АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXX 1984 Вып. 5

УДК 616.28–008.1–073.7

СООТНОШЕНИЕ ПОРОГОВ СЛЫШИМОСТИ ЧЕЛОВЕКА ПРИ ВОЗДУШНОМ И КОСТНОМ ПРОВЕДЕНИИ ЗВУКОВ В РАСШИРЕННОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

Беднин Ф. В., Сагалович Б. М.

Рассматривается вопрос о соотношении порогов слышимости при воздушном и костном проведении звуковых стимулов в диапазоне частот от 0,25 до 18 кГц. Установлено, что на частоте 13 кГц пороги слышимости при воздушном и костном звукопроведении сравниваются.

Одной из сложных задач современной физиологической акустики и биофизики слуха является исследование порогов слышимости на различных частотах. Исследование это может проводиться как при воздушном, так и при костном проведении тестирующих сигналов. В первом случае речь идет о распространении звуковой волны через наружное и среднее ухо и, следовательно, о преобразовании ее, прежде чем она достигнет чувствительных элементов внутреннего уха. Во втором случае звуковая волна распространяется непосредственно через кости черепа и мягкие ткани головы. Механизм слуха при костном проведении звуков разработан довольно подробно [1—3 и др.], однако до сих пор полной ясности в этом вопросе не существует. В оценке особенностей слуха у человека первостепенное значение имеет соотношение порогов слышимости при воздушном и костном проведении звуков. Именно на этом соотношении строится заключение о нормальном слухе и различных формах его нарушений. В последние годы в этом отношении все более необходимым представляется измерение порогов слышимости во всем диапазоне частот, воспринимаемых ухом человека, т. е. до 18—20 кГц. Вместе с тем установление соотношения порогов при костном и воздушном проведении звуков представляет значительные трудности.

Слуховая чувствительность при воздушном проведении измеряется с помощью электродинамических телефонов, а при костном проведении — с помощью электромагнитных вибраторов. В таких условиях сравнение порогов по напряжению, подаваемому на каждый из телефонов, как это делалось раньше [4—6 и др.], оказывается неправомерным, поскольку его величина зависит как от нагрузки на телефоны, так и от их конструкции.

Важным условием проведения сравнения порогов поэтому следует считать использование одного и того же звукоизлучателя как при воздушном, так и при костном проведении звуков. Исследование [7] показало, что при соблюдении этого условия можно установить частотную зависимость соотношения порогов слышимости при костном и воздушном проведении звуков по отношению соответствующих электрических напряжений на звукоизлучателе. В частности, оказалось, что до 7 кГц пороги при костном проведении звуков превышают пороги при воздушном проведении. На более высоких частотах соотношение меняется в пользу порогов при костном проведении. Однако проведение исследований в такой форме также не дает точного ответа на вопрос, ибо акустическая нагрузка на излучатель при воздушном и костном проведении различна и результаты во многом определяются свойствами излучателя. Они тем ближе к истине, чем выше механический импеданс излучателя.

Объективное сопоставление порогов слышимости требует выражения их в одинаковых физических единицах с последующим расчетом их соотношения на различных частотах. Остановимся более подробно на этом вопросе.

Известно, что пороги слышимости при воздушном проведении звуков обычно измеряются в единицах звукового давления, а пороги слышимости при костном проведении — в единицах смещения, скорости, ускорения и силы.

Поскольку звуковое давление представляет собой силу, развиваемую рабочей поверхностью излучателя, отнесенную к единице площади, частотный характер изменения порогов слышимости при их выражении в единицах силы или давления будет одинаков. Из других единиц выражения порогов слышимости (смещение, скорость, ускорение) следует остановиться на рассмотрении ускорения, поскольку, с одной стороны, смещение, скорость и ускорение колебательного процесса связаны между собой простым выражением $a=\omega v=\omega^2\xi$, где ξ, v и a — смещение, скорость и ускорение колебательного процесса, ω — круговая частота, и потому пороги слышимости, выраженные в этих единицах, легко поддаются взаимному пересчету, а, с другой стороны, среди упомянутых единиц ускорение имеет на данной частоте наибольшую величину, что является определяющим с точки зрения технической обеспеченности замеров порогов слышимости.

