

11. Abdalov A.V., Grishakov V.G., Loginov I.V. A model for allocating resources from multiple sources when reconfiguring an IT infrastructure. *Informatsionnye sistemy i tehnologii*, 2019, no. 2 (112), pp. 5–16. (In Russ.)
12. Lecture 6: Application Architecture. INTUIT: IT Project Management: Enterprise Architecture. URL: https://intuit.ru/studies/mini_mba/20750/courses/152/lecture/4232?page=3 (accessed: 14.01.2021).
13. FIFO (First In First Out). National Library. N.E. Bauman. URL: [https://ru.bmstu.wiki/FIFO_\(First_In_First_Out\)](https://ru.bmstu.wiki/FIFO_(First_In_First_Out)) (accessed: 11.02.2021).
14. LIFO. Wikipedia – the free encyclopedia. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/LIFO> (accessed: 14.01.2021).
15. Disciplines of queuing service. Faculty of Automation and Computer Science. Novosibirsk. URL: http://ermak.cs.nstu.ru/~mos/index_7.htm (accessed: 14.01.2021).
16. The program is an alternative to the method of analysis of hierarchies: certificate of state registration of the program on a computer No. 2008611382 Russian Federation. A.V. Abdalov et al.; declared 03.07.2008; publ. 10.10.2008.

Received 14.01.2021

УДК 621.39

МОДЕЛЬ РЕАКЦИИ БАЗИЛЯРНОЙ МЕМБРАНЫ ВНУТРЕННЕГО УХА ЧЕЛОВЕКА НА ТОНАЛЬНЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Жиляков Е.Г.¹, Белов С.П.², Белов А.С.², Прохоренко Е.И.¹

¹ *Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, РФ*

² *Белгородский университет кооперации экономики и права, Белгород, РФ*

E-mail: belov@bsu.edu.ru

Слуховая система человека играет ведущую роль в его жизнедеятельности и прежде всего в процессах информационного обмена на основе звуковых сигналов, особенно устной речи. В связи с этим во многих странах проводятся исследования особенностей восприятия звуков человеком на основе создания различного вида моделей. Это необходимо для совершенствования слуховых аппаратов, разработки систем автоматического распознавания устной речи в системах искусственного интеллекта, оптимизации технологий обработки речевых сигналов при хранении и передаче речевых сообщений. В рамках данной работы получены соотношения, позволяющие воспроизвести результаты эмпирических исследований, в том числе психоакустических, реакций слуховой системы человека на тональные воздействия.

Ключевые слова: *восприятие звуков, математическая модель реакции базилярной мембраны на тональные воздействия*

Введение

Процессы восприятия звука человеком достаточно интенсивно исследуются с различных позиций, среди которых прежде всего следует отметить физиологию слуха, включая медицинские аспекты [1]. Еще одно направление связано с разработкой и использованием компьютерных технологий воспроизведения звуков, например с помощью музыкальных инструментов или электронных средств [2]. Другое важное направление связано с созданием компьютерных технологий обработки записей устной речи и музыкальных записей, включая различные манипуляции с целью улучшения их звучания и сжатия данных при хранении и передаче. Особое значение приобре-

тает разработка технологий автоматического распознавания устной речи, что относится к области искусственного интеллекта.

Представляется верным предположение о том, что в процессе обучения речевому информационному обмену каким-то образом в мозгу человека формируются коды, отражающие словные типы акустических воздействий на слуховую системы. Ясно, однако, что эти коды формируются при фиксировании реакций гидромеханических процессов во внутреннем ухе. Поэтому разработка модели распространения волн во внутреннем ухе актуальна и с позиций описания процессов обучения восприятию слов.

Легко понять, что так или иначе возникает необходимость прогнозирования реакции слуховой

системы человека на создаваемые акустические воздействия. Восприятие звуков, особенно элементов устной речи или музыкальных образов, тесно сопряжено с мозговой деятельностью (интеллектуальная часть слуховой системы человека). Поэтому область исследования возникающих эффектов принято именовать психоакустикой [2–4], и ее развитию посвящено много работ. Следует отметить, что психоакустические исследования, как правило, имеют качественный характер сравнений с некоторыми опорными ситуациями. Такими, например, являются результаты исследований восприятий высоты или громкости тональных воздействий [4; 5], а также так называемых критических полос слуха. Качественный характер результатов психоакустических исследований до определенной степени затрудняет осуществление количественного прогноза реакции слуховой системы на акустические воздействия, в том числе сформированные специально.

