.с.}$

## 3. Дробные доли и кратные единицы измерения

Дробные доли единиц (на примере одной секунды)

Таблица 3

Обозначение	Наименование
1с	<u>секунда</u>
1дс = $10^{-1} \text{ с}$	<u>децисекунда</u>
1сес = $10^{-2} \text{ с}$	<u>сантисекунда</u>

1мс = $10^{-3}$ с	<u>миллисекунда</u>
1мкс = $10^{-6}$ с	<u>микросекунда</u>
1нс = $10^{-9}$ с	<u>наносекунда</u>
1пс = $10^{-12}$ с	<u>пикосекунда</u>
1фс = $10^{-15}$ с	<u>фемтосекунда</u>
1ас = $10^{-18}$ с	<u>аттосекунда</u>

Таблица 4

Кратные единицы (на примере одного метра)

Обозначение	Наименование
1м	метр
1км = $10^3$ м	километр
1Мм = $10^6$ м	Мегаметр
1Гм = $10^9$ м	Гигаметр
1Тм = $10^{12}$ м	Тераметр
1Пм = $10^{15}$ м	Петаметр
1Эм = $10^{18}$ м	Эксаметр
1Зм = $10^{21}$ м	Зеттаметр
1Йм = $10^{24}$ м	Йоттаметр

Несколько сложнее обстоит дело с кратными единицами в информатике.

Система повышающих приставок в таблицах 4 и 5 одна и та же: кило-, Мега-, Гига-, и т.д. Но табл. 4 соответствует десятичной системе исчисления; в ней соседние строки отличаются в  $10^3 = 1000$  раз. А в табл. 5 те же по названию приставки работают со сбоем, в котором «виновата» двоичная система исчисления: соседние строки таблицы 5 отличаются в  $2^{10} = 1024$  раза.

Таблица 5

Кратные единицы в информатике

Название, Обозначение	байт	Кбайт	Мбайт	Гбайт
1байт = 8 бит				
Килобайт	$2^{10} = 1024$			
Кбайт				
Мегабайт	$2^{20} = 1048576$	$2^{10} = 1024$		
Мбайт				
Гигабайт	$2^{30}$	$2^{20} = 1048576$	$2^{10} = 1024$	
Гбайт				
Терабайт	$2^{40}$	$2^{30}$	$2^{20} = 1048576$	$2^{10} = 1024$
Тбайт				
Петабайт	$2^{50}$	$2^{40}$	$2^{30}$	$2^{20} = 1048576$
Пбайт				
Эксабайт	$2^{60}$	$2^{50}$	$2^{40}$	$2^{30}$
Эбайт				
Зеттабайт	$2^{70}$	$2^{60}$	$2^{50}$	$2^{40}$
Збайт				
Йотабайт	$2^{80}$	$2^{70}$	$2^{60}$	$2^{50}$
Йбайт				

#### 4. Прямые и косвенные измерения

**Прямые измерения.** Результат прямых измерений получают при непосредственном использовании измерительного прибора по его прямому назначению.

**Примеры прямых измерений:**

- Измерение размеров предмета с помощью рулетки. Если рулетка – простейшая металлическая, результат измерений считывается на ее шкале. Если это лазерная рулетка высокой точности, результат считывается с ее дисплея.
- Измерение силы тока с помощью амперметра (миллиамперметра, микроамперметра), будь то прибор аналоговый или цифровой.
- Измерение времени с помощью часов, с любой индикацией времени.
- Измерение температуры тела пациента при помощи медицинского термометра (ртутного или электронного).

**Косвенные измерения.** Результат косвенных измерений вычисляют с помощью какой-нибудь известной формулы, в которой одна из величин – косвенно измеряемая величина – должна быть единственной неизвестной величиной. Остальные величины, функционально связанные с измеряемой – результаты их прямых (или косвенных) измерений.

Но бывает и проще: «известная формула» может соответствовать всего лишь определению измеряемой величины.

**Примеры косвенных измерений:**

- Измерение средней скорости движения. Формула соответствует определению скорости:  $V = S / t$ , где  $S$  – путь,  $t$  – длительность его прохождения.
- Измерение периода полураспада радиоактивного препарата по двум результатам измерения интенсивности излучения (с помощью дозиметра) и промежутка времени между ними (с помощью обычных часов). Расчетная формула – математические следствия закона радиоактивного распада.
- Измерение сопротивления проводника, Его можно получить как результат прямых измерений, если иметь омметр – прибор для измерения омического сопротивления. Если омметра нет, сопротивление проводника можно измерить косвенно, по результатам прямых измерений напряжения  $U$  на концах проводника (вольтметром) и силы тока  $I$  при таком напряжении (амперметр). Расчетная формула для сопротивления  $R$  – алгебраическое следствие закона Ома для участка цепи:  $R = U / I$ .

#### 5. Точность. Абсолютная и относительная погрешность измерений

**Точность измерений** – качественная оценка близости результата измерений к истинному значению измеряемой величины. Эта интуитивно понятная категория не имеет своих собственных количественных показателей и поэтому пользуется чужими: *абсолютной и относительной погрешностью* измерений.

Истинное значение измеряемых величин определить невозможно.

Причин тому – великое множество; в каждом конкретном случае находится группа факторов, ограничивающих точность. Так что погрешности измерений неизбежны, и обязательным этапом любого измерения должна быть их количественная оценка.

Факторы, приводящие к появлению погрешностей, укрупненно, могут быть связаны с особенностями исследуемого объекта, со свойствами измерительного прибора, с качествами экспериментатора.

Процедуры любых медицинских измерений жестко регламентированы до мелочей (измерение артериального давления, снятие ЭКГ, и т.п.). Эти регламенты нужны, чтобы исключить возможное появление каких-нибудь дополнительных причин погрешностей.

*Абсолютная погрешность  $\Delta x$  – это отклонение результата измерения  $x$  от истинного значения измеряемой величины:*

$$\Delta x = x - x_{\text{ист.}}$$

Абсолютная погрешность  $\Delta x$  имеет ту же размерность, что и величина  $x$ .

Если вдуматься, предложенное определение абсолютной погрешности – предел совершенства; лучше – не придумаешь. Но если вдуматься еще глубже, толку от этого определения маловато, меньше, чем хотелось бы, поскольку истинное значение  $x_{\text{ист}}$  нам не известно и не будет известно никогда. Величину абсолютной погрешности приходится определять опосредованно, обходными путями. Кое-что вам знакомо из курса математической статистики. Но и она не всесильна.

### *Некоторые методы оценки абсолютной погрешности измерений.*

1. Принцип цены наименьшего деления. Школьная линейка имеет шкалу, разбитую на сантиметры и миллиметры. Цена наименьшего деления линейки – 1мм. Следовательно, измерения размеров тел с помощью такой линейки могут производиться с абсолютной погрешностью  $\Delta x = 1\text{мм}$ . Форма записи результата измерений (пример):  $L = 195 \pm 1\text{ мм}$ .

Производители измерительной техники изготавливают шкалы приборов так, чтобы цена деления соответствовала абсолютной погрешности.

2. Абсолютную погрешность прибора можно определить с помощью другого прибора, имеющего более высокую точность измерений.

3. При проведении многократных повторных измерений, чем больше число измерений, тем меньше абсолютная погрешность средневыворочного результата.

4. Абсолютную погрешность измерений, выполняемых прибором, легко определить, если есть информация о классе прибора. Эта информация может быть указана в техническом паспорте прибора; иногда класс прибора  $K$  указан на шкале прибора, где-нибудь с краю.

Согласно ГОСТ 8.401-80, класс  $K$  обозначается одним из чисел следующего числового ряда:

6; 4; 2,5; 1,5; 1,0; 0,5; 0,2; 0,1; 0,05; 0,02; 0,01.

Абсолютная погрешность для результата измерения  $x$ :

$$\Delta x = \pm K \cdot x_{\max} / 100$$

*Пример вычисления* по этой формуле: миллиамперметр класса  $K=0,5$ , предназначенный для измерения токов до  $I_{\max} = 250$  мА, показал силу тока  $I = 180$  мА.

Абсолютная погрешность при этом:  $\Delta I = 0,5 \cdot 250 / 100 = 1,25$  мА.

*Результат измерений*:  $I = 180 \pm 1,25$  мА. Правильнее записать этот результат с округлением до единиц младшего разряда результата 180, то есть считать окончательным результатом запись  $I = 180 \pm 1$  мА.

*Относительная погрешность  $\delta x$  результата измерений* – это отношение абсолютной погрешности  $\Delta x$  к величине  $x$  результата измерения:

$$\delta x = \Delta x / x \quad (2)$$

*Относительная погрешность* – величина безразмерная. Поскольку, как правило,  $\Delta x \ll x$ , относительную погрешность обычно выражают в процентах. Например, результату измерений  $I = 180 \pm 1$  мА соответствует относительная погрешность  $\delta I = 1 / 180 = 0,00555 = 0,56\%$

Относительную погрешность удобно использовать для сопоставления точности измерений, выполняемых разными методами; измерений, выполняемых в разных диапазонах измеряемой величины и даже для сравнения точности измерения разных физических величин.

## 6. Результаты измерений в категориях математической статистики

С точки зрения теории вероятностей величина, которая при измерениях не может быть установлена точно, может рассматриваться как случайная величина, и может анализироваться методами теории вероятностей и математической статистики, знакомыми вам по математическому блоку курса «Физика, математика».

Вместе с тем, измерения – это вид деятельности, имеющий многовековую историю, сложившийся круг понятий и методов.

Вам остается убедиться, что недавно изучавшаяся вами математическая статистика и традиционная теория измерений хорошо дополняют друг друга.

Если бы идеально точные измерения были возможны, то каждый результат такого измерения можно бы представить, как точку, положение которой на числовой оси твердо установлено и сомнениям не подлежит.

В реальных измерениях результат измерений – это некоторый *интервал*  $x \pm \Delta x$  (от  $x - \Delta x$  до  $x + \Delta x$ ), в котором содержится истинное значение измеряемой величины – *доверительный интервал*.

Но доверительный интервал задается в привязке к результату  $x$  состоявшегося измерения. Если провести повторное измерение, доверительный интервал может измениться. Утверждение о том, что истинное значение измеряемой величины содержится в обсуждаемом интервале, справедливо лишь с некоторой вероятностью  $P$ , которая называется *доверительной вероятностью*.

Величина  $\alpha = 1 - P$  – *уровень значимости* – вероятность того, что истинное значение измеряемой величины не содержится в доверительном интервале.

Проведение повторных измерений приводит к уменьшению ширины доверительного интервала или к уменьшению уровня значимости и увеличению доверительной вероятности; выбор при этом – за экспериментатором.

Указания, как определять границы доверительных интервалов, приведены в данном пособии в описаниях лабораторных работ всюду, где это необходимо.

## 7. Систематические и случайные погрешности

**Систематические погрешности** – это погрешности, вызываемые факторами, действующими постоянно (т.е. систематически). Их можно обнаружить и измерить с помощью более точных приборов. Прибор, дающий систематическую погрешность, всегда завышает или всегда занижает свои показания, то есть во всех измерениях значения *абсолютной погрешности* – это числа одного знака. Но по модулю она может быть от случая к случаю различной.

Причины появления систематических погрешностей могут быть тривиальными (например, разрядилась батарейка), а могут быть и более коварными (непостоянство диаметра капилляра в термометре; несовершенство методики косвенных измерений). Количество возможных причин может исчисляться десятками. Единой методики выявления причин появления систематических погрешностей не существует.

*Вопрос для быстро соображающих: какие неожиданности грозят автомобилисту, если он контролирует расход топлива по показаниям уровнемера, а бензобак сужается книзу? Какую погрешность имеет уровнемер?*

Если систематическая погрешность обнаружена и оценена количественно, то возможны следующие варианты действий:

- устранение ее причины;
- коррекция показаний состоявшихся и будущих измерений на величину систематической погрешности;
- пренебрежение систематической погрешностью, если она достаточно мала.

**Случайные погрешности** – результат несогласованного действия группы факторов, среди которых нет доминирующих по влиянию на общий результат.

**Случайные погрешности имеют следующие свойства:**

1. Одинаковые по модулю положительные и отрицательные погрешности равновероятны.

2. Меньшие по модулю погрешности встречаются чаще, чем большие.

3. С увеличением числа измерений одной и той же величины, среднее арифметическое значение случайных погрешностей, посчитанное с учетом их знаков, стремится к нулю. Это означает, что с ростом количества измерений *среднеарифметическое значение результатов измерений стремится к истинному значению измеряемой величины*.

Свойство 3 – кардинальный способ уменьшения величины случайных погрешностей – увеличение количества измерений.

Случайные и систематические погрешности могут спокойно сосуществовать друг с другом.

## 8. Нормальный закон распределения в экспериментальных исследованиях

Случайные величины, обладающие свойствами 1–3 предыдущего раздела, можно сказать, предрасположены к тому, чтобы иметь распределение вероятности, известное как распределение Гаусса (нормальный закон распределения). По нормальному закону распределено очень многое в самых разнообразных областях знаний.

Универсальность нормального закона сумел обосновать А.М. Ляпунов. Согласно его теореме, если случайная величина  $X$  представляет собой сумму очень большого числа взаимно независимых случайных величин  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , влияние каждой из которых на всю сумму ничтожно мало, то независимо от того, каким законам подчиняются слагаемые  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , сама величина  $X$  будет иметь распределение вероятностей, близкое к нормальному, и тем точнее, чем больше число слагаемых  $n$ .

Человеческий организм – сложнейшая система; количество показателей жизнедеятельности – громадное; количество их возможных связей друг с другом – еще больше. Требование теоремы Ляпунова о том, чтобы влияние каждого из них на всю сумму было ничтожно малым, может быть выполнено в одних исследованиях и не выполненным – в других.

