

## Акустические приборы и системы

УДК 534.134

### О статистической и индивидуальной частотной зависимости порога слышимости

**Н.В. Богданова**, канд. техн. наук, **О.А.Зубченко**, **С.А. Найда**, д-р техн. наук, **К.Н. Скирдов**

Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”,  
пр. Победы, 37, Киев-56, 03056, Украина.

**В работе проведено сравнение статистических индивидуальных и групповых частотных зависимостей порога слышимости на основе эквивалентной схемы среднего уха. Это дало возможность дифференцировать нарушения слуха и предложить метод объективной аудиометрии на основе индивидуальной частотной зависимости порога слышимости, который значительно повышает достоверность диагностики слуха человека. Библ.7, рис.8.**

**Ключевые слова:** порог слышимости, эквивалентная схема среднего уха, формула для параметра нормы среднего уха.

#### Введение

До получения формулы для параметра нормы среднего уха [1], количественными характеристиками слуха были индивидуальные частотные зависимости порогов слышимости. Ранее считалось, что среднее ухо имеет одну резонансную частоту, которая определяется массой трех слуховых косточек и суммарной гибкостью барабанной перепонки и полостей среднего уха, а барабанная перепонка на частоте резонанса пропускает почти всю звуковую энергию. Математически колебания такой системы описываются дифференциальным уравнением второго порядка. В действительности же среднее ухо состоит из двух связанных резонансных систем: последовательной механической и параллельной акустической и описываются дифференциальным уравнением четвертого порядка [2]. Элементом связи служит барабанная полость, которая является также элементом акустической гибкости параллельной системы, массой которой является колеблющаяся масса воздуха слуховой трубы. Было показано, что механические и акустические параметры среднего уха в

норме связаны формулой для параметра нормы среднего уха.

Целью работы является сравнение и анализ статистических индивидуальных и групповых частотных зависимостей порога слышимости на основе эквивалентной схемы среднего уха. Это даст возможность дифференцировать нарушения слуха.

#### Пороги слышимости

Ухо человека обладает свойствами частотного анализатора, дискретным восприятием по частотному и динамическому диапазонам [3]. Все эти операции осуществляются в улитке внутреннего уха. Она содержит основную (базиллярную) мембрану, состоящая из большого числа волокон, слабо связанных между собой. Вдоль основной мембраны расположены нервные окончания, каждое из которых возбуждается от прикосновения к ним волокон основной мембраны, посылая в слуховой центр мозга электрические импульсы. Если волокно основной мембраны, при своих колебаниях не достигает до ближайшего к нему нервного окончания, то человек такой звук не слышит. Этот скачкообразный переход из слышимого состояния в неслышимое и обратно называют порогом слышимости. На рис. 1 приведена индивидуальная кривая порога слышимости, болевого порога для одного уха, и области слышимости речи и музыки [4]. Она получена для свободного звукового поля при размещении излучателя перед слушателем.

Пороги слышимости имеют значительный разброс в первую очередь из-за возрастных изменений, а также из-за условий работы. Статистическое исследование порогов слышимости у посетителей Всемирной выставки в Нью-Йорке в 1931 г. дало результаты, приведенные на рис. 2 [3].