Вместе с тем не вызывает сомнений целесообразность создания математических основ для количественного прогнозирования таких реакций, особенно в целях диагностики слуховой системы, включая оценку индивидуальных свойств исследуемого. Кроме того, это может служить основой моделирования восприятия звуков, особенно при распознавании устной речи.

Ясно, что адекватное количественное моделирование возможно только для физических систем, реакции которых при одних и тех же условиях в том или ином смысле идентичны. В случае слуховой системы человека такими элементами являются гидромеханическая часть уха человека и прежде всего так называемое внутреннее ухо. Как известно [1; 3; 4; 6], с точки зрения восприятия звуков основным элементом внутреннего уха является так называемая базилярная мембрана (БМ), погруженная в несжимаемую жидкость, в которой и распространяются бегущие волны. Отметим, что бегущие волны были зафиксированы Бекеша по движениям составляющих БМ тонких ленточек при тональных входных воздействиях. Число этих ленточек составляет порядка 3500 [4]. Именно размах их колебаний принимается за реакцию БМ в некоторой точке на воздействие определенной частоты и именуется амплитудно-частотной характеристикой [3]. В свою очередь, совокупность этих максимумов вдоль БМ при воздействии тонального сигнала определенной частоты естественно именовать координатно-частотной характеристикой.

Представляется, что именно наличие математических зависимостей, описывающих эти ха-

рактеристики, может позволить на основе фиксирования психоакустических эффектов решать обратные задачи исследований физиологии слуха конкретного испытуемого либо определять условия достижения качественного звучания преобразованных акустических воздействий. Кроме того, появляется возможность моделирования процессов распознавания устной речи человеком, например объяснение эффектов распознавания слов при их произнесении дикторами с разными манерами, например тембрами голосов, частотами основного тона и т. п. Возможно, что имеются некоторые групповые операции для реакций участков БМ, которые с позиций интеллектуальной части слуховой системы воспринимаются как симметрии. Исследование этих аспектов функционирования слуховой системы представляет несомненный интерес.

В настоящее время в результате экспериментальных исследований накоплено достаточно много эмпирических данных, характеризующих свойства слуховых систем не только человека, но и некоторых животных (морских свинок, мартышек). Вместе с тем, кроме некоторых частных результатов аппроксимации эмпирических данных, например построения мел-шкалы или кривых равной громкости, не существует математических зависимостей, которые позволяют воспроизвести эмпирически установленные проявления реакции БМ на тональные воздействия, в том числе психоакустические эффекты.

В данной работе предпринята попытка построения такой модели на основе достаточно общих физических принципов.

Основные факты эмпирических исследований слуховой системы с помощью тональных воздействий

Во многих источниках [1–12] отмечаются следующие проявления реакций слуховых систем на тональные воздействия различных частот.

1. Пространственные проявления. При тональных воздействиях во внутреннем ухе распространяются бегущие волны нарастающей до некоторой координаты (расстояния от овального окна) амплитуды, после которой они быстро затухают, причем чем выше частота воздействия, тем меньшее расстояние проходит волна. Фазовые скорости волн монотонно уменьшаются с увеличением расстояний от овального окна. Огибающие бегущих волн естественно именовать координатно-частотной характеристикой (КЧХ) БМ.

2. Амплитудно-частотные проявления. Диапазон частот воспринимаемых тональных воздействий удовлетворяет неравенству

$$20 \leq f < 20000 \text{ Гц.} \quad (1)$$

Амплитуда колебательной реакции в некоторой точке БМ на тональные воздействия различной частоты (амплитудно-частотная характеристика – АЧХ элемента БМ) нарастает с ростом частоты воздействия до некоторой характерной для этой точки величины, а затем достаточно быстро спадает. Соответствующую максимуму амплитуды реакции частоту воздействия представляется естественным называть резонансной частотой.