В ходе любого медико-биологического эксперимента, накопив выборку результатов измерений некоего параметра, имеет смысл проверить ее на соответствие нормальному закону распределения, применив подходящий случаю статистический критерий (Шапиро-Уилка, Пирсона).

При этом, любой результат проверки по-своему интересен. Если гипотеза о нормальном распределении *принимается*, вы получаете возможность применить к этому параметру все свои познания о свойствах нормально распределенных величин. Если же гипотеза *не принимается*, вы приходите к выводу, что среди множества факторов, влияющих на исследуемый параметр, есть доминирующие по влиянию, и их неплохо бы выявить; и это уже – призыв к действиям в нужном направлении.

Что касается применимости нормального закона к погрешностям измерений, то если систематические погрешности устранены (или вычтены из результатов измерений), то по опыту исследований погрешностей в измерительных системах, оставшиеся *случайные погрешности распределены по нормальному закону или очень близки к нему*.

### *Контрольные вопросы по теме «Вводное занятие»*

1. Измерения. Основные единицы системы СИ.
2. Производные единицы системы СИ для частоты, силы, давления, энергии, мощности.

3. Производные единицы системы СИ для электрических и магнитных величин: заряд, потенциал, сопротивление, электроемкость, магнитная индукция, поток магнитной индукции, индуктивность.
4. Некоторые внесистемные единицы: миллиметр ртутного столба, калория, электронвольт, лошадиная сила.
5. Дробные и кратные единицы.
6. Прямые и косвенные измерения. Примеры.
7. Абсолютная и относительная погрешность измерений. Методы оценки абсолютной погрешности.
8. Доверительный интервал. Доверительная вероятность. Уровень значимости.
9. Систематические погрешности, их происхождение, свойства, способы выявления и уменьшения.
10. Случайные погрешности, их происхождение, свойства, способы выявления и уменьшения.
11. Нормальный закон распределения: причины его универсальности; применение в эксперименте.

## **БИОАКУСТИКА. ЗВУК**

В этой главе рассматриваются вопросы физики слуха:

- характеристики колебаний и волновых процессов;
- получение, распространение и особенности восприятия звука в привычном смысле этого слова, то есть звуковых волн слышимого диапазона частот (16 Гц – 20 кГц),
- строение уха, его функционирование, вопросы контроля качества слуха.

Заключительный раздел – методические указания по выполнению лабораторной работы «Определение порогов слышимости с помощью аудиометра».

### **1. Колебания. Их характеристики. Гармонические колебания**

*Колебания* – это процессы, характерные той повторяемостью во времени. По физической природе колебания могут быть механическими, электромагнитными, смешанного типа.

Простейший пример механической колебательной системы – грузик, качающийся на нити. Воспользуемся этой легко представимой системой, чтобы систематизировать сведения о колебаниях как таковых, об их общепринятых характеристиках и единицах их измерений.

*Свободные колебания* – это колебания в системе, выведенной из состояния равновесия и предоставленной самой себе. Если грузик отклонить на нити и отпустить, начнутся его свободные колебания.

*Собственная частота* (частота собственных колебаний) – это частота свободных колебаний в системе, В примере с грузиком она зависит от длины нити и от ускорения свободного падения в данной местности. Причины возникших

колебаний: действие силы тяжести, инерция грузика и то, что мы, первоначально отклонив грузик, сообщили ему некоторую механическую энергию. Отпустив отклоненный грузик, мы предоставили ему возможность совершать свободные колебания.

Однако свободные колебания грузика будут затухающими. Причины – потери энергии на преодоление сил сопротивления.

**Период колебаний  $T$**  – длительность одного полного цикла колебаний.

**Периодические колебания** характерны постоянством периода; пример – колебания грузика на нити. А вот колебания любых характеристик сердца (механических, электрических, магнитных) не являются строго периодическими даже при нормальной работе сердца.

**Частота колебаний  $\nu$**  – количество колебаний в единицу времени. Частота обычно измеряется в герцах. Если колебания таковы, что за одну секунду происходит один их полный цикл, то их частота – 1 Гц. Для более частых колебаний применяются кратные герцу единицы:

$$1 \text{ кГц} = 10^3 \text{ Гц}; 1 \text{ МГц} = 10^6 \text{ Гц}; 1 \text{ ГГц} = 10^9 \text{ Гц}; 1 \text{ ТГц} = 10^{12} \text{ Гц}.$$

Частота и период взаимно обратны:  $\nu = 1/T$ ;  $T = 1/\nu$ .

Что колеблется в примере с колебаниями грузика на нити? Прежде всего вспоминаются зрительные образы: происходит непрерывное изменение положения грузика в пространстве, с характерной для колебаний повторяемостью положений. Но это далеко не все, что колеблется в этом примере. Колебаниям подвержены горизонтальная и вертикальная координаты грузика, его скорость и ускорение, его кинетическая и потенциальная энергия, угол отклонения нити и сила ее натяжения. Этот перечень можно бы и продолжить.

**Гармонические колебания** – это колебания, при которых характеризующая величина  $y$  изменяется во времени  $t$  по закону синуса или косинуса:

$$y = A \sin(\omega t + \varphi_0) \quad \text{или} \quad y = A \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (1)$$

Здесь  $A$  – **амплитуда колебаний** – наибольшее отклонение величины  $y$  от ее значения в положении равновесия системы (или от другой, более удобной, стадии колебаний);

$\omega$  – так называемая **циклическая частота**; ее связь с обычной частотой:  $\omega = 2\pi\nu$ , то есть они отличаются друг от друга в 6.28 раза.

$(\omega t + \varphi_0)$  – **фаза колебаний** – величина, численно характеризующая стадию, в которой находится очередной цикл в любой момент времени  $t$ . В частности, при  $t = 0$  значение фазы равно  $\varphi_0$ , и это – начальная фаза.

На рис.1 показано ровно то, что значится в подписи к нему. Слева, на векторной диаграмме, показан **амплитудный вектор  $A$**  (его модуль равен амплитуде колебаний), образующий с горизонтальной осью  $x$  угол  $\varphi_0$ , равный начальной фазе колебаний.

Будем, напрягая воображение, равномерно вращать амплитудный вектор против часовой стрелки с постоянной угловой скоростью  $\omega$ , равной циклической частоте колебаний. Проекция конца вектора  $A$  на ось  $y$  будет непрерывно

меняться. На графике справа показана проекция вращающегося вектора  $A$  на ось  $y$  как функция времени  $t$ :  $y = A \sin(\omega t + \varphi_0)$

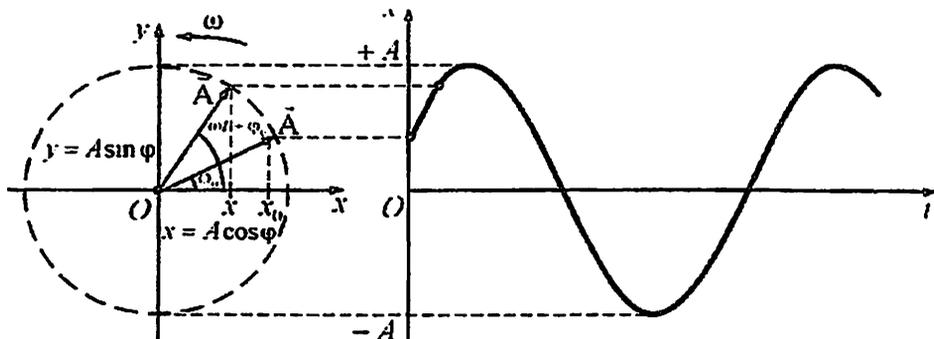


Рис. 1. Гармонические колебания как проекция равномерного вращения вектора  $A$ .

Гармонические и близкие к ним колебания встречаются во многих областях знаний: механика, акустика, электромагнитные колебания.

В любой из этих областей встречаются сложные колебания, которые при ближайшем рассмотрении оказываются суммой нескольких одновременно происходящих, наложившихся друг на друга простых гармонических колебаний различной частоты и амплитуды. На рис. 2 представлен пример подобного рода: сложный звук (кривая 4), возникший как сумма трех простых гармонических колебаний – гармоник.

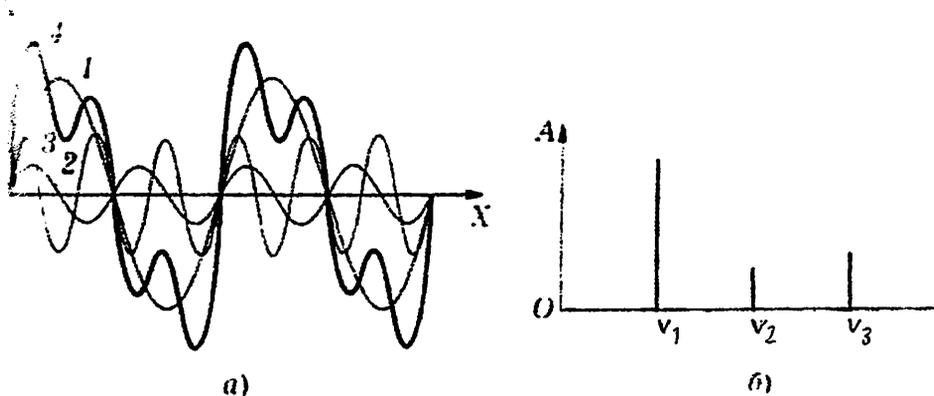


Рис. 2(а) – сложное колебание (кривая 4) как сумма трех гармоник; справа – гармонический спектр.

**Гармонический анализ** – это разложение сложного колебания на простые слагаемые. Результатом гармонического анализа является спектр колебаний.

Пример спектра приведен на рис. 2б.

*Спектр колебаний* – это диаграмма, показывающая, как распределяется общая энергия колебаний по различным значениям частоты.

В частном случае, представленном на рис. 2б, распределение энергии очень неравномерное: колебания происходят лишь на трех значениях частоты. К тому же, на этих частотах различна амплитуда  $A$ . Спектр данного вида – *линейчатый*.

*Примечания:*

1. Чем больше амплитуда колебаний, тем больше их энергия. Более того, *энергия колебаний пропорциональна квадрату амплитуды*.

2. Помимо линейчатых спектров, существуют спектры других типов: **полосатые** и **непрерывные**. В полосатых – вертикальные полосы вместо вертикальных линий. В непрерывных – отражается возможность одновременных колебаний на всех частотах широкого диапазона.

3. Идея представления сложных колебаний в виде суммы нескольких гармоник различной частоты и амплитуды получила интересное развитие в математике, в *теории приближения функций*. Согласно этой теории, практически любая функция (в том числе – никак не связанная с колебаниями, и в том числе – заданная не формулой, а графиком, в том числе, графиком, полученным экспериментально или даже нарисованным прибором-самописцем); так вот, любая функция может быть приблизительно равна сумме некоторого количества гармоник. Такое представление функций, предложенное французским физиком и математиком Жаном Фурье, названо его именем: *разложение Фурье*.

## 2. Вынужденные колебания. Резонанс

Вернемся к знакомой колебательной системе: грузику на нити. В некоторых случаях лучше подойдет родственная колебательная система – обычные качели.

Свободные колебания, начавшиеся в любой из этих систем после однократного толчка, будут по понятным причинам, затухающими; амплитуда будет от цикла к циклу уменьшаться.

Как сделать начавшиеся колебания незатухающими? Кто хоть раз качался на качелях, согласится, что для этого надо:

- компенсировать потери энергии каждого цикла, то есть в каждом цикле надо подтолкнуть грузик или качели;
- и при этом подталкивания в течение цикла должны быть своевременными, а не когда попало.

Две этих рекомендации можно сформулировать короче:

*частота подталкиваний должна быть равна частоте собственных колебаний*. Если это требование выполнено, то возможны следующие варианты развития событий:

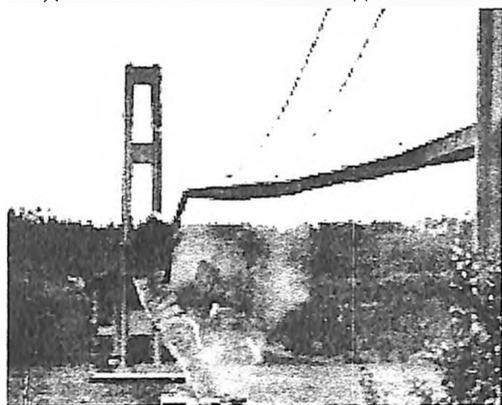
1. Энергии в цикле теряется больше, чем сообщается очередным подталкиванием, т. е. компенсации не возмещают потерь. В этом случае колебания системы останутся затухающими, но продлятся дольше.

2. Каковы потери такова и компенсация. Именно в этом случае колебания станут незатухающими, с постоянной амплитудой, и могут продолжаться неограниченно долго.

3. Если компенсации превосходят потери, то амплитуда колебаний станет возрастать, начнут возрастать и потери энергии в цикле. Если возрастающие потери уравниваются с компенсациями, установятся незатухающие колебания с некоторой возросшей амплитудой.

4. Наконец, если источник внешних компенсирующих воздействий достаточно мощный, то колебательная система может пойти вразнос и если ее вовремя не остановить, может произойти ее разрушение.

*Резонанс* (от фр. *resonance*, от лат. *resono* – «откликаюсь») – отклик колебательной системы на периодическое внешнее воздействие, который проявляется в резком увеличении амплитуды колебаний при совпадении частоты внешнего воздействия с частотой свободных колебаний системы.



*Рис. 3. Резонансное разрушение Такомского Моста (США, штат Вашингтон, 1940 год) Мост длиной 850м был разрушен порывистым ураганным ветром.*

### 3. Звуки с линейчатым спектром

Линейчатый спектр имеют гласные звуки нашей речи, все музыкальные инструменты, звуки сольного и хорового пения.