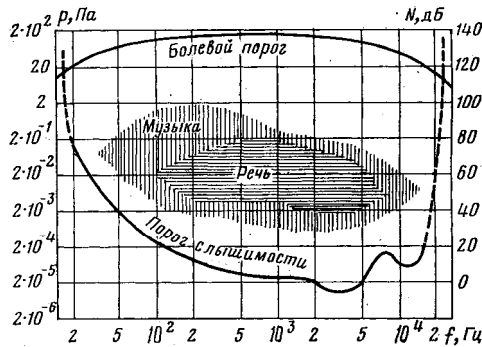


Рис. 1. Кривые ограничивающие область слышимости

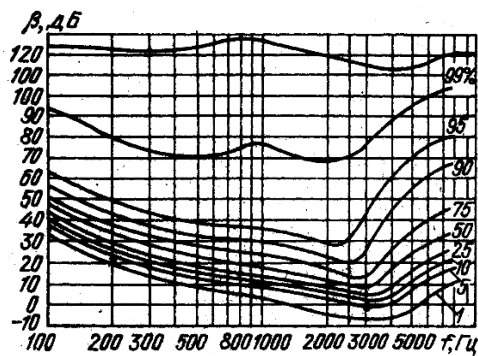


Рис. 2. Статистическая частотная зависимость порога слышимости при бинауральном слушании в свободном поле для случая фронтального поведения звуковой волны (параметр кривых – процент лиц, пороги которых лежат ниже величины параметра)

Сравним индивидуальную и статистические частотные зависимости (такое сравнение в литературе нам не встречалось), прежде всего, для людей с нормальным слухом. Из рис. 2 видно, что такой слух имеют всего 5% лиц. На обеих зависимостях наибольшей чувствительностью ухо обладает в области частот 3000 – 3500 Гц, где порог слышимости имеет наименьшую величину  $\sim 2 \cdot 10^{-5}$  Па или 0 дБ. Однако, на частотах выше 100 Гц на индивидуальной зависимости и на статистической – пороги совпадают (20 дБ).

Из этого следует, что нормальным слухом, (порогом в минимуме) меньше 10 дБ (50%), обладает каждый второй человек.

Из рис. 2 также видно, что для 95% частотные зависимости, от 100 Гц до минимума, параллельны друг другу, из чего следует, что потери слуха у этого контингента равновероятны в интервале частот от 100 Гц до 5 кГц. Однако индивидуальные частотные зависимости не будут напоминать статистические. Смещение ста-

стистического минимума, в сторону низких частот 2000–2500 Гц объясняется возрастными изменениями, начинающимися с высоких частот.

На рис. 3 представлены статистические результаты измерения потерь слуха с использованием клинического аудиометра в режиме тональной аудиометрической моды [5]. Уровень сигнала регулировался вручную, используя интегральный электронный аттенуатор с шагом 1 дБ. В отличие от данных в свободном поле, использовались НЧ телефоны до 10 кГц и ВЧ для 12 кГц и 16 кГц.

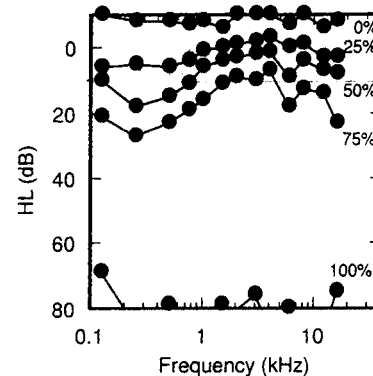


Рис. 3. Статистическое исследование порогов слышимости группы из 107 детей

Изучалась группа из 107 детей из варшавских начальных школ в период 1999 – 2000 гг., прошедших тщательное аудиометрическое обследование.

Видно, что потерями слуха меньше 20 дБ, так, как и на рис. 2, обладает 50% обследуемых.

Субъектами с нормальным (потери < 10 дБ) слухом обладали 13,1 % всей группы. Из рис. 3 видно, что зависимости не параллельны друг другу ниже частоты минимума. Но внутри этой группы (рис. 4) зависимости близки к параллельным. Обратим внимание, что в отличие от рис. 1 и 2 здесь 0 дБ это аудиометрический ноль, поэтому зависимости параллельны оси частот и представляют собой потери слуха.

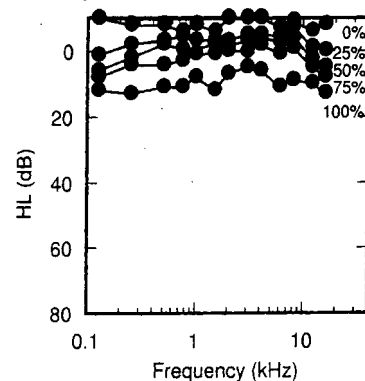


Рис. 4. Статистическое исследование порогов слышимости группы из субъектов с нормальным слухом [5]

Важно отметить, что наибольший контингент детей (54,2%) имеют НЧ потери (рис. 5), что указывает на потери из-за ужесточения барабанной перепонки. Контингент детей с ВЧ потерями (рис. 6) (24,2%) и глубокими потерями различной конфигурации (рис. 7) (15,9%). На всех рис. 4-7 параметр “проценты” относится только к данной группе детей.