Скорость нарастания АЧХ вблизи максимума гораздо меньше, чем скорость спада.

3. Психоакустические эффекты. Воспринимаемая (оцениваемая) человеком высота синусоидального воздействия является нелинейной функцией его частоты. Увеличение интенсивности воздействий приводит к уменьшению воспринимаемой высоты низкочастотных воздействий и увеличению высоты высокочастотных (выше 5000 Гц);

Наблюдается свойство группировки слуховых ощущений, что принято отмечать как наличие критических полос слуха, когда два воздействия воспринимаются как одно, если разность их частот не превосходит определенных величин (ширина критической полосы).

Целью дальнейшего исследования является построение математических соотношений, позволяющих в количественном виде воспроизвести некоторые экспериментально установленные свойства АЧХ элементов БМ и КЧХ на основе задания только доступных для измерения параметров тональных воздействий (частоты и интенсивности). Представляется естественным именовать такую модель феноменологической. При этом в основе построения используются следующие эмпирические данные о геометрических характеристиках БМ.

В развернутом состоянии БМ представляет собой трапециевидную фигуру длиной порядка

$$L = 35 \text{ мм.} \quad (2)$$

и нарастающей от овального окна шириной

$$0,1 \leq s \leq 0,5 \text{ мм.} \quad (3)$$

Некоторые элементы математического моделирования распространяющихся вдоль БМ волн

Важной задачей является установление связи между частотами резонансов и координатами БМ, где возникают максимумы возбуждаемых бегущих волн. Она достаточно подробно исследована в работе [7], где на основе прозрачных физических соображений получено искомое соотношение

$$l_m(z) = L - l_{nah} \ln(z / z_0), \quad (4)$$

где $l_m(z)$ – отсчитанная от овального окна координата максимума волны, которой соответствует резонансная частота z поперечных колебаний элемента БМ

$$z_0 = 50 \text{ Гц.} \quad (5)$$

Параметр l_{nah} можно трактовать как координату первого от овального окна максимума (наивысшая резонансная частота). В [7] на основе эмпирических данных получена следующая оценка:

$$l_{nah} = 4,84. \quad (6)$$

Очевидно, что соотношение (4) можно обратить в зависимость резонансной частоты от координаты элемента БМ, где должен возникать максимум бегущей волны

$$z(l) = z_0 \exp((L - l) / l_{nah}). \quad (7)$$

В свою очередь, в работе [8] показано, что зависимость ширины БМ от координаты описывается соотношением

$$s(l) = s_{\max} \exp((l - L) / 4l_{nah}), \quad (8)$$

которому соответствуют следующие значения максимальной и минимальной ширины БМ:

$$s_{\max} = 0,55; \quad s_{\min} = 0,09. \quad (9)$$

Отметим, что они несколько отличаются от указанных в (5) значений, которые являются результатами измерений, и вполне могут варьироваться.

Комбинирование (7) и (8) позволяет получить следующее соотношение между ширинами БМ и резонансными частотами:

$$z(l_1) / z(l_2) = (s(l_2) / s(l_1))^4. \quad (10)$$

Таким образом, частоты резонансов обратно пропорциональны четвертым степеням ширины БМ в соответствующей координате.

Основные общие аспекты математического моделирования АЧХ элементов БМ и ее КЧХ

Рассмотрим теперь задачу построения математической модели амплитудно-частотной характеристики некоторой координаты БМ. Предполагаем, что резонансные поперечные колебания в этой точке описываются соотношением

$$y(t) = b \sin(2\pi z t), \quad (11)$$

где z – резонансная частота, в Гц; t – текущее время. В свою очередь, пусть тональные воздействия описываются соотношением

$$x(t) = a \sin(2\pi f t + \varphi), \quad (12)$$

где φ – некоторая фаза. Для АЧХ введем обозначение $H(z, f, w)$, имея в виду также зависимость

от характеристики интенсивности воздействия w . Способ определения этой характеристики будет уточнен позже.

Представляет интерес определение достаточно общих свойств модели АЧХ.