Во многих случаях звук с линейчатым спектром становится таковым не сразу, он как бы вызревает в источнике. Как это происходит, разберем на примере звука скрипки. Само название этого прекрасного инструмента – скрипка – соответствует скрипу – звуку из категории шумов, возникающему при трении смычка о струну. Этот звук имеет непрерывный спектр; энергия распределена более-менее равномерно между колебаниями широкого диапазона частот. Но благодаря явлению акустического резонанса происходит перераспределение энергии возникших было колебаний в пользу собственных частот акустической системы «струна – корпус скрипки – воздушный столб в этом корпусе».

Принципиально важно: резонанс не вносит новой энергии в акустическую систему! Он перераспределяет то, что было в начальном спектре шума (скрипа), поделив эти джоули между спектральными линиями окончательного звука, с его линейчатым спектром.

*Колебания одной гармонике мы воспринимаем как определенный тон.*

**Тоны** – это значения частоты, на которых происходят звуковые колебания в линейчатом спектре.

**Основной тон** – это тон наименьшей частоты в обсуждаемом линейчатом спектре.

**Обертоны** – общее название всех тонов, кроме основного.

Принципиально важно: *частота обертонов отличается от частоты основного тона в целое число раз: в 2, 3, 4, ... и т. д.* Этому ряду соответствует иерархия обертонов: второй обертон, третий, и т.д.; см. рис. 4 и 5.

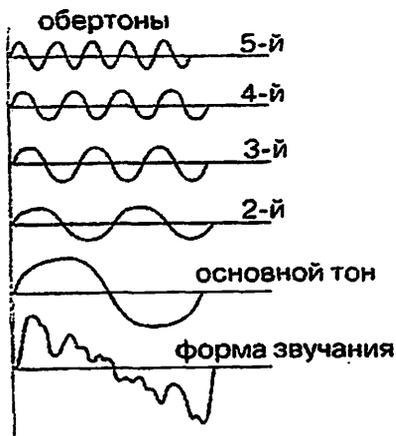


Рис. 4. Основной тон и обертоны.

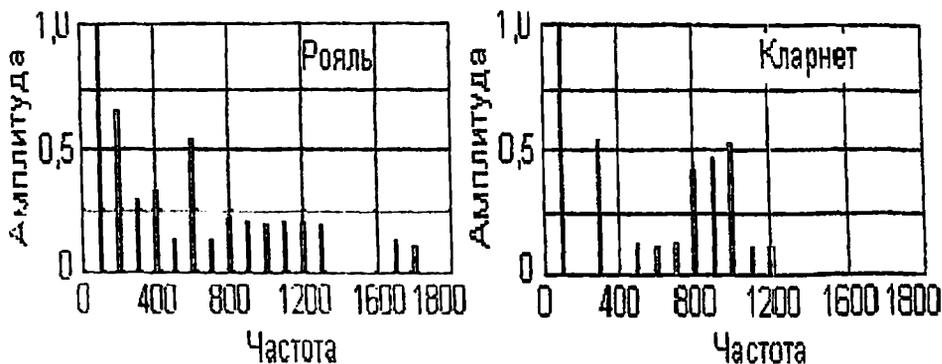


Рис. 5. У короля музыкальных инструментов – рояля оказалось 14 обертонов.

Звуки человеческих голосов имеют большие различия в индивидуальных диапазонах частот.

Мужские голоса обычно более низкие, а женские – более высокие. Причины тому – в том, что голосовые связки взрослых мужчин более толстые и длинные, а женские – более тонкие и короткие.

Частотные диапазоны некоторых певческих голосов представлены, для общего развития, на рис. 6.

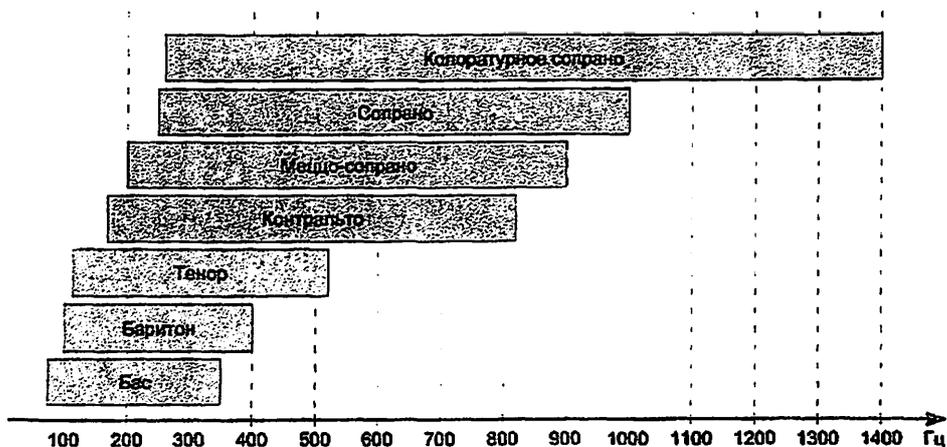


Рис. 6. Диаграммы этого рисунка - мосты между физикой и психофизикой.

Границы каждого из семи прямоугольников устанавливают диапазон значений частоты, принятый для данного типа голоса. Частота может отсчитываться по шкале в нижней части рисунка; диапазон частот – характеристика, разумеется, физическая. Но точные измерения этих договорных частотных границ обычно не требуются, их принято определять «на слух», и это делает данные характеристики (их названия – внутри прямоугольников) характеристиками психофизическими.

#### 4. Звуки речи с непрерывным спектром

Такие звуки возникают при «озвучивании» согласных букв. Возникают они в носоглотке: выдыхая воздух, мы с помощью языка, зубов, губ создаем на пути воздушного потока преграды с довольно резкими геометрическими формами. При обтекании этих преград течение потока становится турбулентным, вихревым. Вот вихри-то и шумят!

Что такое турбулентный вихрь и почему он может шуметь?

Вихрь – это временный коллектив частиц, вовлеченных в локальное вращательное движение. Вращение возникает там, где соприкасаются воздушные потоки, имеющие большую разность скоростей. Чем быстрее вращение, тем больше динамическое давление внутри вихря, и тем на столько же меньше –

статическое давление в соседних с вихрем областях потока. Таково проявление закона Бернулли.

Хаотичная система возникающих и исчезающих вихрей различного масштаба приводит к местным пульсациям *статического давления* в объеме потока, А это и есть звук. В обсуждаемых обстоятельствах возникает сложный звук с непрерывным спектром.

Характер непрерывного акустического спектра, возникающего при озвучивании буквы «С», представлен на рис 7:

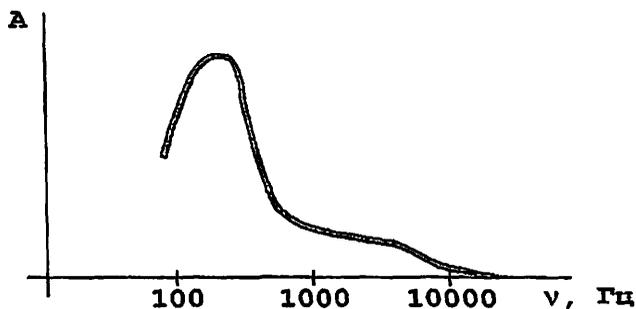


Рис. 7. Спектр звуков буквы С.

Из графика рис. 7 следует, что при произнесении звука буквы «С» возникают колебания в диапазоне частот от 100 Гц до более, чем 10 кГц. Распределение энергии по частотам весьма неравномерное: преобладают по амплитуде колебания низкой частоты (в выдыхаемом воздушном потоке преобладают сравнительно крупные вихри).

Звуковые колебания с непрерывным спектром относятся к категории шумов. *Белый шум* — это такой шум, который вызван акустическими колебаниями примерно одинаковой амплитуды на всех частотах. Произнося звук «Ф», мы создаем что-то близкое к белому шуму.

При шепоте голосовые связки расслабляются и бездействуют; частота произносимых звуков определяется в этом случае колебаниями воздуха на других препятствиях и резонансными частотами носоглотки.

## 5. Звуки внутренних органов. Аускультация. Перкуссия

Слабые звуковые колебания сопровождают процессы функционирования некоторых внутренних органов; сердце, легкие, органы дыхания. Звуки сопровождают пульсации в кровеносной системе. Метод диагностики, основанный на выслушивании таких звуков — *аускультация* (от лат. *auscultatio* — выслушивать) — известен еще со времен Гиппократов.

Первоначально при таком прослушивании врач прижимал ухо к телу пациента. Позднее был изобретен *стетоскоп*. Простейший стетоскоп представляет собой трубку с расширениями в виде воронок на ее концах. Современного терапевта трудно себе представить без стетофонендоскопа наизготовку.

При аускультации применяются описательные характеристики услышанных звуков. Например, при аускультации легких оценивают громкость, продолжительность дыхательных шумов в разных фазах дыхания. Для описания качественных оттенков шумов используют такие понятия, как булькающий звук, журчащий звук, хрип, свистящее дыхание.

Кстати, при измерении артериального давления по методу Короткова производится аускультация артерии в районе локтевого сгиба.

**Стетофонендоскоп** (рис. 8) – комбинированный медицинский прибор, сочетающий в себе возможности стетоскопа и фонендоскопа. Прибор имеет поворотную двухпозиционную головку.

Если головка прислонена к пациенту той стороной, которая меньше по диаметру и не имеет мембраны, то прибор работает как современная версия стетоскопа.

Если к телу пациента обращена мембрана (светлая на рис. 8), то прибор работает как фонендоскоп: благодаря тонкой мембране и небольшой воздушной камере между нею и корпусом головки достигается усиление звука, и что особенно ценно – прослушивание звуков более высокой частоты. Название «фонендоскоп» было предложено Н.С. Коротковым, принимавшим участие в его разработке. В переводе с греческого «фон-эндо-скоп» буквально означает «звук-внутри-слушаю».

В итоге, стетофонендоскоп – это двухрежимный современный стетоскоп, который обеспечивает прослушивание:

- звуков низкой частоты в режиме работы без мембраны;
- звуков более высокой частоты в режиме работы с мембраной.

Вместо длинного названия «стетофонендоскоп» считаются вполне приемлемыми укороченные варианты «стетоскоп» или «фонендоскоп»: речь идет об одном и том же.

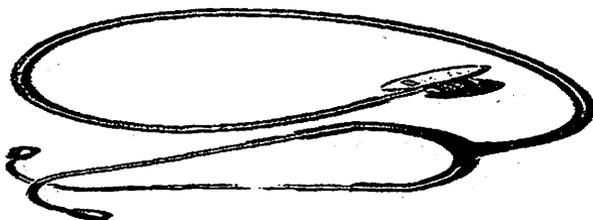


Рис. 8. Стетофонендоскоп.

**Перкуссия** – (лат. *percussion* – нанесение ударов) – диагностический метод, основанный на простукивании участков тела и анализе возникших при этом звуков. По характеру звуков, возникающих при последовательном простукивании участков тела, определяют границы и расположение органов (сердце, печень, селезенка), выявляют в брюшной полости наличие свободной жидкости, оценивают состояние легких, желудка, и т.п.

Метод перкуссии возник в середине восемнадцатого века. Стучат при перкуссии по-разному. Иногда – пальцами по телу (например, по грудной клетке). Иногда – пальцами по пальцам другой руки, прижатым к телу пациента. Вместо

пальцев другой руки может применяться плессиметр – пластина, изготовленная из металла, дерева, пластика или кости. А стучат по плессиметру или пальцами, или специальным молоточком. Характер возникающих при ударе вынужденных колебаний зависит от выбора из перечисленного. Глубина проникновения звуков в ткани пациента – 6–7 см.

Наибольших успехов в реализации метода перкуссии достигают те, кто имеет музыкальный слух и большой непрерывный стаж работы с применением этого метода.

В современной медицине у метода перкуссии два серьезных конкурента: рентгенография и УЗИ.

## 6. Волны. Характеристики волн

*Волна* – это процесс распространения колебаний в той или иной среде. Звуковые волны – это процесс распространения механических колебаний в упругой среде. Упругая среда может быть газообразная, жидкая, твердая.

Частота колебаний определяется источником звука.

*Диапазон слышимых частот: 16 Гц – 20000 Гц.*

Механические колебания в упругой среде, частота которых – за пределами диапазона слышимых (человеком) частот, имеют следующие наименования:

- частота менее 16 Гц – инфразвук;
- частота от 20 кГц до 1 ГГц – ультразвук;
- частота более 1 ГГц – гиперзвук

*Фронт волны* – это поверхность, разделяющая в данный момент времени уже охваченную и еще не охваченную колебаниями среду. Во всех точках фронта волны колебания начинаются одновременно. Поэтому в дальнейшем колебания во всех этих точках остаются синхронными, то есть одинаковыми по фазе.

*Сферическая волна* – это волна, имеющая фронт в виде сферы непрерывно увеличивающегося радиуса. *Плоская волна* – это волна с плоским фронтом.

*Луч* – это перпендикуляр к фронту волны. Более привычны для нас световые лучи, но в акустике понятие «луч» не менее продуктивно. Акустические лучи, подобно световым, подчиняются законам геометрической оптики: прямолинейны в однородной среде, отражаются и преломляются на границе раздела двух сред.

Колебания, достигшие любого слоя среды, становятся причиной возникновения колебаний в слое соседнем, и так далее. Энергия, необходимая для возбуждения колебаний во все более отдаленных областях – это энергия источника: от источника вдоль лучей распространяются потоки энергии. *Интенсивность излучения  $I$*  (звука, ультразвука, света, и т. п.) – это мощность потока энергии, приходящаяся на один квадратный метр поперечного сечения потока. Единица измерения этой энергетической характеристики:  $1 \text{ Вт/м}^2$ .

