

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТОНАЛЬНОЙ ПОРОГОВОЙ АУДИОМЕТРИИ. СНЯТИЕ АУДИОГРАММЫ

Цель работы: изучение физических и физиологических характеристик звука, физических основ тональной аудиометрии; знакомство с работой аудиометра, снятие аудиограммы.

Литература

1. Ремизов А.Н. Медицинская и биологическая физика. – М.: ГЕОТАР-Медиа, 2012. – С. 137–152.
2. Антонов В.Ф., Коржуев А.В. Физика и биофизика. Курс лекций для студентов медицинских вузов. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2006. – С. 27–39.

Основные вопросы

1. Природа звука.
2. Виды звука.
3. Физические (объективные) и физиологические (субъективные) характеристики звукового тона.
4. Закон Вебера-Фехнера.
5. Звуковые измерения.
6. Кривые порога слышимости и болевого порога.
7. Описание звукопроводящей и звуковоспринимающей систем органа слуха.
8. Звуковые методы исследования в клинике: аускультация, перкуссия, аудиометрия.
9. Аудиометр, устройство и назначение.

Тональная пороговая аудиометрия широко используется в клинической практике для исследования органа слуха. Выполнение данной работы и изучение относящихся к ней теоретических вопросов важно для понимания различных диагностических методик: аускультации, перкуссии, фонокардиографии, аудиометрии, а также механизма воздействия на организм человека инфразвука и шумов.

Звуковыми волнами или звуком называются продольные механические волны с частотой от 16 до 20000 Гц, распространяющиеся в упругих средах. Скорость распространения звука зависит от плотности и упругих свойств среды (уменьшается при повышении плотности и увеличивается при возрастании упругости). В жидкостях и газах звуковые волны могут быть продольными, а в твёрдых телах – как продольными, так и поперечными.

Уравнение звуковой волны имеет следующий вид:

$$S = A \cos \left[\omega \left(t - \frac{x}{c} \right) \right],$$

где S – смещение колеблющейся частицы среды относительно положения равновесия; A – амплитуда колебаний; ω – круговая частота колебаний; t – время распространения волны; x – координата колеблющейся частицы среды; c – скорость распространения звуковой волны.

Источником звука может быть колеблющееся тело, частота колебаний которого лежит в диапазоне звуковых частот (камертон, струна и т.д.). Звуки делятся на простые тоны, музыкальные звуки, шум, звуковые удары.

Простой тон – звуковое колебание, происходящее по гармоническому закону определённой частоты (ν).

Музыкальный звук – сложный тон, является результатом сложения простых тонов с частотами $\nu_0, 2\nu_0, 3\nu_0$ и т.д. Сложный тон может быть разложен на простые, при этом тон наименьшей частоты (ν_0) называется основным, а остальные ($2\nu_0, 3\nu_0$ и т.д.) – обертонами (гармониками). Частота гармоник кратна частоте основного тона. Сложный тон может быть представлен в виде акустического спектра (рис. 1).

Акустическим спектром сложного тона называется набор частот всех гармоник, входящих в его состав, с указанием их интенсивностей (или амплитуд A). Спектр сложного тона – линейчатый.

Шум – суперпозиция различных тонов, частота и амплитуда которых меняется, как правило, беспорядочно. Спектр шума – сплошной (рис. 2).

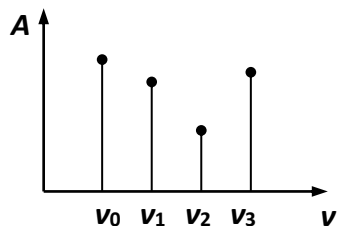


Рис. 1. Акустический спектр сложного тона

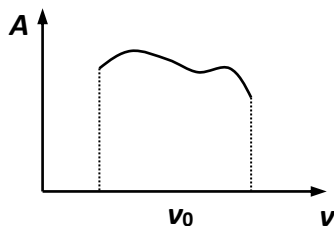


Рис. 2. Акустический спектр шума

Звуковой удар – это кратковременное звуковое воздействие: хлопок, взрыв и т.д.