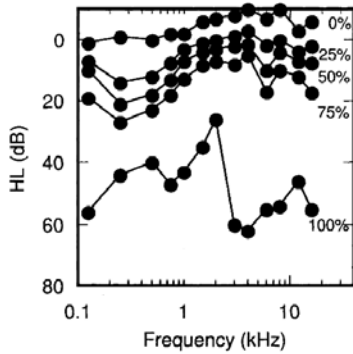


Рис. 5. Статистическое исследование порогов слышимости группы из субъектов с НЧ потерями слуха [5]

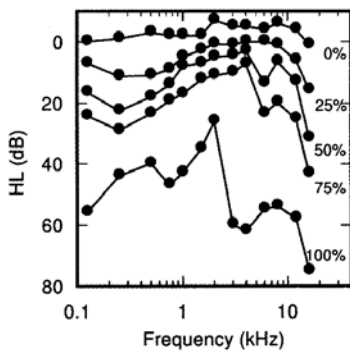


Рис. 6. Статистическое исследование порогов слышимости группы из субъектов с ВЧ потерями слуха [5]

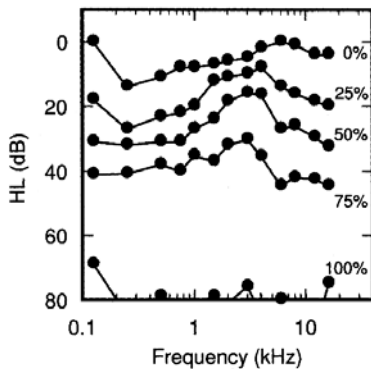


Рис. 7. Статистическое исследование порогов слышимости группы из субъектов с глубокими потерями различной конфигурации [5]

**Аудиологический нуль статистический и индивидуальный, потери слуха**

На рис. 3 в отличие от рис. 1 и 2 отметки 0 дБ на аудиограмме, так называемый “аудиологический нуль” соответствует среднему порогу восприятия каждого тона для достаточно большого количества отолитически здоровых людей разного пола в возрасте от 18 до 30 лет. Эти значения нуля отражены в международных стандартах ISO и соответственно контролируются приборами “искусственное ухо”, которые имитируют акустический импеданс ушной полости. Разница между нулевым и пороговым уровнями в дБ на заданной частоте представляет потерю слуха на этой частоте.

Предложенная в работе [1] формула для параметра нормы среднего уха позволяет получить частотную характеристику абсолютного аудиологического нуля. Эта формула имеет вид:

$$A = \frac{V(f_p)}{V(226)} \frac{1}{\sqrt{1 + V_{б.пол}/V(226)}} = 1, \tag{1}$$

где  $V(226)$ ,  $V(f_p)$ - эквивалентные объемы среднего уха на частоте зондового сигнала 226 и резонансной частотой  $f_p \approx 1000$  Гц для мужского и  $f_p \approx 600$  Гц для женского и детского уха [6], измеряемые с помощью многочастотного тимпанометра;  $V_{б.пол} \approx 1 \text{ см}^3$  у взрослых и  $V_{б.пол} \approx 0,5 \text{ см}^3$  у новорожденных. В [7] впервые было получено выражение для частотной зависимости коэффициента усиления звукового давления от барабанной перепонки к овальному окну внутреннего уха через слуховые косточки:

$$K_{ус} = \frac{1}{|Z_a|} \sqrt{\frac{Z_{ж} \cdot R_a}{S_{ов.о}}}, \tag{2}$$

где  $|Z_a| = \frac{\rho \cdot c_0^2}{\omega \cdot V(f)}$ ,  $R_a = \frac{\rho c_0^2}{\omega_p \cdot V(f_p)}$  – модуль и активная составляющая комплексного акустического импеданса уха;  $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$ ,  $c_0 = 3,4 \cdot 10^2 \text{ м/с}$  - плотность воздуха и скорость звука в нем;