Фронт волны не стоит на одном месте. *Скорость звука* – это скорость перемещения фронта звуковой волны. Скорость света – это скорость перемещения фронта световой волны. При этом важно понимать, что частицы вещества в

среднем остаются там же, где и были до появления звука. Скорость звука – это, по сути, скорость передачи возмущения от одних частиц к другим, но не скорость переноса вещества.

*Звуковые волны в газах и жидкостях – это продольные волны.*

В продольной звуковой волне частицы (молекулы, атомы, ионы) совершают колебания вдоль луча, т.е. колеблются вдоль направления распространения звука. В твердых телах взаимодействие частиц друг с другом имеет более сложный характер: сдвинешь одну молекулу – она подтолкнет соседнюю, оказавшуюся на пути, а заодно потянет за собой и те, что выше, и те, что ниже, и левых соседей, и правых, и в итоге могут возникнуть как продольные, так и поперечные волны.

*В поперечной волне колебания происходят в направлении, перпендикулярном лучу (поперек луча).*

Заметим, что электромагнитные волны любых видов и в любых средах – это поперечные волны. Попробуйте вспомнить, что именно в них колеблется поперек луча и распространяется в вакууме со скоростью 300 000 км/с.

*Длина волны* – это расстояние  $\lambda$ , на которое смещается фронт волны за время, равное периоду колебаний  $T$ :  $\lambda = VT$ . Здесь  $V$  – скорость звука.

На концах отрезка луча протяженностью  $\lambda$  происходят колебания, одинаковые по фазе, поскольку на одном конце такого отрезка они возникли на время  $T$  раньше, чем на другом.

Таким образом, длина волны  $\lambda$  характеризует периодичность волны *в пространстве*, а период колебаний  $T$  – *во времени*.

## 7. Восприятие звука. Закон Вебера–Фехнера

Диапазон *интенсивности* звука, в котором работает наш слух, чрезвычайно широк. На частоте звука 1кГц для среднестатистического человека характерны следующие энергетические границы:

- порог слышимости –  $10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup>;
- порог болевого ощущения – 10 Вт/м<sup>2</sup>.

Следовательно, самый тихий и самый громкий звук отличаются по интенсивности в  $10^{13}$  раз! Во столько же раз отличаются значения массы 1 миллиграмм и 10 000 тонн!

Э. Вебер сумел понять, как человек приспособился к условиям, в которых внешнее воздействие может меняться в столь широком диапазоне. Свое понимание этого приспособительного механизма он сформулировал в виде закона, согласно которому *если интенсивность раздражителя возрастает по закону геометрической прогрессии*, (например, так: 1, 10, 100, 1000, ...), *то ощущения будут усиливаться по закону арифметической прогрессии*, (1, 2, 3, 4, ...).

Г. Фехнер выразил эту особенность ощущений на языке логарифмической функции, и в итоге закон Вебера–Фехнера состоит в следующем:

*Нашим ощущениям соответствуют логарифмы относительных изменений внешних воздействий.*

Присмотритесь: в нашем примере числа 1, 2, 3, ... действительно являются десятичными логарифмами чисел ряда 10, 100, 1000. ...

Закону Вебера—Фехнера соответствуют наши ощущения как звуковых, так и световых ощущений. Ведь наше зрение тоже функционирует в широчайшем диапазоне: от единичных квантов на колбочку или палочку до громадных световых потоков в солнечный день.

А вот в тактильных ощущениях диапазон внешних воздействий, от «чуть-чуть» до болевого ощущения, гораздо более узкий, и приспособительные логарифмические реакции на уровне ощущений не потребовались.

## 8. Децибелльная шкала интенсивности звука

Закон Вебера—Фехнера подсказывает, что при работе с величинами, способными отличаться друг от друга на много порядков, целесообразно перейти от этих чисел к их логарифмам.

Единица измерения интенсивности звука в логарифмической шкале — *бел* (в честь Белла, изобретателя телефона). Но практически более удобной оказалась единица, в 10 раз меньшая — *децибел*:  $1\text{Б} = 10\text{дБ}$ .

*Интенсивность звука I*, измеренная в  $\text{Вт}/\text{м}^2$ , и *интенсивность звука E*, измеренная в децибелах связаны друг с другом следующим образом:

$$E = 10 \lg I/I_0$$

Здесь под знаком логарифма — дробь, которая как раз и представляет собой *относительное изменение внешнего воздействия* от порогового значения  $I_0$  до некоторого обсуждаемого значения интенсивности  $I$ .

Приведем пример использования децибелльной шкалы. Пусть при измерении уровня шума в помещении интенсиметр показал  $10 \text{ мкВт}/\text{м}^2$ . Найдем, сколько это будет в децибелльной шкале.

*Решение:* Показания интенсиметра:  $I = 10 \text{ мкВт}/\text{м}^2 = 10^{-5} \text{ Вт}/\text{м}^2$ .

Порог слышимости:  $I_0 = 10^{-12} \text{ Вт}/\text{м}^2$ .

Следовательно, интенсивность звука в децибелах:

$$E = 10 \lg I/I_0 = 10 \lg 10^{-5}/10^{-12} = 10 \lg 10^7 = 10 \cdot 7 = 70 \text{ дБ}$$

Другой пример: человек имеет повышенную остроту слуха и способен слышать звуки более тихие, чем среднестатистический порог слышимости. Если он слышит при  $I = 10^{-14} \text{ Вт}/\text{м}^2$ , то в децибелльной шкале такой сверхтихий звук имеет интенсивность:

$$E = 10 \lg 10^{-14}/10^{-12} = 10 \lg 10^{-2} = 10 \cdot (-2) = -20 \text{ дБ}$$

Порогу болевых ощущений соответствует уровень интенсивности 130 дБ.

Звуки, интенсивность которых превосходит 130 дБ, как звуки нами уже не воспринимаются.

Звуку с интенсивностью  $I_0 = 10^{-12} \text{ Вт}/\text{м}^2$  (порог слышимости) в децибелльной шкале соответствует  $E = 0 \text{ дБ}$ .

Таблица 1

## Сведения об уровнях интенсивности звука в некоторых случаях

Происхождение звука	Интенсивность	
	Вт/м <sup>2</sup>	дБ
Принятый порог слышимости	$10^{-12}$	0
Сердечные тоны через стетоскоп	$10^{-11}$	10
Шепот	$10^{-10} - 10^{-9}$	20-30
Разговор	$10^{-8} - 10^{-6}$	40-60
Шум на оживленной улице	$10^{-5}$	80
Шум в вагоне метро	$10^{-3}$	90
Шум двигателя самолета, музыка на дискотеке	0,1-1	110-120
Порог болевого ощущения	10	130

## 9. Восприятие звука: продолжение

Наибольшая острота слуха у мужчин – в среднем на частоте 4 кГц, а у женщин – в диапазоне от 4 до 6 кГц. При этом имеет значение индивидуальная протяженность слухового прохода.

Существование частот, характерных повышенной остротой слуха, объясняется явлением акустического резонанса. Вот как все происходит. Звуковая волна проходит сквозь слуховой проход и отражается от барабанной перепонки. При этом отражении перепонка испытывает импульс акустического давления как первый вклад колебаний этого цикла в наше ощущение звука. Но отраженная волна, выходя из слухового прохода, накладывается на колебания следующего цикла, идущие в сторону перепонки. На обсуждаемых резонансных частотах имеет место благоприятное стечение обстоятельств: длина звуковой волны, длина слухового прохода и длительность прохождения этого прохода туда и обратно таковы, что накладываются колебания, одинаковые по фазе. Отраженная волна предыдущего цикла резонансно усиливает прямо волну следующего цикла, и это будет ее второй вклад в наше ощущение звука.

Параметр «длина волны» имеет следующую особенность: если волна переходит из одной среды в другую, то значение длины волны меняется. Так, если скорость звука в воздухе составляет 330 м/с, а в воде – 1480 м/с, то при переходе из воздуха в воду значение длины волны возрастает почти в пять раз. Однако наше восприятие звука при этом не изменится: тенор басом не запоет. Ощущение высоты тона определяется частотой звука, а она при этом не меняется.

Аналогично обстоят дела и со световыми волнами при их переходе из одной среды в другую. При переходе из воздуха в воду красный свет зеленым не становится.

**Бинауральный эффект.** Так называется наша способность определять направление на источник звука. Лучше всего это удается, когда звуки или шумы имеют резкое начало или обладают повторяющимися характерными особенностями. Решающим фактором является разность во времени появления звукового

ощущения в левом и правом ухе. Мы уверенно различаем запаздывания по времени до  $10^{-4}$  с; для звука на частоте 1000 Гц это составляет 0,1 периода колебаний. Этим данным и тому факту, что расстояние между ушами – около 20 см, соответствует точность определения направлений  $\Delta\varphi = \pm 10^\circ$  (на частоте 1000 Гц).

**«Разностные тоны».** При большой интенсивности звука мы можем слышать даже звуки, которых нет. Наряду с ощущениями, соответствующими реально действующим частотам  $\nu_1$  и  $\nu_2$  мы начинаем слышать разностные тоны ( $\nu_1 - \nu_2$ ) и комбинированные тоны ( $\nu_1 + \nu_2$ ) или ( $2\nu_1 - \nu_2$ ). Благодаря этим причудам восприятия, мы из плохонького динамика в наушниках слышим низкие частоты, на воспроизведение которых он не способен.

**Стереофоническое звучание** технически обеспечивается от двух акустических колонок, каждая из которых воспроизводит звук, специально для нее записанный. Звуки от двух колонок накладываются друг на друга, создавая в нашем восприятии иллюзию «живого» звучания группы музыкальных инструментов, группы участников разговора, рассредоточенных в пространстве.

Менее известно, что получая монофонический звук от одной колонки, мы и его воспринимаем как стереофонический; кто-то в большей степени, кто-то – в меньшей.

Колебания одной гармоники мы воспринимаем как определенный тон. Каждый тон имеет некоторую высоту. **Высота тона** – это качество ощущения, и как таковое физическому измерению не доступно и относится к категории психофизических характеристик звука. Наше ощущение высоты тона зависит от частоты звуковых волн, но в некоторой степени и от их интенсивности.

На несинусоидальные колебания мы реагируем ощущением сложного звука, обладающего тембром. Наше *ощущение тембра соответствует линейчатому спектру* источника звука и распределению энергии по линиям спектра. При этом изменение частоты основного тона не меняет наших ощущений тембра. Мы различаем голоса людей и музыкальные инструменты по их тембру.

Свойства акустического спектра как категории физической, определяют наши ощущения тембра как категории психофизической, физическим измерениям не доступной.

Если звук, произнесенный в помещении, затухает быстро, он воспринимается как *приглушенный*, как бы не до конца расслышанный. Если же произнесенный звук, многократно отражаясь, долго не затухает, то помещения с таким звучанием мы называем *гулками*. Приглушенность, гулкость – оценки психофизические. Им соответствует измеряемая физическая величина – *время реверберации*, под которым понимается время, за которое затухающий звук уменьшает свою интенсивность в  $10^6$  раз. В хороших концертных залах время реверберации на средних частотах составляет 1–2 секунды. Для достижения оптимального времени реверберации стены и перекрытия отделяются элементами, сочетающими свойства декоративные со свойствами поглотителей или отражателей звука.

В состав современных электронных музыкальных комплексов входят ревербераторы – устройства, с помощью которых «длительность послезвучания» может меняться по усмотрению исполнителей.

На рис. 9 представлены амплитудно-частотные диапазоны звуков речи и музыки.

Нижняя кривая соответствует порогу слышимости, а верхняя - порогу болевых ощущений.

Из графиков следует, что диапазон частот речевого общения приходится на частоты от 100 Гц до 8 кГц

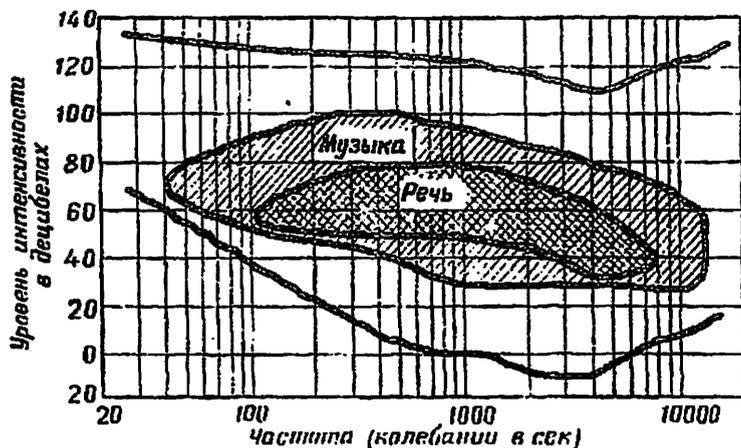


Рис. 9. Амплитудно-частотные диапазоны речи и музыки.

## 10. Звуки в животном мире

Все познается в сравнении. Диапазон слышимых частот человека: 16 Гц – 20 кГц. А как у братьев наших меньших? По-разному:

Кошки	45 Гц – 60 кГц
Собаки	15 Гц – 40 кГц
Дельфины	40 Гц – 200 кГц
Летучие мыши	2 кГц – 180 кГц
Слоны	от 1 Гц
Медузы	8 Гц – 15 Гц
Бабочки	10 кГц – 260 кГц.

## 11. Физические и психофизические характеристики звука

**Физические характеристики** – это измеряемые величины. Определяются с применением измерительных приборов.

**Психофизические характеристики** не измеряемы количественно. Они представляют собой сложившуюся систему субъективных качественных оценок физических процессов и явлений.

Многие физические оценки имеют психофизического «родственника».

В нижеследующей таблице 2 приведены подобные родственные пары, сложившиеся в акустике:

Таблица 2

Физические характеристики.	Психофизические характеристики
Интенсивность звука	Громкость. Громкий звук, тихий звук.
Частота	Высота тона. Высокий тон, низкий тон. Основной тон. Обертоны.
Акустический спектр	Тембр (голоса, музыкального инструмента.)
Время реверберации	Приглушенность звука. Гулкость помещения.