Объективные и субъективные характеристики звука

При распространении звуковых волн в упругой среде происходит перенос энергии колеблющихся частиц среды без переноса их массы.

Энергетической характеристикой звука является интенсивность (I). **Интенсивностью** или силой звука называется энергия, переносимая звуковой волной за единицу времени через единицу площади, перпендикулярной направлению распространения волны; в системе СИ интенсивность измеряется в $Вт/м^2$. Ещё одной физической характеристикой звука является звуковое давление. Звуковым или акустическим давлением называют эффективное значение избыточного над атмосферным давления, возникающего в участках сгущения частиц воздуха в звуковой волне.

Для плоской гармонической волны интенсивность звука I связана со звуковым давлением уравнением:

$$I = \frac{p_0^2}{2\rho C} = \frac{p_{эфф}^2}{\rho C},$$

где p_0 – амплитуда звукового давления; $p_{эфф}$ – эффективное значение давления; ρ – плотность среды; C – скорость звука.

Указанную выше формулу можно представить в виде:

$$I = \frac{1}{2} \rho C (2\pi\nu)^2 A^2.$$

Интенсивность звука данной частоты пропорциональна квадрату амплитуды A звуковой волны.

Интенсивность I , частота ν , акустический спектр являются объективными характеристиками звуковой волны: они могут быть оценены соответствующими приборами независимо от человека. Однако звук является объектом слуховых ощущений, поэтому оценивается человеком также субъективно. Объективные (физические) и соответствующие им субъективные (физиологические) характеристики звука и связь между ними схематически можно представить следующим образом:



- Высота тона определяется частотой звука.
- Громкость звука зависит от интенсивности (звукового давления) и частоты звука.
- Тембр звука определяется акустическим спектром.

Громкость звука характеризует уровень слухового ощущения по сравнению с порогом слышимости. **Порогом слышимости** называют минимальную интенсивность звука, которая вызывает едва различимое слуховое ощущение.

Громкость звука зависит не только от его интенсивности и частоты, но и от физиологических особенностей органа слуха. Чувствительность органа слуха может меняться в широких пределах. Ухо воспринимает звук как малой интенсивности (порог слышимости на частоте стандартного чистого тона 1000 Гц по среднестатистическим данным: $I_0 = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2$), так и очень большой (болевой порог: $I_6 = 10 \text{ Вт/м}^2$). На частоте 1000 Гц диапазон изменения интенсивности, воспринимаемый ухом, наибольший: от I_0 до $10^{13} \cdot I_0$, т.е. включает 13 порядков (это среднестатистические данные).

Для оценки *интенсивности* звука вводят понятие уровня интенсивности звука (L) и применяют логарифмическую шкалу – шкалу уровней интенсивности, в которой

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

где I_0 – стандартный порог слышимости, принимаемый за нулевой уровень.

Согласно этой шкале изменению интенсивности в 10 раз соответствует единица шкалы, называемая *белом* (B). Одна десятая бела называется децибелом ($дБ$). Таким образом, весь диапазон абсолютных интенсивностей (от I_0 до $10^{13} \cdot I_0$) соответствует 130 дБ по логарифмической (относительной) шкале:

Интенсивность звука, Вт/м^2	10^{-12}	10^{-10}	10^{-8}	10^{-6}	10^{-4}	10^{-2}	1	10
Уровень интенсивности (L), $дБ$	0	20	40	60	80	100	120	130

Несмотря на то, что *громкость* звука является субъективной характеристикой, она также может быть оценена количественно.

