

Биомедицинские приборы и системы

УДК 534.75

В.С. Дидковский, д-р. техн. наук, **С.А. Лулева**, канд. физ.-мат. наук, **С.С. Калинин**

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,
ул. Политехническая, 16, корпус 12, г. Киев, 03056, Украина.

Передающая функция улитки внутреннего уха человека. Часть 1

Представлены результаты начального этапа исследования акустической передаточной характеристики вестибулярного канала улитки внутреннего уха человека. Упрощенная расчетная модель выбрана в виде узкой трубки с жесткими стенками, заполненной идеальной жидкостью. Рассчитанные частотные характеристики улитки свидетельствуют о том, что высокочастотные составляющие слышимого человеком звука затухают в пределах вестибулярного канала, не достигая геликотремы. Библ. 8, рис. 7.

Ключевые слова: внутреннее ухо, улитка, частотная характеристика, жесткостенные трубки, электроакустические аналогии.

Введение

За долгую историю развития физиологии и акустики слуха попытки построения математических моделей различных отделов слуховой системы человека предпринимались неоднократно [2 – 4, 6, 7]. Целью этих научных поисков было, как правило, объяснение природы процессов в слуховой системе и выработка рекомендаций относительно методик лечения и коррекции патологий. Касательно моделирования систем внутреннего уха, в работах [4, 6, 7] содержатся обширные обзоры публикаций разных лет, среди которых можно выделить экспериментальные исследования [1] и математические модели, базирующиеся на экспериментальных данных [2, 3, 7].

В рассмотренных публикациях есть ряд недостаточно проработанных вопросов, а именно: акустические свойства каналов улитки и их влияние на процессы слухового восприятия, в том числе на эффект отоакустической эмиссии. В частности, частотная избирательность, спектральные параметры и пути распространения сигналов отоакустической эмиссии во внутреннем ухе, а также роль круглого окна в физиологических слуховых процессах.

Следует отметить работы Дж. Фланагана [7] и Х. Фастла [2], демонстрирующих удобство применения метода электроакустических аналогий. Однако каждая из работ оставляет открытыми ряд вопросов. В частности, ни первая, ни

вторая модели не позволяют изучить акустические свойства канала улитки отдельно от всех остальных её структур и выделить роль его акустических свойств в функционировании слуха.

В целях лучшего понимания и усовершенствования существующих моделей улитки и дальнейшего разрешения неопределённостей, которые в них заложены, авторы считают целесообразным построение новой модели улитки внутреннего уха, отражающей акустические свойства канала. При этом в качестве входа системы принимается овальное окно, а выхода – круглое окно, а не базилярная мембрана.

Данная статья описывает первый этап моделирования – построение и расчет модели вестибулярного канала улитки, не учитывающей наличие базилярной мембраны и органа Корти. Модель состоит из жесткостенных трубок, заполненных несжимаемой жидкостью. Разработанная авторами методика, примененная для решения поставленной задачи, описана в [8].

Описание объекта моделирования

Улитка внутреннего уха человека представляет собой завитый в 2,5 витка полый костный канал общей длиной 35 мм [7]. Для упрощения анализа улитку в большинстве случаев рассматривают развернутой и вытянутой (рис.1), по сути, состоящей из двух каналов, которые носят названия преддверной и барабанной лестницы.

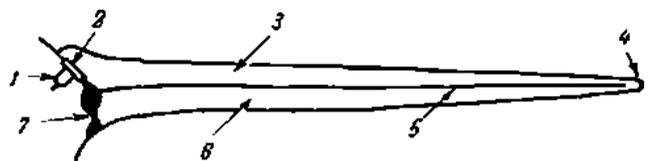


Рис. 1. Упрощенная схема развернутой улитки [7]: 1 – стремечко, 2 – овальное окно, 3 – преддверная лестница, 4 – геликотрема, 5 – перегородка улитки, 6 – барабанная лестница, 7 – круглое окно.

Площадь поперечного сечения канала у стремечка составляет приблизительно 4 мм^2 и

уменьшается примерно до 1 мм² у противоположного тонкого конца (геликотремы). Круглое окно закрыто упругой мембраной и имеет площадь около 2 мм² [6].

Моделирование вестибулярного канала

Вестибулярный канал (ВК) (преддверная лестница) улитки представляется в виде упрощённой физической модели – трубки постоянного круглого сечения площадью 4 мм², длина трубки 35 мм. Трубка заполнена жидкостью с параметрами воды $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$, $c = 1500 \text{ м/с}$, стенки трубки абсолютно жёсткие. На одном конце трубки создаются звуковые колебания с помощью безмассового поршня, имитирующего подножную пластинку стремечка. Другой конец трубки наглухо закрыт. Выходным сигналом полагается звуковое давление в жидкости в области закрытого конца трубки.

Применение метода электроакустических аналогий для исследования частотных свойств описанной модели вполне обосновано, поскольку условие распространения плоской волны в трубе [5] с диаметром, соответствующим размерам улитки, выполняется во всём слуховом диапазоне частот:

$$d < 0,61 \cdot \lambda. \tag{1}$$

Расчетная модель, согласно ранее описанному методу [8], представляется электроакустической схемой замещения в виде Т-образного звена, представленного на рис. 2. Сопротивления z и z_m рассчитываются в соответствии с низкочастотной асимптотикой формул для мо -

дели трубки с произвольной акустической нагрузкой [8]:

$$z = i\omega \frac{\rho l}{2S}; \tag{2}$$

$$z_m = \frac{1}{i\omega \left(\frac{Sl}{\rho c^2} \right)}. \tag{3}$$

где l – длина трубы, S – площадь поперечного сечения, ω – круговая частота воздействия.