Известно утверждение, что всякая классификация обедняет объект классификации. В порядке подтверждения этого спорного утверждения заметим, что громкость звука – психофизическая оценка, часто измеряемая количественно в децибелах.

## 12. Строение уха. Слух по воздушной и костной проводимости

Наш слух работает по двум каналам звукопроводения: по воздушному и по костному.

**Канал воздушной проводимости:** внешний источник звука – воздушная среда – наружное ухо – среднее ухо – внутреннее ухо.

**Канал костной проводимости:** наш голосовой аппарат – кости черепа – внутреннее ухо.

Наш орган слуха – ухо – «обслуживает» оба канала звукопроводения; его схема представлена на рис. 10.

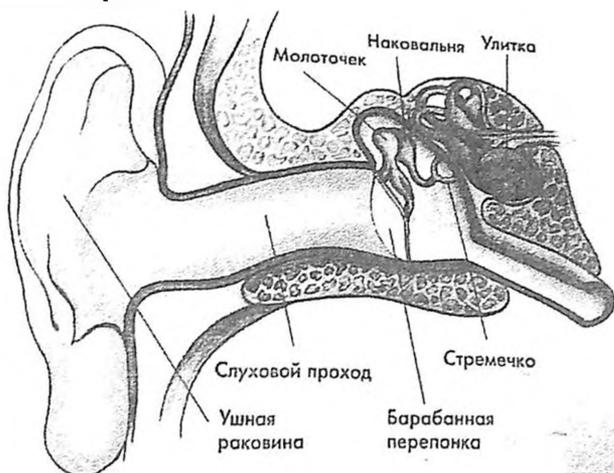


Рис. 10. Строение уха.

Когда мы говорим сами, работает в основном канал костной проводимости: звуки возникают в носоглотке, и от ее стенок передаются костям черепа, вклад звуковых колебаний, приходящих кружным путем через воздушную среду, почти нулевой. Когда слушаем, что говорят другие, работает канал воздушной проводимости.

Если мы, нырнув, что-то слышим под водой, то мы слышим по каналу костной проводимости; канал воздушной проводимости заблокирован.

Мы слышим сами себя не совсем так, как нас слышат другие. В этом легко убедиться, записав разговор на магнитофон. При прослушивании записи голоса ваших собеседников будут звучать как обычно, и только ваш голос будет звучать «не так»: обнаружится, что ваш голос звучит немножко выше, чем вы привыкли считать. Это объясняется тем, что высокочастотные компоненты производимых нами звуков возникают в основном на выходных участках голосового аппарата и передаются в механизм костной проводимости слабее, чем низкие частоты.

Потеря слуха по каналу воздушной проводимости не означает переход в категорию глухих: если кортиева орган внутреннего уха – в порядке, то вырчит слуховой аппарат и костная проводимость.

Рассмотрим цепочку преобразований звуковых колебаний по воздушному каналу. Он начинает свою работу с поступления звуковых волн в наружное ухо.

*Наружное ухо:* ушная раковина, слуховой проход, барабанная перепонка.

Ушные раковины играют определенную роль, когда мы определяем, откуда исходит звук. Но многие животные используют ушные раковины гораздо эффективнее, чем мы.

По слуховому проходу звук передается на барабанную перепонку, вызывая ее вынужденные колебания. Как мы убедились, глубина этого прохода оказывает влияние на остроту нашего слуха (см. явление акустического резонанса).

*Среднее ухо* тоже заполнено воздухом; полость среднего уха сообщается с наружной атмосферой через евстахиеву трубу, выходящую в носоглотку. Однако передача звуковых колебаний в среднем ухе осуществляется не по воздуху, а через миниатюрную механическую систему косточек-рычагов.

*Внутреннее ухо* заполнено жидкостью (перилимфа). Без жидкостного наполнения внутреннего уха его нежный и чувствительный **кортиева орган** не смог бы выполнять свои функции. Но прямая передача звуковых колебаний из воздушной среды в жидкую была бы крайне неэффективной: на границе «воздух-жидкость» звук отразился бы на 99,9%, и лишь чуть больше 0,1% энергии колебаний передалось бы в жидкость.

Эволюция распорядилась следующим образом: передачу звуковых колебаний от барабанной перепонки во внутреннее ухо выполняет система миниатюрных косточек среднего уха, с причудливыми названиями: молоточек, наковальня, стремечко. Более того, эта система выполняет функции усилителя колебаний. Она обеспечивает 26-кратное повышение давления в жидкости среднего уха, в сравнении с тем акустическим давлением, которое действует на барабанную перепонку.

*Косточки среднего уха* имеют совокупность связок, сухожилий и мышц. Сокращение этих мышц происходит рефлекторно в тех случаях, когда поступает звук чрезмерной интенсивности. Усилительный механизм косточек отказывается усиливать колебания, которые и без того слишком сильны. Такова защита внутреннего уха от акустических перегрузок.

*Кортиев орган* преобразует звуковые колебания, переданные в перилимфу, в электрические импульсы, и отправляет их в центральную нервную систему. Эту функцию выполняют волосковые клетки.

*Рецепторы акустических колебаний* - волосковые клетки кортиева органа. Эти клетки помещаются на базилярной мембране, а их волоски соприкасаются с покровной мембраной. Пространство между этими мембранами заполнено перилимфой.

Данная слоистая структура обеспечивает всю полноту наших ощущений в мире звуков. Каждому значению частоты акустических колебаний соответствует своя зона, свой участок этой структуры, в пределах которого имеет место резонансное усиление деформаций мембран и, как следствие, возбуждение волосковых клеток, расположенных на этом участке.

Таким образом, волосковые клетки различного расположения имеют различную специализацию по частоте колебаний, на которую они реагируют. Кортиев орган, благодаря особенностям строения, осуществляет спектральный анализ звуков.

В диапазоне частот наибольшей остроты слуха мы способны различать значения частоты, отличающиеся на 0,3%. А по интенсивности звука наша чувствительность (то есть способность различать ее близкие значения) — просто никудышная: «сделать чуть громче» - это увеличить интенсивность в 10 раз! Зато как широк диапазон значений интенсивности звука, в котором может работать наша слуховая система!

### 13. Аудиометры

У каждого из нас острота слуха на разных частотах индивидуальна. Как правило, не одинаковы характеристики левого и правого уха.

*Аудиометр* (от лат. *Audio* — слышу и греч. *metron* — мера) — это прибор, предназначенный для измерения индивидуальной слуховой чувствительности к звуковым волнам различной частоты.

Главный блок аудиометра — генератор электрических колебаний звуковых частот. Генератор способен создавать колебания на ряде фиксированных значений частоты звука. Рабочий диапазон частот аудиометров — обычно от 125 Гц до 8 кГц. Этот диапазон совпадает с диапазоном частот речевого общения (см. рис. 9). Интенсивность колебаний на любой частоте можно менять, контролируя уровень интенсивности по децибельной шкале.

Электрические колебания, созданные генератором, могут создавать звуковые колебания в двух вариантах:

- при исследованиях остроты слуха по каналу воздушной проводимости ток от генератора подается на динамики наушников, с переключениями «левое ухо — правое ухо»;

- при исследованиях по костной проводимости ток от генератора подается на вибратор, прислоняемый к голове и создающий звуковые колебания в костях черепа без посредничества воздушной среды.

В аудиометрах иногда предусматривается возможность исследовать остроту слуха на фоне непрерывных или прерывистых шумовых помех различной интенсивности.

Существуют аудиометры для исследования слуха на частотах до 20 кГц.

Результатом обследования на аудиометре является аудиограмма: график зависимости индивидуальных порогов слышимости от частоты звука, по каждому уху, по воздушной или костной проводимости.

#### **14. Контрольные вопросы к разделу «Биоакустика. Звук»**

1. Колебания. Их характеристики: период, частота, амплитуда, фаза колебаний. Гармонические колебания.
2. Спектр колебаний. Линейчатый и непрерывный акустические спектры. Примеры.
3. Свободные и вынужденные колебания. Резонанс. Примеры акустического резонанса.
4. Звуки с линейчатым спектром. Тоны. Основной тон. Обертоны. Тембр.
5. Непрерывный акустический спектр. Звуки речи с непрерывным спектром. Шумы. Белый шум.
6. Аускультация. Перкуссия. Стетоскоп.
7. Волны. Их характеристики: фронт волны, луч, длина волны. Продольные и поперечные волны. Примеры. Интенсивность. Диапазон слышимых звуков.
8. Восприятие звука: закон Вебера-Фехнера.
9. Децибелная шкала интенсивности звука.
10. Восприятие звука: акустический резонанс и частота наилучшей остроты слуха; бинауральный эффект; стереофонический эффект; реверберация звука.
11. Физические и психофизические характеристики звука. Их взаимное соответствие.
12. Строение уха. Слух по воздушной и костной проводимости. Волосковые клетки.

#### **Лабораторная работа № 51. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРОГОВ СЛЫШИМОСТИ С ПОМОЩЬЮ АУДИОМЕТРА**

**Цель данной работы:** определение индивидуальных особенностей слуха на пороге слышимости с помощью аудиометра.

#### **Порядок выполнения лабораторной работы**

Аудиометр, используемый в данной работе, обеспечивает проверку остроты слуха по воздушной проводимости, в диапазоне частот от 125 до 8000 Гц. Работа выполняется в два этапа.

На первом этапе Ваша задача – определить свои пороги слышимости по воздушной проводимости по левому и правому уху. Данные по обоим ушам фиксируются на одном бланке аудиограммы. Измерения производятся при полной тишине в аудитории.

Необходимые пояснения о проведении измерений на аудиометре можно получить от лаборанта или преподавателя.

В клинической практике пациент, одев наушники или прислонив к голове вибратор, никаких переключений в приборе не производит, и лишь сообщает врачу-сурдологу о своих слуховых ощущениях. Следуя этой норме, каждый в студенческой бригаде, выполняя эту работу, получает возможность побыть как врачом, так и пациентом.

На каждом значении частоты необходимо плавными переключениями уровня громкости добиться появления минимальной слышимости, т.е. определить порог слышимости, и нанести на бланк точку на пересечении соответствующих линий. Точки по каждому уху соединяются ломаной линией «от точки к точке», т. е. без усреднения.

На рис. 11 представлены аудиограммы порогов слышимости одного уха пациента с нормальным слухом по каналам воздушной и костной проводимости (или, как иногда говорят, по воздушному и костному звукопроведению).

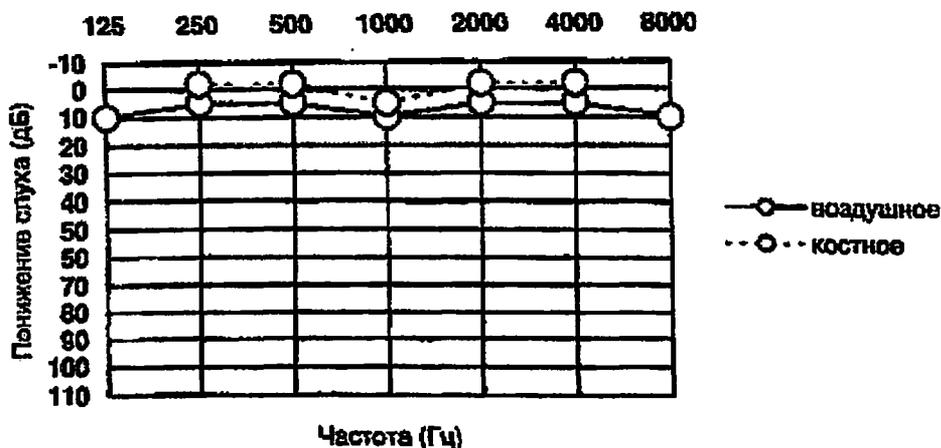


Рис. 11. Аудиограмма с данными уха, имеющего нормальный слух.

На втором этапе необходимо проанализировать аудиограмму, руководствуясь российской классификацией нарушений слуха, которая приведена в табл. 3. Согласно этой классификации, заключение «Нарушений слуха нет» уместно в том случае, если кривые на Вашей аудиограмме не опускаются ниже уровня 25 дБ. Там же, в табл. 3, можно ознакомиться и с международной классификацией нарушений слуха.

## Классификация нарушений слуха

Пороги слышимости, дБ	Российская классификация нарушений слуха	Международная классификация нарушений слуха
0–10 на всех частотах	Нарушений слуха нет	Норма
11–25	Нарушений слуха нет	Минимальное
26–40	I степень тугоухости	Легкое
41–55	II степень тугоухости	Умеренное
56–70	III степень тугоухости	Умеренно-тяжелое
71–90	IV степень тугоухости	Тяжелое
Более 90	Глухота	Глубокое

Если острота слуха одного или обоих ушей – за пределами нормы второй строки, требуется проведение дополнительного анализа аудиограмм на четырех опорных частотах диапазона, наиболее важного для восприятия речи: 500 Гц, 1 кГц, 2 кГц, 4 кГц. Для выполнения этого анализа на Вашем индивидуальном бланке помимо аудиограммы предусмотрена расчетная таблица, представленная ниже (табл. 4).

Таблица 4

## Острота слуха на опорных частотах

№	Частота звука	Левое ухо (дБ)	Правое ухо (дБ)
1.	500 Гц		
2	1 кГц		
3	2 кГц		
4	4 кГц		
5	Σ		
6	Средне-выборочное значение		
7	Заключение		

По данным аудиограммы необходимо:

1. сформировать две выборки значений порога слышимости на четырех опорных частотах (строки 1–4);
2. найти сумму элементов выборок (строка 5) и вычислить средневыборочные значения порогов слышимости (строка 6);
3. по средневыборочным значениям остроты слуха и данным таблицы 3 определить степень тугоухости ушей; выводы записать в строку 7 таблицы 4.