$z_{ж} = 1,5 \cdot 10^6 \frac{\text{Па} \cdot \text{с}}{\text{м}}$  - удельный импеданс жидкости в улитке;  $S_{б.п.}$ ,  $S_{ов.о}$  - площади барабанной перепонки и овального окна; для уха человека  $S_{б.п.}/S_{ов.о} = 20,1$  ( $S_{ов.о} = 3,2 \text{ мм}^2$  у мужчин и  $S_{ов.о} = 6,5 \text{ мм}^2$  у женщин).

Выражение для частотной характеристики аудиологического нуля имеет вид:

$$K = \frac{K_{yc}(f)}{K_{yc}(f_p)} = \frac{f \cdot V(f)}{f_p \cdot V(f_p)_H}, \quad 20lgK_p = 20lg1 = 0, \quad (3)$$

где для уха в норме  $V(f) = V(226)$  при  $f < 226$ ,

а  $\frac{V(f)}{V(f_p)_H} = 0,66$  для женского,

и  $\frac{V(f)}{V(f_p)_H} = 0,67$  для мужского уха. (4)

Для частоты  $f = 100$  Гц (нижний предел уха на рис. 1 и 3):

$$20lgK(100) = 20lg(0,67 \cdot \frac{100}{700}) = 20,8 \text{ дБ}. \quad (5)$$

Это значение совпадает со значением на

нулевой пороговой аудиограмме рис. 1. Отсюда следует важный вывод, что частотная аудиограмма внутреннего уха от частоты не зависит.

В случае, если имеются потери в среднем ухе, на что указывает неравенство  $A \neq 0$  выражение для частотной зависимости потерь имеет вид:

$$20lg \frac{K}{K_H} = 20lg 1,52 \cdot \frac{V(f)}{V(f_p)}. \quad (6)$$

На рис. 8 приведены тимпанограммы правого и левого женского уха. Для правого уха  $V(226) = 0,79$ ,  $f_p = 1000$  Гц,  $V(f_p) = 1,2 \text{ см}^3$ :

$$A = \frac{V(f_p)}{V(226)} \frac{1}{\sqrt{1+1/V(226)}} = \frac{1,2}{0,79} \frac{1}{\sqrt{1+1/0,79}} = 1. \quad (7)$$

Потери в среднем ухе отсутствуют.