В основе её количественной оценки лежит закон *Вебера-Фехнера*: если увеличивать раздражение в геометрической прогрессии (в одинаковое число раз), то ощущение этого раздражения возрастает в арифметической прогрессии (на одинаковую величину). Применительно к громкости закон Вебера-Фехнера математически можно выразить следующим образом:

$$E = k \lg \frac{I}{I_0},$$

где E – уровень громкости звука на определённой частоте; I – интенсивность звука в абсолютных единицах; I_0 – порог слышимости; k – коэффициент пропорциональности, зависящий от частоты звука.

Условно считают, что на частоте 1 кГц шкала уровней интенсивности совпадает со шкалой громкости, т.е. $k = 1$ и $E = \lg \frac{I}{I_0}$. Для отличия единиц уровня интенсивности и

громкости в шкале громкости децибел называют **фоном**. Громкость звука на других частотах измеряют, сравнивая исследуемый звук со звуком частотой 1 кГц, создаваемым звуковым генератором. Интенсивность стандартного тона ($\nu = 1$ кГц) изменяют до тех пор, пока его громкость не станет равной громкости исследуемого звука. В таком случае интенсивность стандартного тона в децибелах, измеренная по прибору, будет равна громкости исследуемого звука в фонах.

Зависимость уровня громкости от частоты определяют при помощи семейства **кривых равной громкости**, т.е. графиков зависимости уровня интенсивности от частоты ν при постоянном уровне громкости E . Основным среди них является график зависимости уровня пороговой интенсивности от частоты. Пороги слышимости на разных частотах отличаются друг от друга по величине и определяются кривой, соответствующей $E = 0$. Уровень пороговой интенсивности минимален в области частот от 1000 до 5000 Гц (рис. 3).

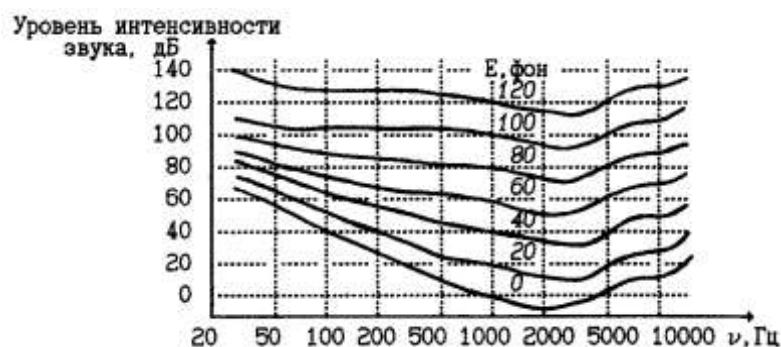


Рис. 3. Семейство кривых равной громкости
Орган слуха

Орган слуха является анализатором звуков, в котором различают звукопроводящую и звуковоспринимающую системы (рис. 4). *Звукопроводящая система* включает в себя наружное ухо, среднее ухо и жидкостные среды внутреннего уха. К *звуковоспринимающей системе* относят внутреннее ухо и центр слуха коры головного мозга.

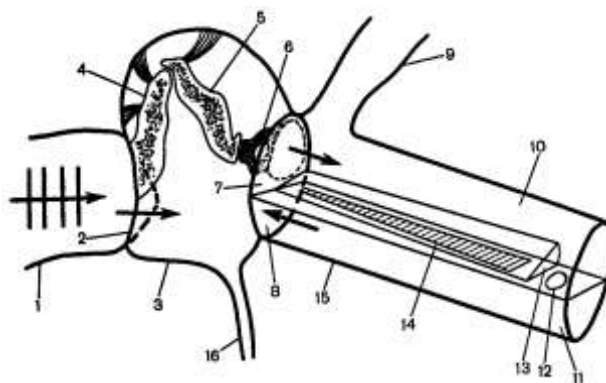


Рис. 4. Орган слуха:

- 1 – наружный слуховой проход; 2 – барабанная перепонка; 3 – среднее ухо;
 4 – молоточек; 5 – наковальня; 6 – стремечко; 7 – овальное окно;
 8 – круглое окно; 9 – вестибулярная часть внутреннего уха;
 10 – вестибулярный канал; 11 – барабанный канал; 12 – геликотрема;
 13 – улитковый канал; 14 – базилярная мембрана; 15 – улитка (развёрнута);
 16 – евстахиева труба

Наружное ухо состоит из ушной раковины и наружного слухового прохода, закрытого с одного конца барабанной перепонкой. *Ушная раковина* улавливает звук и участвует в определении локализации источника звука. Звук от источника попадает в наружный слуховой проход. В результате дифракции звука на ушной раковине происходит изменение спектрального состава звуковой волны, попадающей в слуховой проход. Изменение спектра звука человек научился ассоциировать с направлением на источник звука в вертикальной плоскости. Направление на источник звука в горизонтальной плоскости человек ассоциирует с изменением разности фаз для волн, попадающих в правую и левую ушные раковины от источника звука. Звук от источника до ушных раковин проходит разные расстояния и возникает разность фаз от 0 до 180°. Кроме фазового различия, локализации источника звука способствует различие интенсивностей звука у разных ушей и «акустическая тень» от головы для одного уха.

Наружный слуховой проход – слегка извилистый канал длиной 2,5-3,0 см у взрослого человека. Звуковая волна проходит через слуховой проход, частично отражается от барабанной перепонки, и в результате при сложении падающей и отражённой волн может возникнуть акустический резонанс. Это происходит тогда, когда длина резонатора (2,5–3,0 см) равна $\lambda/4$ звуковой волны, то есть при частоте звука 1–4 кГц.

Физиологическое значение наружного уха заключается в проведении звуковых волн к барабанной перепонке, которая отделяет наружное ухо от среднего. Размер барабанной перепонки составляет у взрослого человека 9-10 мм; она расположена косо, образуя угол в 120-140° к верхней стенке слухового прохода. Барабанная перепонка напоминает конус с углублением в середине. Благодаря конусовидной форме и неодинаковому натяжению на различных участках барабанная перепонка обладает незначительным собственным резонансом, вследствие чего она передаёт звуковые волны разной частоты одинаково без искажения.

Среднее ухо состоит из ряда сообщающихся полостей – барабанной полости, воздухоносных ячеек сосцевидного отростка и слуховой трубы. Внутренняя стенка барабанной полости является наружной стенкой внутреннего уха. Среднее ухо соединяется с атмосферой через слуховую (евстахиеву) трубу.

Через систему *слуховых косточек* (молоточек, наковальня и стремечко) среднее ухо трансформирует звуковые колебания воздуха в звуковые колебания жидкой среды внутреннего уха. Слуховые косточки тесно связаны между собой сочленениями и образуют единую подвижную систему. Система косточек работает как рычаг с выигрышем в силе со стороны внутреннего уха

в 1,3 раза у человека, при этом среднее ухо увеличивает наружное звуковое давление при передаче его внутреннему уху примерно в 26 раз, т.к. площадь барабанной перепонки, связанная молоточком, 64 мм^2 , а площадь овального окна внутреннего уха, связанная со стремечком, 3 мм^2 . Среднее ухо является также защитным устройством для внутреннего уха от звуков большей интенсивности. Ослабление колебаний в этом случае осуществляется рефлекторным расслаблением мышц косточек среднего уха.

Внутреннее ухо размещено в пирамиде височной кости, содержит систему полостей с заключёнными в них рецепторными структурами органа слуха и вестибулярного аппарата. Внутреннее ухо называют лабиринтом. В лабиринте различают преддверие, улитку и полукружные каналы. Один из каналов начинается от овального окна и называется вестибулярной лестницей, другой, который идёт от круглого окна, – барабанной лестницей. Вестибулярная и барабанная лестницы соединены в области купола улитки маленьким отверстием – геликотремой.