Итоговое заключение может, к примеру, оказаться таким:

*«Слух левого уха – в норме. Тугоухость I степени правого уха».*

## БИОАКУСТИКА. УЛЬТРАЗВУК

Высокочастотный звук – ультразвук – это механические колебания в упругой среде, частота которых – выше диапазона слышимых частот.

Частотный диапазон ультразвука – от 20 кГц до 1 ГГц. В медицине ультразвук находит применение как в диагностике, так и в терапии.

### 1. Получение и регистрация ультразвука в медицинской аппаратуре

**Пьезоэлектрики** (от греческого *piezo* – давить, сжимаю) – это диэлектрики, которые способны поляризоваться при их деформации: при сжатии пьезоэлектрика на двух его поверхностях, испытывающих давление, возникают заряды противоположного знака, обусловленные его поляризацией.

Если сменить знак деформации, то есть сжатие заменить растяжением, то на тех же поверхностях пьезоэлектрика появятся электрические заряды обратной полярности.

**Прямой пьезоэлектрический эффект** – это явление возникновения электрической разности потенциалов на пьезоэлектриках при их механической деформации. Он применяется для регистрации ультразвука. Вот как это происходит: ультразвук, проходящий извне на рабочие поверхности пьезокристалла, создает в прилегающей к ним среде то зону сжатия, то зону разрежения. Это приводит к появлению деформаций сжатия-растяжения пьезокристалла, сменяющих друг друга с частотой регистрируемого ультразвука. Знакопеременные деформации пьезокристалла приводят к появлению знакопеременной разности потенциалов между его рабочими поверхностями.

**Обратный пьезоэлектрический эффект** – появление деформаций при поляризации пьезоэлектрика во внешнем электрическом поле. Вот как этот эффект используется для получения ультразвука: если пьезоэлектрик помещен в переменное электрическое поле, то в такт со сменой полярности приложенного электрического напряжения в пьезоэлектрике возникают, сменяя друг друга, деформации сжатия и растяжения; в направлении силовых линий поля пьезокристалл то укорачивается, то удлиняется, становясь источником ультразвуковых колебаний в примыкающей к нему среде.

Итак, обратный пьезоэлектрический эффект применяется для получения ультразвука, а прямой – для его регистрации. Технические подробности – в разделе 1.2.

Но не следует думать, что природа предусмотрела пьезоэлектрический эффект исключительно для создания ультразвуковой аппаратуры. Прямой пьезоэлектрический эффект выполняет важные функции в процессах ремоделирования костных тканей.

**Ремоделирование костных тканей** – это непрерывный процесс их обновления. Цикл полного обновления в среднем составляет 25 лет.

Обновление осуществляют специализированные клетки двух типов: **Остеокласты** – клетки-разрушители изношенных костных тканей;

**Остеобласты** – клетки-созидатели костных тканей из обновленного материала.

Деформации растяжения кости вызывают появление в костных пластинах положительного пьезоэлектрического потенциала. Благодаря этому активируются остеокласты, резорбируют (разрушают) изношенный костный материал, а затем, спустя некоторое время, активируют остеобласты, намекая, что им тоже пора браться за работу.

Деформации сжатия кости вызывают появление отрицательного потенциала, дополнительно активизирующего работу остеобластов по синтезу нового костного материала из продуктов резорбции, выполненной остеокластами.

При отсутствии физической нагрузки и сопутствующих ей деформаций кости имеет место нулевой пьезоэлектрический потенциал. При нулевом пьезопотенциале стимулируются остеокласты, и кроме того – выведение солей из кости.

Общеизвестно, что отсутствие полноценной физической нагрузки в условиях длительных космических полетов создает серьезнейшие проблемы для опорно-двигательного аппарата космонавтов.

## **2. Ультразвуковые излучатели и приемники в медицинской технике**

В медицинской технике используются электромеханические излучатели и приемники ультразвука, работающие на основе прямого и обратного пьезоэлектрического эффекта.

Ультразвуковой излучатель представляет собой пластину из пьезоэлектрика с нанесенными на ее поверхности проводящими слоями, выполняющими функции электродов. При подключении этих электродов к высокочастотному электрическому генератору возникает обратный пьезоэлектрический эффект: поверхность пластины с нанесенными на нее электродами начинает совершать вынужденные механические колебания, имеющие частоту, равную частоте электрического генератора. В прилегающей к электродам среде возникает ультразвуковая волна.

Частота ультразвуковых колебаний пьезоэлемента-излучателя равна частоте электрических колебаний, подаваемых на электроды. Наиболее охотно, с наибольшей амплитудой будут происходить колебания пьезоэлемента, если частота электрического напряжения совпадет с собственной частотой механических колебаний излучателя (условие резонанса).

Чем меньше масса и размеры излучателя, тем больше его собственная частота колебаний.

В большинстве медицинских приборов ультразвуковой излучатель выполняет так же и функцию приемника ультразвуковых волн, им же и создаваемых, периодически переключаясь с режима излучения на режим приема отраженных ультразвуковых волн.

Чтобы излучатель ультразвука стал его приемником, необходимо отключить его электроды от электрического генератора и подключить их к системе, регистрирующей разность потенциалов, возникшую, благодаря прямому пьезоэлектрическому эффекту, под воздействием отраженного ультразвука. Разумеется, переключения производятся автоматически.

### 1.3 Эхолокация в ультразвуковой диагностике

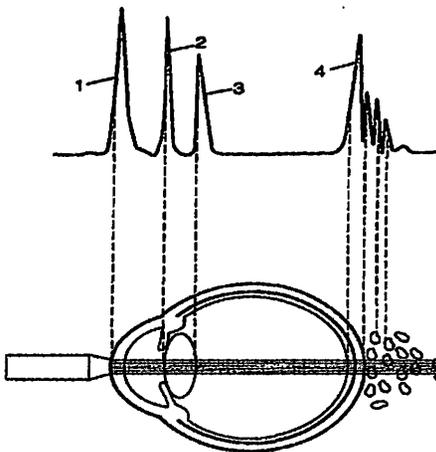
Многие приборы для ультразвуковых медицинских исследований (УЗИ) работают на основе принципа эхолокации.

Эхолокация – это определение положения (локация) удаленных предметов по длительности задержки с приходом отраженных от них звуковых импульсов (эхо). В природе эхолокацию раньше человека освоили летучие мыши, дельфины и некоторые другие животные.

Радиолокация – это решение аналогичных задач с использованием импульсов электромагнитных излучений.

*Пример использования эхолокации в медицинской аппаратуре:* на рис. 1 представлена схема *одномерного* ультразвукового диагностического прибора для эхоскопии глаза.

В нижней половине рисунка – схема строения глаза. В контакте с роговицей – ультразвуковой излучатель, испускающий короткие ультразвуковые импульсы длительностью порядка 1 мкс. В паузах между излучаемыми импульсами этот же прибор принимает импульсы, отраженные от различных внутриглазных неоднородностей. Возникающие при этом электрические импульсы, после их усиления, формируют на экране монитора *эхограмму* – запись последовательности отраженных импульсов в порядке их поступления. Эхограмма представлена на верхней половине рис. 1.



*Рис. 1. Схема получения эхограммы глаза. На этой схеме:*

*1 – эхосигнал от передней поверхности роговицы; 2, 3 – эхосигналы от передней и задней поверхностей хрусталика; 4 – эхосигнал от сетчатки и структур заднего полюса глазного яблока.*

Эхограмма формируется следующим образом. Любой ультразвуковой импульс излучателя проходит сквозь глаз, *частично* отражаясь в обратном направлении на каждой из границ раздела смежных структур. Так что каждый импульс ультразвукового излучателя порождает несколько отраженных УЗ-импульсов. В нашем примере хорошо различимы эхосигналы от четырех отражающих поверхностей. Координаты эхосигналов на эхограмме пропорциональны времени задержки с приходом на излучатель УЗ-импульсов, отражен-

ных от различных внутриглазных поверхностей. А излучатель успевает вовремя стать приемником.

Эхосигналы формируют на экране монитора неподвижное изображение. Инерционность нашего зрения делает незаметным то обстоятельство, что это изображение в течение секунды тысячекратно исчезает и вновь появляется.

*Двухмерные* приборы для УЗ-диагностики имеют многоэлементные ультразвуковые преобразователи в виде блока автономных одномерных пьезоэлементов. Каждый такой элемент имеет свою «зону ответственности» в двухмерном (плоском) изображении внутренних органов на экране монитора. Система работает циклически. Каждый цикл организован следующим образом: пьезоэлементы поочередно подключаются к высокочастотному генератору электрических импульсов и поочередно становятся источниками ультразвуковых импульсов. Затем система переключается на режим поочередной регистрации отраженных УЗ-импульсов. При этом актуальным является не длительность задержки отраженных эхосигналов, а их интенсивность: чем больше интенсивность, тем больше яркость свечения монитора в «зоне ответственности» каждого пьезоэлемента.

Диагностические возможности расширяются, если в ходе обследования осуществляется перемещение ультразвуковой головки – преобразователя вдоль тела пациента (*сканирование*).

#### 1.4. Волновое сопротивление.

##### Коэффициенты отражения и пропускания

Плотность среды  $\rho$  и скорость звука  $V$  в этой среде образуют комплекс  $\rho V$  – волновое сопротивление (акустическое сопротивление; звуковой импеданс). Именно этот параметр и его распределение в объеме исследуемых органов определяют, в конечном счете, диагностические возможности методов УЗИ.

В методах УЗИ зрительные образы формируются на ультразвуковых лучах, введенных в организм пациента и отраженных, в той или иной степени, на неоднородностях в распределении волнового сопротивления. Но мы в ультразвуковых лучах ничего не видим и не слышим. Поэтому потоки отраженного ультразвука, вышедшего из организма, регистрирующая аппаратура преобразует в электрические сигналы. По ним на экране монитора получается некоторый видео-образ: зрительно доступная картина на плоскости экрана, показывающая, как распределены неоднородности волнового сопротивления в объеме тела пациента. При этом более глубоко расположенные неоднородности могут оказаться в тени неоднородностей, расположенных менее глубоко. Так что медицинское прочтение таких картинок может оказаться сложным, особенно с привычки.

В таблице 1 приведены значения скорости звуковых волн и волнового сопротивления для различных биологических сред организма человека.

Значения волнового сопротивления сред, следующих одна за другой по ходу волнового луча, определяют распределение энергии между отраженными и проходящими в соседнюю среду потоками энергии. Если два слоя две среды

Таблица 1

## Волновое сопротивление тканей человека

Ткань	Скорость звука V (м/с)	Волновое сопротивление $\rho V \cdot 10^6$ (кг/м <sup>2</sup> с)
Кожа	1498–2030	1,73–2,54
Мышечная ткань:	1560–1620	1,13–1,18
гладкая мышца	1551	
поперечно-полосатая	1573	
Жировая ткань	1350–1470	0,86–0,94
Мозг	1520	1,06
Легкие	400–1200	–
Печень	1550	1,11
Кровь	1540–1600	1,04–1,08
Хрящ	1670	–
Костная ткань	2500–4300	2,2–5,0
Дентин	4500	8,0
Эмаль	6200	18,0
Хрусталик	1650	1,73
Стекловидное тело	1530	1,54
Камни печени	1400–2200	0,8–1,6
Вода	1480	1,48
Воздух	331,5	0,0043

одинаковы по величине волнового сопротивления, то на их границе ни отражения, ни преломления не произойдет; луч останется прямолинейным. И наоборот, чем больше отличаются волновые сопротивления соседствующих слоев вещества, тем заметнее будет это место при проведении УЗИ.

Коэффициент отражения показывает, какую часть энергии падающей волны получает волна отраженная. При нормальном падении, то есть когда луч перпендикулярен поверхности раздела сред 1 и 2, коэффициент отражения:

$$R = \left\{ (\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1) / (\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1) \right\}^2 \quad (1)$$

Диапазон возможных значений коэффициента отражения:

От  $R=0$  (отражение отсутствует) до  $R=1$  (падающая волна полностью отражается)

Величина  $D = 1 - R$  – коэффициент пропускания – показывает, какая часть энергии волны, падающей на границу раздела, достается волне, прошедшей во вторую среду.

В таблице 2 приведены значения коэффициентов  $R$  и  $D$  для некоторых сочетаний сред на границе их раздела.

Таблица 2

Отражающая граница	Коэффициент отражения R	Коэффициент пропускания D
Воздух/мягкие ткани	0.999	0.001
Мягкие ткани/пьезокристалл	0.80	0.20
Жир/кость	0.49	0.51
Мышцы/кость	0.41	0.59
Жир/почка	0.006	0.994
Хрусталик/стекловидное тело	0.01	0.99
Вода/мягкие ткани	0.002	0.998
Жир/мышцы	0.011	0.989
Мышцы/стекловидное тело	0.001	0.999

**Примечания:**

1. Из первой строки таблицы 3 следует, что ни звук, ни ультразвук из воздушной среды в мягкие ткани или в воду почти не проникают: коэффициент отражения очень близок к единице. Поэтому при ультразвуковых исследованиях место контакта излучающей ультразвуковой головки с телом пациента обильно смазывают специальным гелем: даже тончайшая воздушная прослойка должна быть исключена.

2. Рыбаки распугивают рыбу не столько своими разговорами, сколько телодвижениями.

3. Ультразвуковой луч проходит границу раздела слоев 1 и 2 дважды: от излучающей головки вглубь тела пациента, а затем, отразившись от каких-то структур пациента, снова проходит эту границу, но в обратной очередности. Коэффициент отражения на границе 1-2 на пути луча «туда» и «обратно» не меняется. Это следует из формулы (1).