1. Легко понять, что величина отклонения ленточек БМ зависит от величины кинетической энергии возмущающих сил в сравнении с кинетической энергией, необходимой для создания колебаний с максимальной амплитудой. Кинетические энергии этих движений пропорциональны квадратам первых производных функций (11) и (12), которые определяют скорости колебаний. Поэтому представляется обоснованным считать, что искомая АЧХ зависит от отношения

$$x = wf / z, \quad (13)$$

где

$$w = b / a. \quad (14)$$

2. Пусть теперь воздействие $g(t)$ имеет трансформанту Фурье $G(\omega)$. Тогда на основе предположения о линейности фильтрации получаем, что энергия отклика в рассматриваемой точке БМ определяется соотношением

$$\|v(z)\|^2 = c \int_{-\infty}^{\infty} G^2(f) H^2(z, f, w) df, \quad (15)$$

где c – некоторый положительный коэффициент. При финитной области распределения спектральной плотности воздействия

$$f \in (-F, F), \quad (16)$$

вне которой она равна нулю, а внутри постоянна и равна

$$D = \|g\|^2 / 2F, \quad (17)$$

соотношение (14) дает представление для затрат энергии на создание выходного колебания

$$\|v(z)\|^2 = cD \int_{-F}^F H^2(z, f, w) df. \quad (18)$$

Видится естественным представление о том, что в этих условиях для всех точек БМ затраты энергии на создание выходного колебания должны быть одинаковыми. Иными словами, для всех резонансных точек БМ должно выполняться равенство

$$\forall z: \int_{-F}^F H^2(z, f, w) df = \text{const}. \quad (19)$$

Ясно, что правая часть здесь зависит в том числе от энергии воздействия.

3. Эмпирические данные свидетельствуют о том, что одно и то же тональное воздействие возбуждает много точек БМ, которые характеризуются соответствующими резонансными частотами.

Представляется справедливой гипотеза о том, что при определении высоты звучания этого воздействия интеллектуальная часть слуховой системы ориентируется на усредненное с весом $H^2(z, f, w)$ значение резонансных частот. Иными словами, с помощью соотношения

$$V(f, w) = d \int_0^{\infty} z H^2(z, f, w) dz, \quad (20)$$

где d – положительный нормирующий коэффициент, можно воспроизвести зависимость воспринимаемой высоты тонального воздействия от соответствующей частоты.

Это предположение назовем психоакустической гипотезой.

4. После подстановки (7) в выражение для АЧХ должна получаться модель огибающей бегущей волны, которая возникает при тональном воздействии соответствующей частоты. Иными словами, в соответствии с (13) КЧХ БМ является функцией отношения

$$u = wf / z_0 \exp((l - L) / l_{nah}). \quad (21)$$

Отметим, что получаемая модель КЧХ должна адекватно соответствовать приведенным в литературе графикам эмпирических КЧХ. В частности, в [6] отмечается, что тональное воздействие с частотой 200 Гц вызывает максимум бегущей волны примерно на расстоянии

$$l(200) = 28,5 \text{ мм}. \quad (22)$$

Модель АЧХ / КЧХ

Ввиду сложностей учета множества особенностей внутреннего уха дать физическое обоснование математическому описанию распространяющихся вдоль БМ в перилимфе волн не представляется возможным. Об этом свидетельствуют приведенные в различных источниках, например в [6], примеры. В этих условиях естественно использовать эвристическое описание, которое позволяет воспроизвести установленные экспериментально важные свойства слуховой системы. Такие модели принято именовать феноменологическими.

В рамках данной работы для квадрата АЧХ предлагается следующая модель:

$$H^2(z, f, w) = H^2(x, w) = wcx^2 \exp(-(cx^2(1-x^2))^2) / z, \quad (23)$$

где c – коэффициент, конкретное значение которого

$$c = \ln(10) = 2,3026, \quad (24)$$

удовлетворяет условию

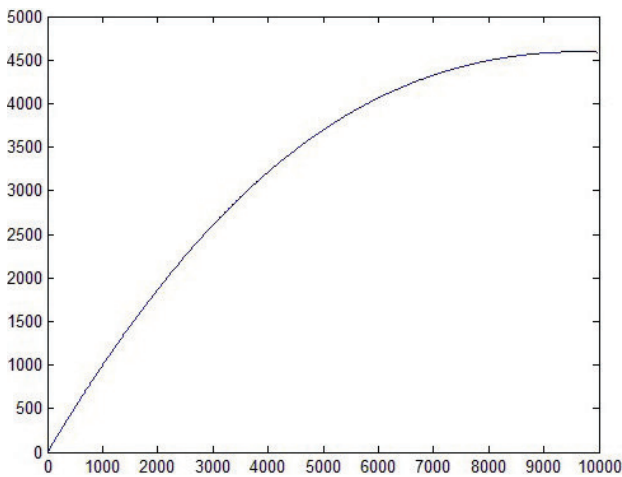


Рисунок 1. График зависимости нормированной высоты восприятия тональных воздействий, частота которых отложена по оси абсцисс

$$\int_0^{z_{\max}} w c x^2 \exp(-(c x^2 (1 - x^2))^2) dz / z = 1, \quad (25)$$

когда

$$w = 1; \quad Z_{\max} = 16000 \text{ Гц}; \quad 50 \leq f \leq 16000 \text{ Гц}. \quad (26)$$

Отметим, что это свойство отвечает требованию (19), и в соответствии с определением (13) $w / z = dx / df$.

На рисунке 1 приведен вычисленный согласно (20) график зависимости высоты воспринимаемых тональных воздействий. График нормирован, так что воздействию тысячи герц соответствует воспринимаемая высота в тысячу мел.

Отметим, что график на рисунке 1 хорошо совпадает с приведенной в работе [5] аппроксимацией эмпирических данных, которая также, как и здесь, получена при одинаковой интенсивности воздействий. Таким образом, сформулированная в пункте 4 раздела 5 гипотеза подтверждается.

Осуществляя в (23) замену переменных в соответствии с (7) и (21), получаем соотношение для квадрата КЧР (огигающей бегущих волн):

$$P^2(f, l, w) = P^2(u, w) = w c u^2 \exp(-(c u^2 (1 - u^2))^2) \times \exp((l - L) / l_{nah}) / z_0. \quad (27)$$

На рисунке 2 приведен график КЧХ для тонального воздействия частотой 200 Гц. Важно отметить соответствие требованию (22) и качественное соответствие графикам аппроксимаций огигающих, приведенных в работах [3; 6].

Заключение

В рамках данной работы получен ряд математических соотношений, позволяющих воспроиз-

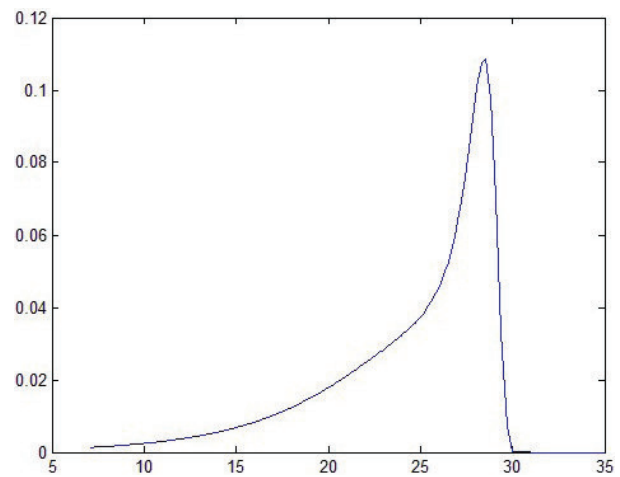


Рисунок 2. График КЧХ при тональном воздействии частотой 200 Гц, по оси абсцисс – расстояние от овального окна

вести результаты эмпирических исследований реакции слуховой системы человека на тональные воздействия, включая такие психоакустические эффекты, как восприятие высоты воздействий. Важно отметить, что, используя соотношение вида (27), можно вычислить импульсные характеристики фильтров, которые описывают реакции элементов БМ во времени:

$$p(t, l) = \int_0^{\infty} P(f, l) \cos(2\pi f t) df / \pi. \quad (28)$$

Эти фильтры предлагается именовать психоакустическими.