Эти каналы наполнены перилимфой. Колебания стремечка передаются мембране овального окна, от неё перилимфе и воздействуют на мембрану круглого окна. Между вестибулярной и барабанной лестницами находится улитковый канал, он заполнен эндолимфой. Между улитковым каналом и барабанной лестницей проходит основная *базиллярная мембрана*. Благодаря неоднородности базиллярной мембраны по длине (ширина и толщина мембраны увеличивается от овального окна к вершине улитки) звуковые колебания разных частот приводят в движение различные участки базиллярной мембраны.

На ней находится спиральный (кортиев) орган, содержащий механочувствительные рецепторные клетки, афферентные нейроны которых формируют слуховой нерв. *Кортиев орган* и является преобразователем механических колебаний в электрические сигналы. Таким образом, во внутреннем ухе колебания мембраны овального окна вызывают колебания перилимфы, которые, в свою очередь, приводят к сложным колебаниям базиллярной мембраны. В результате этих колебаний происходит раздражение волосковых клеток и, как следствие, генерация электрических сигналов, несущих информацию о характеристиках звуковой волны в центр слухового восприятия коры головного мозга.

Аудиометрией называется один из методов исследования остроты слуха, т.е. чувствительности органа слуха к звукам различной частоты. Так как чувствительность органа слуха определяется порогом восприятия звука, то аудиометрия заключается в определении порогов слышимости звуков разной частоты (**пороговая аудиометрия**). При этом на каждой частоте пациент слышит гармонический тон, поэтому метод называется **тональным**. Метод тональной пороговой аудиометрии – это метод, основанный на определении потери слуха по отношению к норме, то есть определение разности порогов слышимости пациента и нормы.

Аудиометр представляет собой звуковой генератор чистых тонов со ступенчатой регулировкой (через 5 дБ) интенсивности звука на частотах от 125 до 8000 Гц . Аудиометр предназначен для определения порогов слышимости пациента по воздушной или костной проводимости. Определение порогов слышимости осуществляется подачей испытуемому чистых тонов различной частоты и интенсивности. Регистрация результатов измерений производится по ответам пациента на специальном бланке *аудиограммы* (рис. 5) путём нанесения точек в месте пересечения значений частоты тона и соответствующей пороговой интенсивности звука для данного пациента.

Исследование костной проводимости производится так же, как и исследование воздушной проводимости, но с ограничением диапазона частот от 250 до 4000 Гц . При этом следует учесть, что максимальные значения уровня интенсивности тона соответствующих частот на 50 дБ меньше, чем в режиме работы с телефоном воздушной проводимости.

Если потеря слуха в одном ухе пациента более чем на 40 дБ превышает потерю слуха в другом, то подаваемый в исследуемое хуже слышащее ухо тон значительной интенсивности может прослушиваться лучше слышащим ухом по воздуху или костной ткани черепа. Это приведёт к неточности измерений. Чтобы этого избежать, на более

чувствительное ухо через телефон воздушной проводимости подаётся маскирующий шум. Маскирующий шум используется двух видов: широкополосный (ШП) и узкополосный (УП). Исследование слуха в этом случае ведётся описанным выше способом.

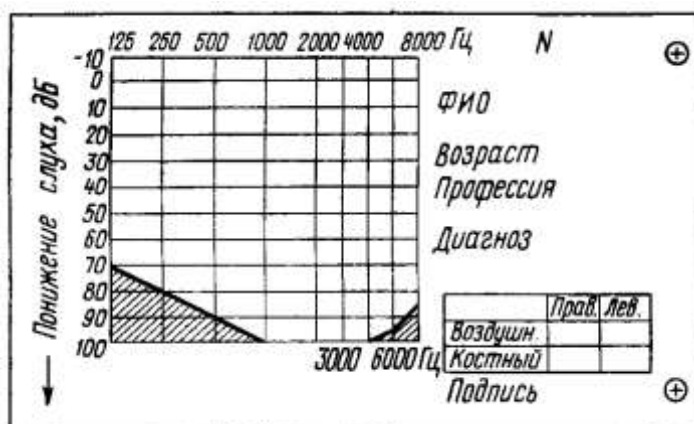


Рис. 5. Бланк аудиогаммы

Аудиограмма – это график зависимости понижения слуха в дБ от частоты тона. Ноль на бланке аудиогаммы соответствует порогу слышимости для нормального слуха. Ниже нуля на бланке аудиогаммы расположена область понижения слуха в децибелах. Заштрихованная зона на бланке – предельно допустимая громкость.