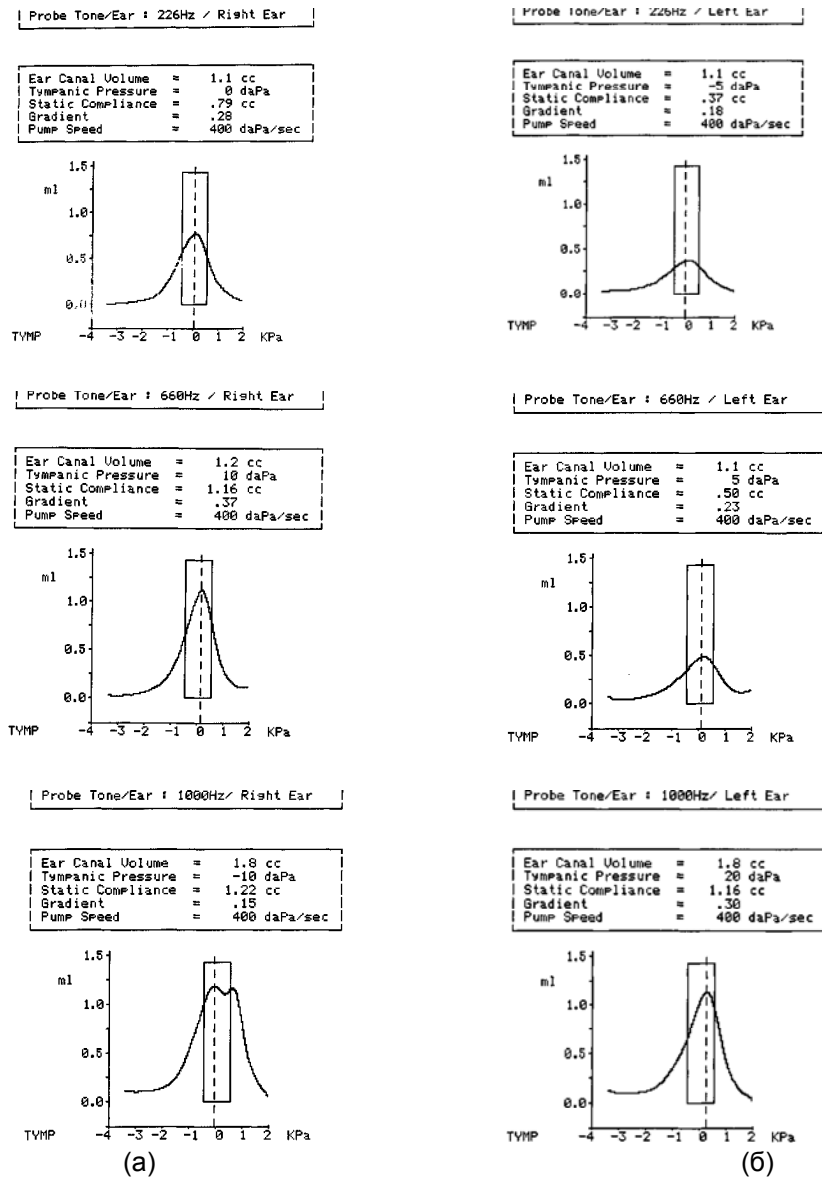


Рис. 8. Тимпанограммы правого (а) и левого (б) женского уха, полученные на частотах 226 Гц, 660 Гц, 1000 Гц

Для левого уха  $V(226)=0,37$ ,  $f_p \approx 1000$  Гц,  
 $V(f_p)=1,2$  см<sup>3</sup>:

$$A = \frac{1,2}{0,37} \frac{1}{\sqrt{1+1/0,37}} = 1,68. \quad (8)$$

Потери в среднем ухе на частоте 226 Гц равны:

$$20 \lg 1,52 \cdot \frac{V(226)}{V(1000)} = 20 \lg (1,52 \cdot \frac{0,37}{1,2}) = -6,58 \text{ дБ.}$$

### Выводы

- Наименьший порог слуха одинаков в речевом диапазоне частот от 1 кГц до 4 кГц, где субъектов с нормальным слухом (критерий  $\pm 10$  дБ) было всего 13,1 %.
- Частотная зависимость коэффициента усиления слуховыми косточками в норме является кривой "аудиологического нуля", независимого от телефона и не требующего статистического определения порога слышимости у людей с нормальным слухом в возрасте от 18 до 30 лет.
- При субъективной аудиометрии потерь слуха точность  $\pm 10$  дБ. При объективной же в случае, когда одно ухо в норме ( $A=1$ ), второе – нет ( $A=1,68$ ) потеря слуха 6,58 дБ меньше 10 дБ указывает на дефект уха, при котором резонансная частота и величина максимума такие же как и здорового, а площадь барабанной перепонки уменьшена в 1,45 раза.

– Главным преимуществом объективной аудиометрии на основе индивидуальной частотной зависимости порога слышимости является то, что она сводит возможность врачебной ошибки практически к нулю.