Совокупность последовательных реакций психоакустических фильтров на некоторое воздействие, определяемая звуками произносимого слова, представляет собой код этого слова, который формируется в процессе обучения человека речевому обмену. Следовательно, для любых слов можно такие коды зафиксировать на основе специального обучения и затем использовать, например, в процедурах распознавания ключевых слов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-07-00215.

Литература

1. Альтман Я.А. Слуховая система. Л.: Наука, 1990. 620 с.
2. Алдошина И. Основы психоакустики. Часть 1 // Звукорежиссер. 1999. № 6. С. 1–14.
3. Молчанов А.П., Бабкина Л.Н. Электрические модели улитки органа слуха. Л.: Наука, 1978. 181 с.
4. Цвикер Э., Фельдкеллер Р. Ухо как приемник информации / пер. с нем. под ред. Б.Г. Белкина. М.: Связь, 1971. 255 с.

5. Stevens S.S., Volkman J., Newman E.B. A scale for the measurement of the psychological magnitude pitch // The Journal of the Acoustical Society of America. 1936. Vol. 8, no. 3. DOI: <https://doi.org/10.1121/1.1915893>
6. Шредер М.Р. Модели слуха // Proceedings of the IEEE. 1975. Vol. 63, no. 9. P. 1332–1350.
7. Модель взаимосвязи координат максимумов огибающих бегущих вдоль базилярной мембраны волн с частотами их возбуждения / Е.Г. Жиляков [и др.] // Информационные системы и технологии. 2020. № 4. С. 5–10.
8. О скорости распространения возмущений вдоль базилярной мембраны слуховой системы человека / Е.Г. Жиляков [и др.] // Информационные технологии. 2020. Т. 18, № 2. С. 188–194.
9. Гельфанд С.А. Слух: введение в психол. и физиол. акустику / пер. с англ. О.К. Федоровой, О.П. Токарева. М.: Медицина, 1984. 350 с.
10. Алдошина И. Основы психоакустики. Слух и речь. Часть 1 // Звукорежиссер. 2002. № 1. С. 38–44.
11. Алдошина И. Основы психоакустики. Слух и речь. Часть 2 // Звукорежиссер. 2002. № 3. С. 54–58.
12. Алдошина И. Основы психоакустики. Слух и речь. Часть 3 // Звукорежиссер. 2002. № 4. С. 38–44.

Получено 31.03.2021

Жиляков Евгений Георгиевич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой информационно-телекоммуникационных систем и технологий (ИТСТ) Белгородского государственного национального исследовательского университета (БелГНИУ). 308015, Российская Федерация, г. Белгород, ул. Победы, 85. Тел. +7 472 230-13-92. E-mail: zhilyakov@bsu.edu.ru

Белов Сергей Павлович, д.т.н., профессор, профессор кафедры организации и технологии защиты информации (ОТЗИ) Белгородского университета кооперации экономики и права (БелУКЭП). 308023, Российская Федерация, г. Белгород, ул. Садовая, 116а. Тел. +7 980 323-61-04. E-mail: belovssergei@gmail.com

Белов Александр Сергеевич, к.т.н., доцент кафедры ОТЗИ БелУКЭП. 308023, Российская Федерация, г. Белгород, ул. Садовая, 116а. Тел. +7 472 226-38-31. E-mail: belov_as@bsu.edu.ru

Прохоренко Екатерина Ивановна, к.т.н., доцент кафедры ИТСТ БелГНИУ. 308015, Российская Федерация, г. Белгород, ул. Победы, 85. Тел. +7 472 230-13-92. E-mail: prokhorenko@bsu.edu.ru

A MODEL OF THE RESPONSE OF THE BASILARY MEMBRANE OF THE HUMAN'S INNER EAR TO TONE ACOUSTIC IMPACT

Zhilyakov E.G.¹, Belov S.P.², Belov A.S.², Prokhorenko E.I.¹

¹ *Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation*

² *Belgorod University of Cooperation of Economics and Law, Belgorod, Russian Federation*

E-mail: belov@bsu.edu.ru

The human auditory system plays a leading role in his life and primarily in the processes of information exchange based on sound signals, especially oral speech. In this regard, in many countries, studies of the features of the perception of sounds by a person are carried out on the basis of the creation of various types of models. This is necessary to improve hearing aids, develop systems for automatic speech recognition in artificial intelligence systems, optimize speech signal processing technologies for storing and transmitting speech messages. Within the framework of this work, relationships have been obtained that make it possible to reproduce the results of empirical studies, including psychoacoustic, reactions of the human auditory system to tonal influences.