Таким образом, ясно, что из всего разнообразия используемых при пороговых измерениях единиц следует выбирать между звуковым давлением или колебательным ускорением. Обоснуем отдаваемое нами предпочтение колебательному ускорению.

В этом нам помогают исследования порогов слышимости, проведенные с использованием одного и того же излучателя с большим внутренним импедансом [7].

В соответствии с эквивалентной схемой работы такого излучателя [8] при подаче на него электрического напряжения величины ускорения $a_н$ и давления $p_н$, развиваемые рабочей поверхностью излучателя при работе на нагрузку $z_н$, могут быть представлены в виде

$$a_н=F\omega/(z_{из}+z_н),$$
$$p_н=Fz_н/(z_{из}+z_н)S, \qquad (1)$$

где F — знакопеременная сила, возникающая при подаче на излучатель электрического напряжения, $z_{из}$, $z_н$ — импедансы излучателя и нагрузки соответственно, S — площадь рабочей поверхности излучателя, $\omega=2\pi f$ — круговая частота.

Для случая $z_{из}\gg z_н$ выражение (1) можно представить в виде

$$a_н=F\omega/z_{из}; \quad p_н=Fz_н/Sz_{из}. \qquad (2)$$

Если при работе излучателя в воздухе и на теле человека выполняется условие $z_{из}\gg z_н$, то отношение пороговых значений ускорения при воздушном и костном проведении звуков будет однозначно соответствовать отношению подаваемых в этом случае на излучатель электрических напряжений.

Если же рассматривать отношение пороговых значений звукового давления, то оказывается, что оно будет отличаться в $z_к/z_в$ раз (где $z_к$ и $z_в$ — импедансы костей черепа человека и воздуха соответственно) от отношения пороговых значений ускорения, а значит, и от отношения подаваемых в этих случаях на излучатель электрических напряжений. Величина $z_к/z_в$ в диапазоне частот от 0,25 до 15 кГц ($z_к$ и $z_в$ можно найти в работах [9, 10] соответственно) попадает в область значений от 130 до 2400.

Как уже было сказано, оценка отношения пороговых напряжений при таких условиях работы показала, что, начиная с определенной частоты, они становятся сравнимыми. Из установленного факта близости порогов слышимости при воздушном и костном проведении звуков, оцениваемого в работе [7] по соотношению электрических напряжений на звукоизлучателе с большим внутренним импедансом, можно сделать важный вывод о том, что внутреннее ухо человека реагирует не на звуковое давление (или силу), а на колебательное смещение (скорость или ускорение). Именно по этой причине и следует при оценке соотношения порогов слышимости выражать их в единицах ускорения.

Таблица 1

Эквивалентные пороги слышимости при костном проведении звуков (дБ) относительно 1 м/с². Данные [9]

Частота, кГц	0,125	0,25	0,5	1,0	2,0	4,0	6,0
$a_{пор}$	−34,0	−30,0	−26,5	−33,5	−25,5	−31,0	−32,5

Частота, кГц	8,0	10,0	12,0	16,0	18,0
$a_{пор}$	−31,5	−27,0	−26,0	−21,0	−19,0

Таблица 2

Различие порогов слышимости при костном и воздушном проведении звуков (дБ)

Частота, кГц	0,125	0,25	0,5	1,0	2,0	4,0	6,0
$\Delta_{пор}=a_в-a_к$	9,5	28,0	39,0	30,5	30,5	18,5	14,5

Частота, кГц	8,0	10,0	12,0	16,0	18,0
$\Delta_{пор}=a_в-a_к$	7,0	5,5	4,5	−13,0	−38,0