Практическая часть

I. Изучение физических и физиологических характеристик звука

Оборудование: осциллограф, генератор звуковых колебаний, наушники (телефоны).

Задание 1. Изучение зависимости высоты звука от его частоты

1. Включите осциллограф и генератор звуковых колебаний в сеть, установив предварительно ручку «Выход» генератора в крайнее левое положение.

2. Подайте на осциллограф и в наушники одновременно сигнал частотой 1000 Гц и напряжением 2 В (ручка «Выход») с выхода звукового генератора (ЗГ).

Получите на экране осциллографа развёрнутое изображение синусоидального сигнала (если изображение будет неустойчивое, то, вращая ручки осциллографа «Развёртка» и «Синхронизация», добейтесь устойчивого изображения сигнала на экране). Зарисуйте полученную осциллограмму.

3. Увеличьте частоту звукового сигнала до 2000 Гц. Зарисуйте осциллограмму.

4. Сделайте вывод о связи высоты звукового тона с частотой.

Задание 2. Изучение зависимости громкости от интенсивности звука

1. Получите и зарисуйте осциллограмму звукового сигнала, соответствующего частоте 1000 Гц и напряжению на выходе ЗГ 2 В, прослушайте его.

2. Получите и зарисуйте осциллограмму звукового сигнала, соответствующего частоте 1000 Гц и напряжению на выходе ЗГ 4 В.

3. Сделайте вывод о связи громкости звука с его интенсивностью.

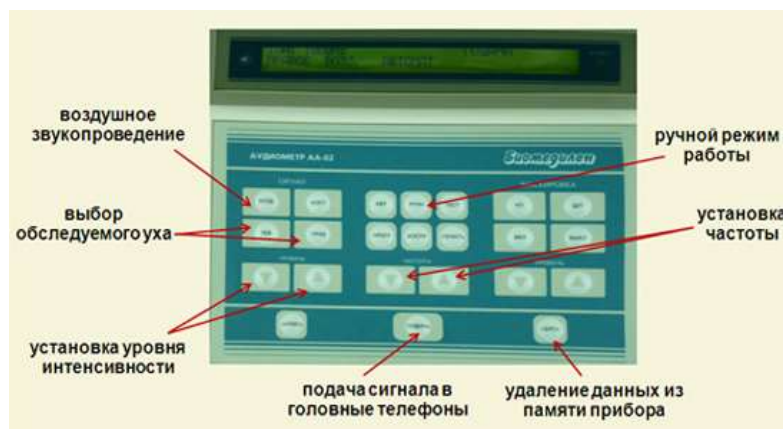
Задание 3. Изучение зависимости громкости от частоты звука

1. Установите на ЗГ сигнал частотой 1000 Гц и напряжением 2 В .
2. Изменяя частоту в диапазоне $50 - 15000 \text{ Гц}$ при постоянной амплитуде сигнала, прослушайте его.
3. Сделайте вывод о зависимости громкости звука от его частоты при постоянной интенсивности.

Выключите установку

II. Снятие спектральной характеристики уха на пороге слышимости

Описание аудиометра автоматизированного поликлинического АА-02



Аудиометр автоматизированный поликлинический АА-02 конструктивно оформлен в виде настольного переносного прибора, имеет клавиатуру плёночного типа, индикацию режимов работы и результатов обследования на ЖК-дисплее, используется для диагностики слуха в различных медицинских учреждениях.