4. Коэффициент отражения УЗ на границе «хрусталик-стекловидное тело»:  $R=0.01$  (см. табл. 2. Тем не менее на эхограмме глаза (см. рис 1) граница «хрусталик/стекловидное тело» зафиксирована надежно. Принимаем это к сведению как показатель чувствительности метода диагностики.

*Вопрос продвинутому студенту.* Если на границе раздела двух сред волновое сопротивление меняется резко, скачком от  $\rho_1 V_1$  до  $\rho_2 V_2$ , то на этой границе будет происходить отражение ультразвукового луча в соответствии с формулой (1). Что изменится, если в неоднородной среде такое же по величине изменение волнового сопротивления будет «размазано» вдоль хода лучей?

В заключение этого раздела напомним, что от скорости звука зависит не только волновое сопротивление, но также и длина волны звука, а ее величина может существенно влиять на акустические свойства источников звука. Приведем пример, когда эти обстоятельства становятся существенными. При погружениях на большую глубину экипаж батискафа вынужден работать в условиях высокого давления газовой смеси, заполняющей батискаф, иначе он будет раздавлен забортной водой. Вместо воздуха применяют дыхательную смесь, в которой азот заменен гелием: это оказалось необходимым в связи с тем, что при повышении давления увеличивается количество азота, растворенного в крови, и он начинает оказывать наркотическое действие. Скорость звука в воздухе – 330 м/с, а в гелии – 897 м/с. Скорость звука в такой газовой смеси гораздо больше, чем в воздушной; пропорционально возрастают и значения длин зву-

ковых волн различных компонент голосового спектра. Это приводит к большим изменениям акустических свойств полостей голосового аппарата. Голос взрослого мужчины становится похож на голоса персонажей из детских мультфильмов: пропадают низкочастотные компоненты.

### 1.5. Закон Бугера-Ламберта. Ослабление звука и ультразвука

При распространении звука всегда имеет место необратимый переход звуковой энергии в теплоту. В однородной среде интенсивность звука уменьшается по закону Бугера-Ламберта:

$$I = I_0 e^{-\gamma x} \quad (2)$$

Здесь  $x$  – длина пути плоской волны в поглощающей среде;

$I_0$  – интенсивность звука (ультразвука) на входе в поглощающую среду, в точке  $x = 0$ ;

$\gamma$  – коэффициент поглощения звука. Его величина зависит от плотности и вязкости среды, а также от частоты звуковых волн. Чем больше любой из этих трех параметров, тем больше коэффициент ослабления, больше тепловой эффект от поглощения.

Особо отметим сильную зависимость коэффициента ослабления от частоты и чрезвычайно широкий диапазон частот, актуальных в простой жизнедеятельности и в медицинских приложениях. Чем больше частота колебаний, тем быстрее они затухают.

Чем дальше мы от источника звука, тем больше поглощение звуков высокочастотной части спектра. Высокие частоты как бы вычитаются из первоначального акустического спектра, тем самым постепенно обедняя его. В слышимых звуках начинают преобладать низкие частоты. Ну, а сквозь стены от соседей нам слышны только уханья басов.

Ультразвуковые колебания затухают гораздо быстрее, чем слышимый звук, а высокочастотный ультразвук поглощается сильнее, чем низкочастотный.

Чем больше частота УЗ, тем выше разрешающая способность, достигаемая при УЗИ, то есть меньше размеры деталей, различимых при исследовании. Но с увеличением частоты УЗ усиливается поглощение, а потому уменьшается глубина, на которой могут находиться доступные для исследования структуры. Частоту УЗ приходится выбирать так, чтобы сочетать достаточное разрешение с достижением необходимой глубины. Так, для исследований щитовидной железы, расположенной непосредственно под кожей, используется УЗ-излучение частотой 7,5 МГц, а для исследования органов брюшной полости используют частоту 3,5–5,5 МГц, учитывая при этом и толщину жирового слоя: для худеньких детей можно использовать частоту 5,5 МГц, а для полных детей и взрослых более приемлема частота 3,5 МГц.

В офтальмологии и при исследовании поверхностно расположенных сосудов применяется УЗ частотой до 15 МГц.

*Историческая справка.* Обсуждаемый закон был установлен экспериментально Бугером (1729 г.!) при исследовании поглощения света.

В 1760 году Ламберт получил формулу (2) теоретически и стал, таким образом, соавтором Бугера.

В дальнейшем выяснилось, что экспоненциальный закон ослабления где только ни выполняется! Он описывает поглощение не только света, но и других видов электромагнитных излучений. Например, рентгеновского. В акустике он описывает поглощение звуковых волн всех видов и частотных диапазонов. А специалисты в области радиационной защиты используют его для расчетов ослабления потоков альфа-, бета-, гамма- и нейтронного излучения.

Универсальность закона Бугера-Ламберта не случайна. Универсальным оказался следующее положение теории Ламберта:

слои одинаковой толщины поглощают одну и ту же часть энергии излучения.

Этот тезис можно сформулировать и в категориях вероятностных:

в слоях одинаковой толщины вероятность поглощения излучения одинакова.

В ультразвуковой акустике глубина полупоглощения — это глубина, на которой интенсивность волны уменьшается в два раза.

Но надо иметь в виду, что если ультразвуковая волна отразится в обратном направлении, то до выхода из тела пациента она ослабнет еще в два раза.

В таблице 3 приведены данные о коэффициенте ослабления  $\gamma$  и глубине полупоглощения  $H$  в различных тканях при частоте ультразвука 1 МГц.

Таблица 3

Ткань	$\gamma$ (см <sup>-1</sup> )	H (см)
Мышечная	0,16	2,10
Кожа	0,14–0,66	0,53–2,5
Хрящ	0,58	0,60
Легкое	3,5–5,0	0,07–0,10
Жировая	0,044–0,09	3,9–7,9
Костная	1,5–2,2	0,15–0,23
Кровь	0,023	15,1

### 1.6. Эффект Допплера

Эффект Допплера возникает в тех случаях, когда источник и приемник звука (ультразвука) движутся по отношению друг к другу, сближаясь или удаляясь, и состоит в том, что в этих обстоятельствах частота колебаний, регистрируемых наблюдателем, отличается от частоты колебаний, создаваемых источником звука.

1. Если наблюдатель движется со скоростью  $U$  в сторону неподвижного источника звука, то частота колебаний, регистрируемых наблюдателем:

$$v' = v_0 (V + U) / (V - U) \quad (v' > v_0) \quad (3)$$

Здесь  $V$  – скорость звука;  $v_0$  – частота колебаний, создаваемых источником звука;  $v'$  – частота звука, регистрируемая приемником.

Ничего не изменится, если вместо движения наблюдателя в сторону источника будет движение источника в сторону наблюдателя. Важен факт их сближения.

2. Если наблюдатель удаляется от источника (или источник – от наблюдателя), то частота  $v'$  колебаний, регистрируемых наблюдателем, будет:

$$v' = v_0 (V - U) / (V + U) \quad (v' < v_0) \quad (4)$$

Уравнения получены в предположении, что все события развиваются вдоль одной прямой. Но эффект Доплера будет иметь место и при более сложном движении источника и приемника, лишь бы менялось расстояние между ними.

Приведем пример ситуации, в которой проявляется эффект Доплера. Вы стоите на обочине шоссе, а мимо Вас на неизменных оборотах мотора (и на неизменной частоте  $v$  производимого им звука) проезжает автомобиль. Пока он к Вам приближается, Вы слышите звук его мотора  $v'$  более высокий, чем  $v_0$ , а как только он проехал мимо Вас, звук мотора становится низким, басовитым:  $v < v_0$ . Вы даже можете подумать о водителе что-нибудь лестное: что он нажал на педаль газа только после того, как проехал мимо Вас...

Ультразвуковая аппаратура, работающая на основе эффекта Доплера, широко применяется для контроля состояния кровеносной системы. В качестве примера, рассмотрим сравнительно простой прибор для измерения скорости кровотока.

Компактный ультразвуковой излучатель прижимается к кровеносному сосуду и работает в режиме излучение – прием – излучение – и т.д. Частота излучаемого ультразвука строго постоянна. Импульсы ультразвука отражаются от эритроцитов, так что эритроциты становятся движущимися источниками отраженного ультразвука, а ультразвуковая головка его регистрирует. Чем больше скорость кровотока, тем больше, через эффект Доплера, отличаются частоты излученного и отраженного ультразвука. Разность этих частот (так называемый частотный сдвиг) дает информацию о скорости кровотока, а знак этой разности указывает на направление кровотока.

У подобного прибора появляются дополнительные возможности, если переключения режимов с излучения на прием производить с некоторой задержкой: импульсы, отраженные от ближних к излучателю эритроцитов, регистрироваться не будут. Меняя время задержки, можно, при неподвижном излучателе, обозначать участки кровеносной системы на различном удалении от излучателя.

*Продвинутому студенту:* предложите что-нибудь для того, чтобы удаленные участки предыдущего абзаца имели малую протяженность.

Эффект Доплера наблюдается и при распространении световых волн. Если источник и приемник света движутся по отношению друг к другу, то чем больше скорость этого относительного движения, тем больше частотный сдвиг спектральных линий света от дальних звезд по отношению к аналогичным спектральным линиям от земных источников. Знак этой разности частот указы-

вает на то, что звезды удаляются от нас. Имеет место так называемое «красное смещение» в регистрируемых оптических спектрах. По величине «красного смещения» частот вычисляется скорость удаления этого объекта от нас, и эта скорость пересчитывается на расстояние до него.

Не следует думать, что при этом наша Земля – Пуп Вселенной, от которого все разбегается во всех направлениях. Растут, в связи с расширением Вселенной, расстояния между любыми двумя объектами.

### 1.7. Действие ультразвука на ткани организма

Ультразвук может оказывать на ткани организма механическое, тепловое и химическое действие. Терапевтический эффект достигается совместным действием этих факторов.

Тепловое действие ультразвука в жидкостях и в мягких тканях обусловлено тем, что в таких средах, охваченных ультразвуковыми колебаниями, соседствует множество тонких слоев вещества, имеющих большие отличия в скорости их движения, вплоть до движения соседних слоев в противоположных направлениях. Поэтому силы вязкого трения между слоями могут быть весьма существенны. Механическая работа этих сил во всем объеме «озвученной» среды и есть тепловая энергия, выделенная в этом объеме.

Аналогия: в холодную погоду мы интенсивно трем руки.

Чем больше частота ультразвука, тем больше перепады скоростей в слоях вещества, больше коэффициент его ослабления, больше тепловой эффект.

Обращаем Ваше внимание на значительный, иногда *опасный тепловой эффект*, возникающий на границах раздела тканей с большой разностью волновых сопротивлений. В таких случаях коэффициент отражения ультразвукового луча близок к единице, и интенсивность отраженного луча почти равна интенсивности падающего луча. Поэтому при наложении отраженного луча на падающий, благодаря одинаковости фаз колебаний в этих лучах, результатом их интерференции становятся колебания почти что удвоенной амплитуды. Энергия колебаний пропорциональна квадрату амплитуды, так что в областях, прилегающих к границам раздела с большим коэффициентом отражения, тепловое действие ультразвука наиболее интенсивно. При вводе ультразвука в организм обсуждаемое усиление теплового действия происходит вне организма, и оно не ощутимо. А вот на выходе из организма оно может быть вполне ощутимо. Например, если ультразвуковой излучатель прислонить к мокрой ладони, то вскорости с тыльной стороны ладони появится ощущение, похожее на боль ожога.

В онкологии: **ультразвуковая гипертермия** – локальный контролируемый нагрев нежелательных структур до температуры 41–44 °C без перегрева соседних тканей – может достигаться фокусировкой ультразвукового потока, либо пропусканием нескольких потоков излучения неопасной интенсивности, с их пересечением на нежелательных структурах, где их тепловое действие суммируется.

Терапевтическая процедура, основанная на механическом действии ультразвука – **микромассаж**. Ультразвук создает в тканях высокочастотные локаль-

ные пульсации давления. На любом расположенном вдоль УЗ-луча отрезке протяженностью, равной длине волны, сосуществуют: зона повышенного давления (зона сжатия) и зона пониженного давления (зона растяжения). Спустя каждые полпериода зоны повышенного давления становятся зонами давления пониженного, и наоборот. Длина волны ультразвука в мягких тканях при частоте 1 МГц равна 1,5 мм. Так что зоны сжатия и расширения — действительно зоны локальные, клеточного и субклеточного масштаба. Результаты подобных пульсаций давления зависят от их амплитуды, то есть от интенсивности ультразвука. При низкой интенсивности, не более 1 Вт/см<sup>2</sup>, увеличивается проницаемость клеточных мембран, улучшаются процессы тканевого обмена, и в целом достигается положительный эффект. Малые по интенсивности и длительности терапевтические УЗ-дозы оказывают болеутоляющее, сосудорасширяющее, рассасывающее действие, стимулирующее восстановление поврежденных органов и тканей.

Малыми дозами УЗ-излучения осуществляют массаж сердца и легких, мышечных тканей.

При малых интенсивностях ультразвука микромассаж сопровождается слабым локальным нагревом тканей на доли градуса. Это, как правило, дополнительно стимулирует нормальное протекание физиологических процессов. Но нужна осторожность: при длительном воздействии может наступить перегрев тканей и от ультразвука малой интенсивности. Перегрев возможен, если локальное ежесекундное тепловыделение превосходит ежесекундный теплоотвод, и это длится достаточно долго.

Ультразвуковые ингаляторы — простые и компактные устройства, в которых ультразвук создает из лечебного раствора тонкодисперсный туман, вдыхаемый при ингаляции.