Таблица 3

Эквивалентные пороги слышимости при воздушном проведении звуков (дБ) относительно 1 м/с². Данные [14]

Частота, кГц	0,125	0,25	0,5	1,0	2,0	4,0	6,0	8,0
$a_{пор}$	−43,0	−58,0	−65,5	−64,0	−56,0	−49,5	−47,0	−43,0

Таблица 4

Эквивалентные пороги слышимости при воздушном проведении звуков (дБ) относительно 1 м/с². Данные [15]

Частота, кГц	8,0	10,0	12,0	16,0	18,0
$a_{пор}$	−38,5	−32,5	−30,5	−9,0	+19,0

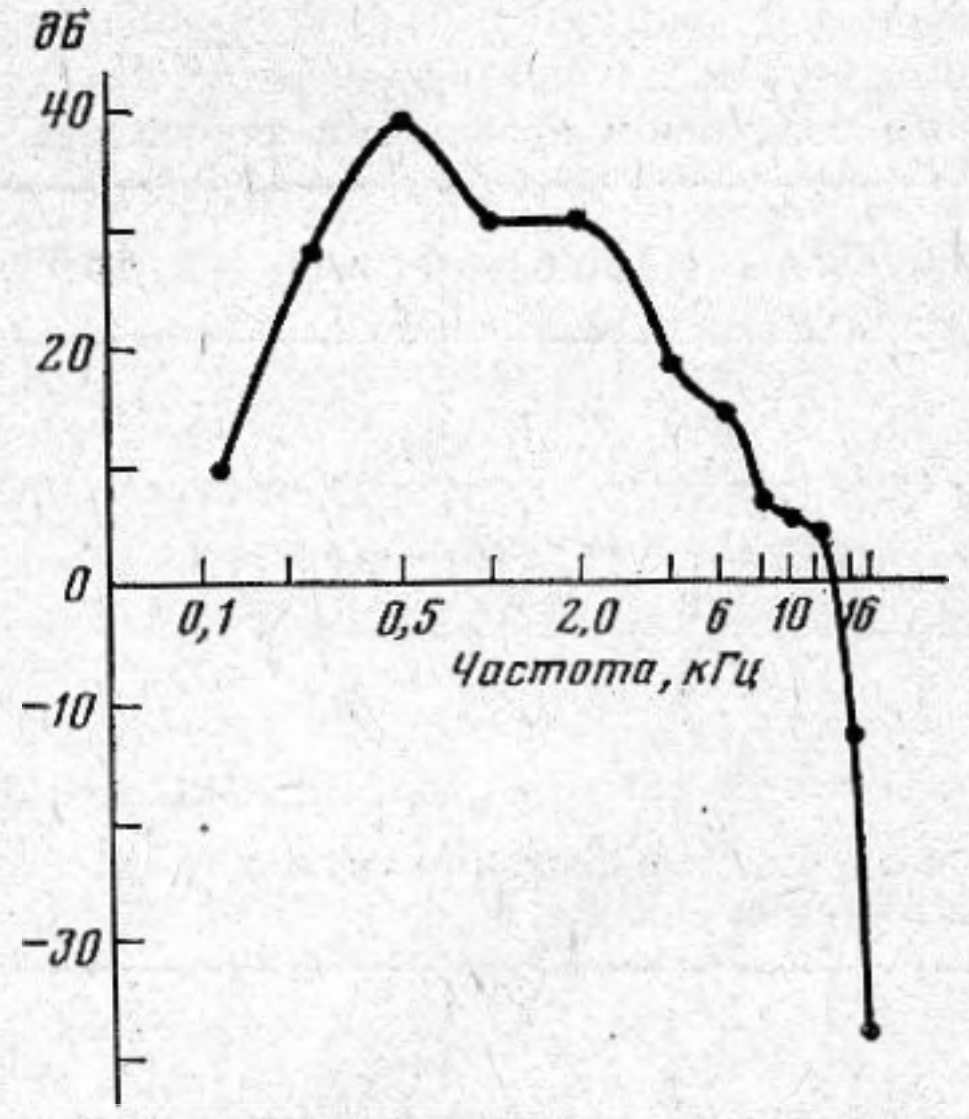
Выражение порогов при воздушном и костном звукопроведении в единицах ускорения при известных величинах порогового электрического напряжения на воздушном и костном телефонах возможно лишь при условии наличия работающих в соответствующем диапазоне частот специальных отградуированных приборов, имитирующих акустический импеданс наружного уха человека (так называемый прибор «Искусственное ухо») в первом случае, и механический импеданс головы человека (прибор «Искусственный мастоид»), во втором случае.