На наклонной панели прибора слева направо расположены клавиши подачи сигнала в режиме воздушной или костной проводимости, переключатели телефонов левого или правого уха; далее расположены клавиши переключения автоматического или ручного режима работы аудиометра, клавиши воспроизведения результатов измерений на индикатор либо на печать.

В режиме ручной работы аудиометра для изменения частоты и интенсивности тонов, подаваемых в левое или правое ухо, используются клавиши понижения или повышения, соответственно, частоты и интенсивности тона.

Далее следуют клавиши подачи маскировочного шума двух видов: УП – узкополосного и ШП – широкополосного. Ниже расположены клавиши изменения уровня интенсивности маскирующего шума, подаваемого в правый или левый телефон.

В целях безопасности запрещается заземлять прибор через систему отопления и газовую сеть, производить замену предохранителя при включённом в сеть приборе.

Задание 1. Снятие аудиограммы на аудиометре АА-02

1. Подключите телефон, кнопку пациента и сетевой шнур к соответствующим разъёмам на задней стенке аудиометра.
2. Подключите аудиометр к сети.
3. Включите аудиометр (сетевой тумблер находится на задней панели прибора). На индикаторе появится следующее изображение:

Тон:	1000Hz	ПОДАЧА
ПРАВОЕ	ВОЗД.	АВТОМАТ

4. Нажмите на кнопку «СБРОС». Аудиометр готов к работе.
5. Обследуемый должен надеть и подогнать по размеру оголовье с телефонами (на правом ухе находится *красный* телефон, на левом – *синий*).
6. Обследуемый должен нажать и отпустить кнопку «ОТВЕТ». Аудиометр автоматически переходит в режим тренировки. Тренировка производится с целью научить

обследуемого правильно нажимать кнопку «ОТВЕТ» в тот момент, когда он начинает слышать тон в телефоне. Если обследуемый отвечает и даёт три правильных ответа подряд, аудиометр автоматически перейдёт к классической аудиометрии. После определения порогов слышимости на разных частотах для правого уха процесс обследования автоматически повторяется на левом ухе.

При завершении программы в аудиометре раздаётся звуковой сигнал, а на индикаторе появляется заключение: «НОРМА», «НЕ НОРМА» и т.д.

7. Для воспроизведения полученных результатов нажмите кнопку «ВОСПР».

8. Нажимая кнопки «ЧАСТОТА Δ , ∇ », «ЛЕВ» и «ПРАВ» посмотрите значения порогов слышимости на разных частотах, составьте таблицу и постройте аудиограмму.

9. Нажмите на клавишу «АВТ» для выхода из режима воспроизведения.

Для обозначения порогов слышимости правого и левого уха при вычерчивании аудиограммы рекомендуется пользоваться разноцветными карандашами или различными видами линий (сплошной, пунктирной и т.д.).

По окончании работы выключите прибор и выньте вилку шнура питания из сетевой розетки.

Примеры тестового контроля

1. Физическими характеристиками звука являются:

- | | |
|------------------|------------------------|
| 1) громкость | 4) длина волны |
| 2) интенсивность | 5) тембр |
| 3) частота | 6) акустический спектр |

Правильные ответы: 2, 3, 6

2. Характеристиками слухового ощущения являются:

- | | | |
|------------------|------------------------|-----------|
| 1) громкость | 4) длина волны | 7) высота |
| 2) интенсивность | 5) тембр | |
| 3) частота | 6) акустический спектр | |

Правильные ответы: 1, 5, 7

3. Если интенсивность звука, измеренную в единицах $Вт/м^2$, увеличить в 100 раз, то соответственно громкость звука на частоте 1000 Гц увеличится:

- | | | | |
|-------------|--------------|-------------|---------------|
| 1) в 2 раза | 2) на 20 фон | 3) в 10 раз | 4) на 100 фон |
|-------------|--------------|-------------|---------------|

Правильный ответ: 2