Keywords: *perception of sounds, mathematical model of the reaction of the basilar membrane to tonal influences*

DOI: 10.18469/ikt.2021.19.2.02

Zhilyakov Evgeny Georgievich, Belgorod State National Research University, 85, Pobedy Street, Belgorod, 308015, Russian Federation; Head of Information and Telecommunication Systems and Technologies Department, Doctor of Technical Sciences. Tel. +7 472 230-13-92. E-mail: zhilyakov@bsu.edu.ru

Belov Sergey Pavlovich, Belgorod University of Cooperation of Economics and Law, 116a, Sadovaya Street, Belgorod, 308023, Russian Federation; Professor of Organization and Technology of Information Protection Department, Doctor of Technical Sciences. Tel. +7 980 323-61-04. Email: belovssergei@gmail.com

Belov Alexander Sergeevich, Belgorod University of Cooperation of Economics and Law, 116a, Sadovaya Street, Belgorod, 308023, Russian Federation; Associate Professor of Organization and Technology of Information Protection Department, PhD in Technical Science. Tel. +7 472 226-38-31. E-mail: belov_as@bsu.edu.ru

Prokhorenko Ekaterina Ivanovna, Belgorod State National Research University, 85, Pobedy Street, Belgorod, 308015, Russian Federation; Associate Professor of Information and Telecommunication Systems and Technologies Department, PhD in Technical Science. Tel. +7 472 230-13-92. E-mail: prokhorenko@bsu.edu.ru

References

1. Al'tman Ya.A. *Auditory System*. Leningrad: Nauka, 1990, 620 p. (In Russ.)
2. Aldoshina I. Fundamentals of psychoacoustics. Part 1. *Zvukorezhisser*, 1999, no. 6, pp. 1–14. (In Russ.)
3. Molchanov A.P., Babkina L.N. *Electric Models of the Cochlea of the Organ of Hearing*. Leningrad: Nauka, 1978, 181 p. (In Russ.)
4. Tsviker E., Fel'dkeller R. *The Ear as a Receiver of Information*. German Trans. ed. by B.G. Belkin. Moscow: Svjaz', 1971, 255 p. (In Russ.)
5. Stevens S.S., Volkman J., Newman E.B. A scale for the measurement of the psychological magnitude pitch. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1936, vol. 8, no. 3. DOI: <https://doi.org/10.1121/1.1915893>
6. Schreder M.R. Hearing models. *Proceedings of the IEEE*, 1975, vol. 63, no. 9, pp. 1332–1350.
7. Zhiljakov E.G. et al. Model of the relationship between the coordinates of the maxima of the envelopes of waves traveling along the basilar membrane with the frequencies of their excitation. *Informatsionnye sistemy i tehnologii*, 2020, no. 4, pp. 5–10. (In Russ.)
8. Zhiljakov E.G. et al. On the rate of propagation of disturbances along the basilar membrane of the human auditory system. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2020, vol. 18, no. 2, pp. 188–194. (In Russ.)
9. Gel'fand S.A. *Hearing: An Introduction to Psychol. and Fiziol. Acoustics*. English Trans. O.K. Fedorova, O.P. Tokarev. Moscow: Meditsina, 1984, 350 p. (In Russ.)
10. Aldoshina I. Fundamentals of psychoacoustics. Hearing and speech. Part 1. *Zvukorezhisser*, 2002, no. 1, pp. 38–44. (In Russ.)
11. Aldoshina I. Fundamentals of psychoacoustics. Hearing and speech. Part 2. *Zvukorezhisser*, 2002, no. 3, pp. 54–58. (In Russ.)
12. Aldoshina I. Fundamentals of psychoacoustics. Hearing and speech. Part 3. *Zvukorezhisser*, 2002, no. 4, pp. 38–44. (In Russ.)

Received 31.03.2021