Диапазон известных приборов «Искусственный мастоид» ограничен частотами 6—8 кГц. Это относится как к «Искусственному мастоиду» фирмы «Брюль и Къер», используемому в странах Европы, так и к «Искусственному мастоиду» фирмы «Белтон» (США), используемому преимущественно в странах Америки и в Японии.

В этих условиях прежде всего было необходимо создать прибор «Искусственный мастоид», работающий в широком диапазоне частот, что было сделано авторами после осуществления измерений механического импеданса головы (заушная область и лоб) человека в диапазоне от 0,125 до 18 кГц [9]. Наличие широкодиапазонного прибора «Искусственный мастоид» [11] и соответствующего костного телефона [12] позволило про-

вести измерения эквивалентных порогов слышимости при костном проведении звуков [13] в диапазоне частот от 0,25 до 18 кГц (табл. 1). Последнее дало возможность провести сопоставление слуховой чувствительности человека к воздушно и костнопроводимым звукам в диапазоне частот от 0,125 до 18 кГц (табл. 2).

При расчете соотношения в качестве порогов воздушного звукопроведения на частотах до 6 кГц были использованы пороги по стандарту МЭК [14] (табл. 3), а на частотах от 8 до 18 кГц использовались данные из работы [15] (табл. 4), которые в качестве стандарта на этих частотах рекомендуются в [16]. Указанные пороги были выражены в единицах звукового давления (в дБ относительно уровня $2 \cdot 10^{-5}$ Па) и переводились в эквивалентные им значения в единицах ускорения по формуле



$$a_{\text{пор. в}}(\text{дБ}) = -130{,}5 + p_{\text{пор. в}}(\text{дБ}) + 20 \lg f, \qquad (3)$$

где $a_{\text{пор. в}}$ и $p_{\text{пор. в}}$ — значения эквивалентного порога слышимости при воздушном проведении в дБ относительно уровня 1 м/с^2 и в дБ относительно уровня $2 \cdot 10^{-5}$ Па соответственно, f — частота в Гц.

Формула (3) была получена логарифмированием очевидного выражения $a_{\text{пор. в}} = \omega \cdot p_{\text{пор. в}} / \rho_{\text{в}} c_{\text{в}}$, где $\rho_{\text{в}} c_{\text{в}}$ — удельное волновое сопротивление воздуха, равное 430 кг/м^{2}с, $p_{\text{пор. в}}$ — значение эквивалентного порога слышимости при воздушном проведении в Па.

Для наглядности соотношение порогов слышимости при воздушном и костном проведении звуков показано на фигуре.

Сопоставление порогов слышимости при воздушном и костном проведении звука позволяет установить, что пороги при костном проведении превышают пороги при воздушном проведении звуков в частотном диапазоне до 13 кГц. На частоте 0,125 кГц это превышение составляет всего 9 дБ. Затем, поскольку имеет место уменьшение воздушных порогов, а пороги слышимости через кости черепа не претерпевают значительных изменений, различие порогов нарастает, достигая максимума (39 дБ) на частоте 0,5 кГц. В дальнейшем различие порогов слышимости при том и другом видах звукового проведения начинает уменьшаться вследствие прогрессивного увеличения воздушных порогов слышимости, и на частоте 13 кГц величины порогов оказались одинаковыми. Последующее нарастание частоты характеризуется превалированием порогов слышимости при воздушном проведении над порогами при костном проведении звуков, достигающем на частоте 18 кГц 38 дБ.