### Литература

1. *Найда С. А.* Формула среднего уха людини в нормі. Відбивання звуку від барабанної перетинки / С. А. Найда // Акустичний вісник.-2002.-№ 3.-С.46-51.
2. *Найда С. А.* Отоакустическая эмиссия – импульсная функция уха, ключ к оптимальному кодированию звука в улитковом имплантате / С. А. Найда // Доклады Академии наук Украины. -2005. -№5. –С.172-178.
3. Акустика: Справ./ Под ред. М. А.Сапожкова. - М.: Радио и связь, 1989. - 336с.
4. *Вахитов Я. Ш.* Теоретические основы элетроакустики и электроакустическая аппаратура / Вахитов Я. Ш. - М.: Искусство, 1982. - 415с.
5. *Jaroszewski A., Rogowski P., Rakowski A.* Resting hearing thresholds in children aged 7-10 years// Archives of acoustics. –2001. –V.26, №3. - P.175-182.
6. *Найда С. А.* Об акустических резонансах речевого и слухового трактов и их корреляции / С. А. Найда // Электроника и связь. –2002. - № 16. -С.56-58.
7. *Найда С. А.* Частотные характеристики коэффициента усиления звукового давления слуховыми косточками и акустического рефлекса / С. А. Найда // Электроника и связь.-2003.-№ 19.-С.11-16.

УДК 534.134

## Про статистичну і індивідуальну частотну залежності порога чутності

**Н.В.Богданова**, канд.техн. наук, **О.О.Зубченко**, **С.А. Найда**, д-р техн. наук, **К.М. Скирдов**

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут",  
 пр.Перемоги, 37, Київ-56, 03056, Україна.

В роботі проведено порівняння статистичних індивідуальних і групових частотних залежностей порога чутності на основі еквівалентної схеми середнього вуха. Це дало можливість диференціювати порушення слуху і запропонувати метод об'єктивної аудиометрії на основі індивідуальної частотної залежності порога чутності, який значно підвищує достовірність діагностики слуху людини. Бібл.7, рис.8.

**Ключові слова:** поріг чутності, еквівалентна схема середнього вуха, формула для параметра норми середнього вуха.

UDC 534.134

## About statistical and individual frequency dependence of a threshold of audibility

**N.V.Bogdanova**, PhD., **O.A.Zubchenko**, **S.A.Nayda**, Dr.Sc., **K.N. Skirdov**

National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute",  
pr. Peremogy, 37, Kyiv-56, 03056, Ukraine.

**In work comparison of statistical individual and group frequency dependences of a threshold of audibility on the basis of the equivalent scheme of a middle ear is carried out. It gave the chance to differentiate a hearing disorder and to offer a method of an objective audiometry on the basis of individual frequency dependence of a threshold of audibility which considerably increases reliability of diagnostics of hearing of the person. Reference 7, figures 8.**

**Keywords:** *the audibility threshold, the equivalent scheme of a middle ear, formula for the parameter of norm of a middle ear.*

### References

1. Nayda S. A. (2002), "Formula of a middle ear of the person. Sound reflection from an eardrum". Acoustic messenger. Vol. 3. pp. 46-51. (Ukr)
2. Nayda S. A. (2005), "Otoakustichesky issue – pulse function of an ear, a key to optimum coding of a sound in cochlear implant". Reports of Academy of Sciences of Ukraine. Vol. 5. pp.172-178. (Rus)
3. (1982), "Acoustics: Handbook". Pod red. M.A.Sapozhkov. Moscov. Radio and communication. P. 336. (Rus)
4. Vakhitov Ya. Sh. (1982), "Theoretical bases electro-acoustics and electro-acoustic equipment". Highway. Moscov: Art. P. 415. (Rus)
5. Jaroszewski A., Rogowski P., Rakowski A. (2001), "Resting hearing thresholds in children aged 7-10 years". Archives of acoustics. Vol.26, no 3. pp.175-182. (Eng)
6. Nayda S. A. (2002), "About acoustic resonances of speech and acoustical paths and their correlation". Electronics and Communication. no 16. pp.56-58. (Rus)
7. Nayda S. A. (2003), "Frequency characteristics of coefficient of strengthening of sound pressure acoustical stones and acoustic reflex". Electronics and Communication. no 19. pp.11-16. (Rus)

*Поступила в редакцию 26 апреля 2013 г*