Фонофорез (сонофорез, ультрафонофорез) — это терапевтический метод воздействия на организм, в котором так же сочетаются эффекты механического и теплового действия ультразвука. Он применяется для введения в ткани организма лечебных или косметических препаратов. Вводимый препарат смешивается с контактным гелем для ввода ультразвука в ткани организма. Ультразвуковой излучатель может работать в постоянном режиме (интенсивность порядка 0,5–2 Вт/см<sup>2</sup>), либо в импульсном (0,1–3 Вт/см<sup>2</sup>). При импульсном режиме тепловой эффект воздействия меньше, и это важно для предотвращения перегрева тканей.

Фонофорез аналогичен электрофорезу. При электрофорезе лекарственный препарат, имеющий вследствие диссоциации ионную структуру, внедряется в ткани организма под действием электрического поля. При фонофорезе ультразвук внедряет в ткани хоть ионы, хоть нейтральные частицы.

Кавитация — явление возникновения пустот в виде пузырьков, заполненных газом или насыщенным паром, в жидкости, имеющей пониженное давление.

В зонах разрежения в жидкости возникают зоны пониженного давления. А на растяжение жидкости работать не умеют: недостаточно велики силы межмолекулярных взаимодействий. Поэтому в зонах пониженного давления жидкость может

разорваться, и в ней могут образовываться микрополости, заполненные насыщенным паром. Возникает явление кавитации.

Cavity (лат.) — пустота. Размеры кавитационных пузырьков невелики: доли миллиметра.

Кавитационные пузырьки, возникнув в зоне пониженного давления, оказываются, спустя полпериода, в зоне повышенного давления, и происходит их схлопывание — сокращение до нулевых размеров. Заполняющий их насыщенный пар опять становится жидкостью. При этом происходит сближение его диаметрально противоположных поверхностей с очень большой, и все возрастающей скоростью, и гидравлический удар — резкий всплеск давления, который способен разрушать не только клетки или микроорганизмы, но и металлы. Есть даже способ контроля интенсивности кавитации по количеству дырочек, возникающих в металлической фольге за одно погружение в жидкость.

В зонах возникновения кавитации существенно возрастает коэффициент поглощения УЗ-излучения, интенсивно идут процессы перемешивания и перехода энергии механических колебаний в тепловую.

Кавитационный режим действия ультразвука на ткани организма — в основе эффективной методики безоперационной ультразвуковой липосакции. В этой методике разрушение жировых тканей производится низкочастотным ультразвуком (20–100 кГц).

В фармацевтических производствах кавитационное дробление и перемешивание разнородных препаратов применяется для получения лечебных эмульсий, которые другими способами не изготовить.

Ультразвуковые скальпели в хирургии. Наложение УЗ-колебаний на хирургические инструменты (скальпели, пилки, иглы) существенно снижает усилия резания, уменьшает болевые ощущения, оказывает стерилизующее и кровоостанавливающее действие. Амплитуда колебаний режущего инструмента при частоте 20–50 кГц составляет 20–50 мкм. Подобные скальпели позволяют проводить операции в дыхательных органах без вскрытия грудной клетки, операции в пищеводе и на кровеносных сосудах. Вводя длинный и тонкий УЗ-скальпель в вену, можно разрушить в ней холестериновые утолщения.

В другой разновидности УЗ-скальпелей ультразвук накладывается непосредственно на разрезаемые ткани. Происходит кавитационная деструкция тканей под действием ультразвука высокой интенсивности, достигаемой его фокусировкой на зоне разреза.

Аналогия: в лазерном скальпеле луч тоже фокусируется на зоне разреза.

В урологии механическое действие ультразвука используется для дробления камней в мочевых путях; тем самым и в этих обстоятельствах отпадает необходимость в операции.

При сложных переломах может применяться ультразвуковой остеосинтез. Область перелома заполняют измельченной костной тканью, смешанной с жидким полимером (циакрин), который под действием ультразвука быстро полимеризуется (химическое действие ультразвука). После УЗ-облучения образуется прочный сварной шов, который постепенно рассасывается и заменяется костной тканью.

## БИОАКУСТИКА. ИНФРАЗВУК

**Инфразвук** – это звуковые волны, частота которых ниже области слышимых человеком частот (от латинского *infra* – ниже, под).

Верхняя частотная граница инфразвука – 16 Гц, нижняя – точно не установлена. В настоящее время исследуются инфразвуковые колебания с частотой до тысячных долей одного герца.

Если частота колебаний  $\nu = 0.001$  Гц, то их период:  $T = 1000$  с = 16,7 мин.

Утверждение о том, что 16 Гц – частотная граница между звуком и инфразвуком, – достаточно условное: установлено, что при высокой интенсивности инфразвука слуховое ощущение возникает и на частотах в несколько герц. Правда, эти ощущения необычны: вместо ощущения тона – лишь способность различать отдельные циклы.

Не исключено, что на инфразвук мы реагируем и «в обход» органов слуха: неосознанно используем такие протяженные элементы, как позвоночник и диафрагма.

Инфразвуковые волны распространяются в земной коре, в воздушной и в водной среде.

Интенсивность инфразвука можно измерять в Вт/м<sup>2</sup> и в единицах децибелной шкалы.

### 1. Природные источники инфразвука

«Голос моря» – инфразвуковые волны, возникающие над поверхностью моря при сильном ветре в результате возникновения вихрей за гребнями волн.

Грозовые разряды. Акустический спектр грома содержит не только громкие звуки слышимого диапазона, но и инфразвук высокой интенсивности.

Резкие изменения атмосферного давления, обусловленные циклоническими процессами. Землетрясения. Извержения вулканов.

### 2. Техногенные источники инфразвука

- Вентиляционные шахты метрополитена.
- Ветряные электростанции.
- Все виды транспорта (автомобильный, железнодорожный, метро, трамвай, самолеты).
- Взрывы, обвалы, выстрелы.
- Раскачивание точечных зданий под действием ветровой нагрузки.

### 3. Особые свойства инфразвуковых волн

Во-первых, для инфразвука характерна большая длина волны, и это – прямое следствие его малой частоты.

Напоминаем: длина волны – это расстояние  $\lambda$ , на которое смещается фронт волны за время, равное периоду колебаний  $T$ :  $\lambda = VT$ , где  $V$  – скорость звука. Насколько велики отличия значений длины волны в воде (скорость звука – око-

ло 1500 м/с) на частотах инфразвука, звука и ультразвука, можно оценить с помощью таблицы 4.

Таблица 4

Вид волны	Длина звуковой волны в воде как функция частоты		
	Частота	Период, с	Длина волны
Инфразвук	1 Гц	1 с	$1,5 \cdot 10^3$ м = 1,5 км
Звук	1 кГц = $10^3$ Гц	$10^{-3}$ с	1,5 м
Ультразвук	1 МГц = $10^6$ Гц	$10^{-6}$ с	$1,5 \cdot 10^{-3}$ м = 1,5 мм
Ультразвук	5 МГц = $5 \cdot 10^6$ Гц	$10^{-6}$ с = $0,2 \cdot 10^{-6}$ с	$0,3 \cdot 10^{-3}$ м = 0,3 мм

Явление дисперсии – огибание препятствий – характерно для волн любой физической природы. Его проявления таковы: если размеры препятствия меньше, чем длина волны, то волна его «не замечает», волна на нем не рассеивается и тем более не отражается, луч остается прямолинейным. Из таблицы 4 (см. столбец 4) следует, что высокочастотный ультразвук может обеспечить при УЗИ обнаружение неоднородностей размерами менее одного миллиметра. А для инфразвуковой волны далеко не любое здание, и даже не любой холм могут оказаться заметной неоднородностью.

Во-вторых, для инфразвука характерно очень слабое поглощение в любых средах; как следствие этого – способность распространяться без больших потерь на гигантские расстояния.

### 4. Влияние инфразвука на организм человека

Биологическое действие инфразвука изучено недостаточно, но репутация у него скверная.

Установлено, что инфразвук может быть весьма опасен. Наиболее опасным признан частотный диапазон 6–8 Гц. В этом диапазоне находятся собственные частоты механических колебаний большинства внутренних органов. Разумеется, при этом уровень опасности сильно зависит от интенсивности инфразвука.

С уровнями интенсивности инфразвука некоторых технических устройств можно ознакомиться с помощью таблицы 5.

Таблица 5

Характеристики некоторых инфразвуковых волн		
Источники инфразвука	Характерный частотный диапазон	Уровни интенсивности инфразвука
Автомобильный транспорт	Весь частотный диапазон инфразвука	Снаружи: 70–90 Дб, внутри – до 120 Дб.
Железнодорожный транспорт; трамвай.	10–16 Гц	Внутри и снаружи 85–120 Дб.
Системы вентиляции зданий и метрополитена.	3–20 Гц.	До 75–95 Дб.
Реактивные самолеты	Около 20 Гц.	Снаружи до 130 Дб.

Наблюдавшиеся проявления действия инфразвука: головные боли, снижение внимания, раздражительность. Возможны нарушения функции вестибулярного аппарата. Возможны приступы морской болезни. Наблюдались нарушения ритмов сердечных сокращений и дыхания. Известны случаи нарушений зрения и слуха. При средней интенсивности 140–155 Дб могут наступать обмороки, временная потеря зрения, а при интенсивности порядка 180 Дб может наступить паралич со смертельным исходом.

Согласно действующим санитарным нормам, допустимый уровень интенсивности инфразвука на рабочем месте при работах различной степени интеллектуально-эмоциональной напряженности – не более 95 Дб.

Памятуя о существовании явления резонанса, укажем некоторые частоты собственных колебаний человека:

- тело человека в положении лежа – 3–4 Гц;
- грудная клетка – 5–8 Гц;
- брюшная полость – 3–4 Гц;
- глаза – 12–27 Гц.

Настораживающим является и тот факт, что ритмы, характерные для многих систем организма, тоже лежат в инфразвуковом диапазоне:

1. частота сердечных сокращений: 1–2 Гц;
2. дельта – ритм мозга (сон): 0.5–3.5 Гц;
3. альфа-ритм мозга (состояние покоя): 8–13 Гц;
4. бета-ритм (умственная работа); 14–35 Гц.

В истории развития науки и техники ряда стран есть мрачные страницы, связанные с разработкой инфразвукового (психотронного) оружия. Оно потенциально предназначалось для дистанционного медико-биологического и психофизического воздействия на войска и население противника. Но могло бы пригодиться и силам полиции для «работы» с собственным населением, как замена водометов, слезоточивых газов и т. п. Пока что международные конвенции приостановили прогресс в этих направлениях.

## 5. Медицинское применение инфразвука

Сложность применения инфразвука в медицине обусловлена его большой потенциальной опасностью для живого организма на данном уровне изученности проблемы. Предстоят сотни исследований и долгие годы работы, чтобы найти подходящие параметры инфразвукового воздействия на ткани и органы.

Примеры разработок в области медицинского применения инфразвука:

- в офтальмологии разработан метод лечения близорукости;
- инфразвуковой фонофорез нашел применение при лечении рогаковицы.
- разработаны физиотерапевтические аппараты для лечения инфразвуком.
- в онкологии исследуются возможности инфразвуковых методов борьбы с раком.

Но это пока что – отдельные находки, известные в узких кругах.

## 6. Инфразвук в экологии

Средняя температура воды мирового океана – один из важнейших индикаторов состояния климата на нашей планете. Проблема точного измерения этого параметра резко упростилась благодаря применению инфразвуковых методов исследования. Вот как удалось решить эту проблему.

Корабль А расположен вблизи американского побережья Атлантического океана. Корабль оснащен погруженным в воду генератором инфразвука.

Корабль Б расположен вблизи противоположного, африканского побережья того же Атлантического океана. Корабль оснащен погруженным в воду детектором инфразвука.

Импульсу инфразвукового излучения пройти водную дистанцию порядка тысячи километров – дело пустяковое: он пройдет ее, почти не уменьшив свою интенсивность. И он не уйдет из воды в воздух. Но его скорость распространения в воде является некоторой функцией температуры воды. Поделив расстояние АБ на длительность прохождения инфразвукового импульса от А до Б, мы получаем среднюю скорость инфразвука в воде, и через упомянутую температурную функцию – среднюю температуру воды, с осреднением не только вдоль трассы АБ, но и по глубине.

Заметим так же, что при землетрясениях, при ядерных испытаниях, при крупных взрывах, извержениях вулканов – во всех этих и им подобных обстоятельствах инфразвуковые методы позволяют локализовать источники и определить их мощность.

### Контрольные вопросы к разделу «Биоакустика. Инфразвук»

1. Пьезоэлектрики, Прямой и обратный пьезоэлектрический эффект.
2. Пьезоэлектрические излучатели и приемники ультразвука в медицинской технике
3. Пьезоэлектрический эффект в процессах ремоделирования костных тканей.
4. Эхолокация в ультразвуковой диагностике (УЗИ). Одномерные и двумерные диагностические приборы.
5. Волновое сопротивление. Коэффициенты отражения и пропускания ультразвука.
6. Ослабление звука и ультразвука. Закон Бугера-Ламберта. Глубина полупоглощения.
7. Эффект Доплера. Его применение для измерения скорости кровотока.
8. Механическое и тепловое действие ультразвука: микромассаж, ультразвуковая гипертермия. Фонофорез.
9. Кавитация, ее применение в медицине.
10. Применение ультразвука в хирургии и урологии. Ультразвуковой скальпель. Ультразвуковой остеосинтез.
11. Инфразвук. Природные и техногенные источники инфразвука.
12. Особые свойства инфразвука, в сравнении со звуком и ультразвуком.
13. Влияние инфразвука на организм человека. Предельно допустимые уровни интенсивности.

Учебное издание

**Сидоров Владимир Павлович**

**Практикум по физике**

Часть 1. Биоакустика

*Учебно-методическое пособие*

Подписано в печать 06.06.2018 г. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.  
Гарнитура Таймс. Объем 3,0 печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 51.

Отпечатано в ЦМТ СПбГПУ

ISBN 978-5-907065-42-0