Такая частотная зависимость соотношения порогов слышимости может найти объяснение в том, что звукопроводящая система среднего уха способствует наилучшему прохождению звуковых сигналов в частотном диапазоне от 0,5 до 4 кГц. Сигналы более высоких частот не усиливаются механизмом среднего уха. Наоборот, проведение их ухудшается. В то же время чувствительность к костнопроводимым звукам нарастает в диапазоне частот от 2 до 8 кГц, что связано с резонансными свойствами костей черепа. Таким образом, полученные данные свидетельствуют о явной зависимости соотношения слуховых порогов при костном и воздушном проведении звуков от частоты. Это говорит против существующего и довольно распространенного представления о большей величине порогов слышимости при костном проведении по сравнению с порогами при воздушном проведении звуков во всем диапазоне частот слышимых звуков [4, 6 и др.].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Knudsen Y. O. and Jones I. H.* Bone conduction.– Arch. Otolaryng., 1931, v. 13, p. 489–498.
2. *Bekesy G.* Experiment in Hearing. McGraw-Hill Book Company, N. Y., Toronto–L., 1960.
3. *Hood J. D.* Bone conduction: A review of present position with especial reference to the contrbution of dr. Georg von Bekesy.–J. Acoustic. Soc. Amer., 1962, v. 34, p. 1325–1332.
4. *Ayres E. W. and Morton J. Y.* The subjective calibration of bone conduction receivers for hearing aid.– Acustica, 1951, v. 1, p. 109–112.
5. *Feldman A. S.* Problems in the measurement of bone conduction.– J. Speech and Hearing Disorders, 1961, v. 26, p. 39–41.
6. *Аккерман Ю.* Биофизика. М.: Мир, 1964.
7. *Сагалович Б. М., Мелкумова Г. Г.* Соотношение порогов слышимости при воздушном и костном проведении звуков у людей в норме.– Вестн. оториноларингол., 1967, № 2, с. 78–83.
8. *Дрейзен И. Г.* Электроакустика и звуковое вещание. М.: Связь, 1961.
9. *Беднин Ф. В., Сагалович Б. М., Водолазский Л. А., Голиков В. А.* Механический импеданс тканей заушной области (мастоида) человека.– Биофизика, 1975, т. 20, № 2, с. 298–303.
10. *Иофе В. К., Ямпольский А. А.* Расчетные графики и таблицы в электроакустике. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1954.
11. *Сагалович Б. М., Беднин Ф. В.* Прибор «Искусственный мастоид» для калибровки костных телефонов в расширенном диапазоне частот.– Мед. техника, 1981, № 1, с. 28–31.
12. *Беднин Ф. В., Горшков В. Г., Сагалович Б. М., Стамов-Витковский А. В.* Костный телефон для исследования остроты слуха и слухопротезирования. А. с. № 449713.– Опубл. в БИ, 1974, № 42.
13. *Беднин Ф. В., Сагалович Б. М.* Эквивалентные пороги слышимости при костном проведении звуков, замеренные с помощью прибора «Искусственный мастоид» в расширенном диапазоне частот.– Акуст. журн., 1975, т. 21, № 5, с. 673–678.
14. ISO, Recomendation R389. Standard reference zero for the calibration of pure-tone audiometers. Geneva, 1964,
15. *Zislis T., Fletcher J.* Relation of high frequensy thresholds to age and sex.– J. Auditory Research, 1966, v. 6, p. 189–198.
16. *Northern J., Downs M., Rudmose W., Glorig A., Fletcher J.* Recomended high-frequency audiometric threshold levels (8000–18000 Hz)–J. Acoustic. Soc. Amer., 1972, v. 52, № 2, p. 585–595.

Московский научно-исследовательский институт уха, горла и носа

Поступила в редакцию 15.III.1983