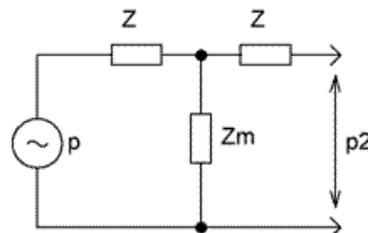


Рис. 2. Электроакустическая схема замещения модели вестибулярного канала

Используя закон Ома для электрической цепи, получаем выражение нормированной амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) модели вестибулярного канала (ВК):

$$\frac{p_2}{p_1} = \left| 1 - \frac{2z}{z + z_m} + \frac{z}{z_m} - \frac{z^2}{z_m(z + z_m)} \right|. \tag{4}$$

Результаты расчёта АЧХ по формуле (4) средствами вычислительного пакета MatLab в графическом виде представлены на рис. 3.

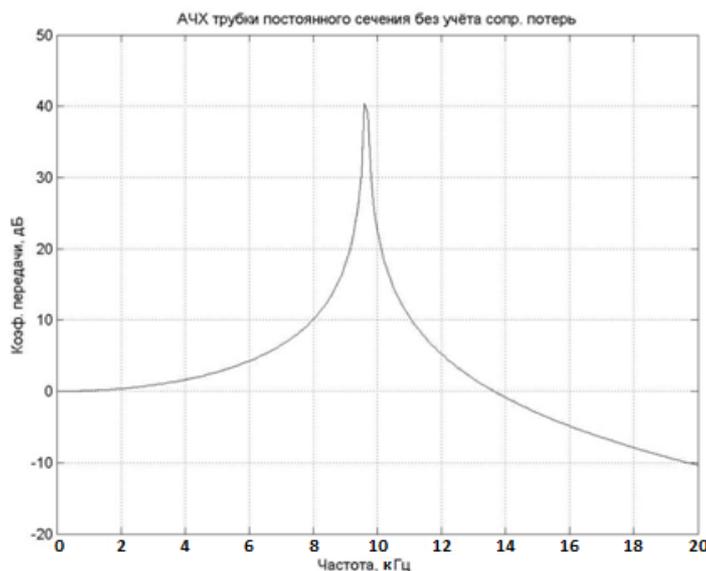


Рис. 3. График амплитудно частотной характеристики модели вестибулярного канала

Как следует из графика (рис.3), низкочастотные колебания проходят от входа трубки на её выход беспрепятственно. На частоте $f_0 = 9646$ Гц наблюдается острый резонанс, который соответствует собственной частоте закрытой трубы соответствующей длины. Такой характер резонанса вызван тем, что в расчётной модели не учтено распространение бегущей волны в улитковой перегородке, а также сопротивление механических потерь и нагрузки трубки. Выше частоты резонанса АЧХ монотонно затухает, то есть происходит «запирание» трубки. Наличие «запирания» указывает, что даже в рамках столь упрощённой модели, распространение высокочастотных колебаний из ВК в тимпанальный канал (ТК) не происходит, что хорошо согласуется с данными более ранних исследований [7]. В реальном улитковом ходе условия возникновения резонансов отсутствуют, поскольку перегородка между ВК и ТК гибкая, и в каналах распространяется бегущая волна с соответствующим переносом энергии вдоль канала. Однако этот факт вовсе не препятствует улитковому ходу служить фильтром низких частот с частотой среза, примерно равной частоте резонанса, полученной на АЧХ упрощённой жёсткостенной модели. В связи с этим, частоты резонансов, рассчитанные в рассматриваемой и всех последующих задачах, являются лишь ориентиром для нахождения частоты колебаний, выше которой трубка начинает ослаблять проходящие через неё звуковые волны.

Модель вестибулярного канала с учетом нелинейного сопротивления потерь

Сопротивление потерь учтём в виде добавочного сопротивления R , включённого последовательно с Т-образной схемой замещения (рис. 4). Величина сопротивления зависит от значения звукового давления и является отражением вязких свойств перилимфы, а также тенденции к вихреобразованию в перилимфе при высоких уровнях звукового давления, что

является одним из основных источников нелинейности в восприятии звука. Причина вихреобразования – конусообразная форма канала, которая в данной модели не учитывается.

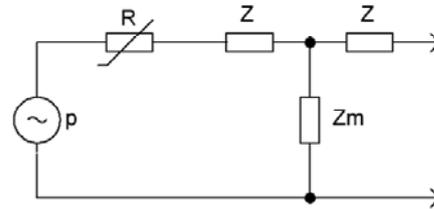


Рис. 4. Электроакустическая схема замещения модели ВК с учётом сопротивления потерь

Согласно [7], сопротивление R можно вычислить по формуле:

$$R = \frac{Pl}{S^2} \sqrt{\frac{\omega \rho \mu}{2}}, \quad (5)$$

где P – длина окружности сечения трубки, l – длина трубки, S – площадь поперечного сечения трубки, μ – коэффициент вязкости перилимфы (вдвое выше вязкости воды при нормальной температуре тела).

Амплитудно-частотная характеристика Т-образной цепи с учётом нелинейного сопротивления потерь определяется выражением:

$$\frac{p_2}{p_1} = \left| 1 - \frac{z + R + \varepsilon w^2}{z + R + \varepsilon w^2 + z_m} \right|. \quad (6)$$

Нелинейность сопротивления потерь учитывается слагаемым εw^2 , в котором объёмная скорость w определяется как действительный корень кубического уравнения следующего вида:

$$\varepsilon w^3 + (z + z_m + R) \cdot w - 1 = 0 \quad (7)$$

ε – параметр нелинейности, некое целое число.

Выражения для сопротивлений z и z_m такие же, как и в предыдущем случае.

Расчёт АЧХ с помощью пакета MatLab даёт результат, проиллюстрированный в графическом виде на рис. 5.

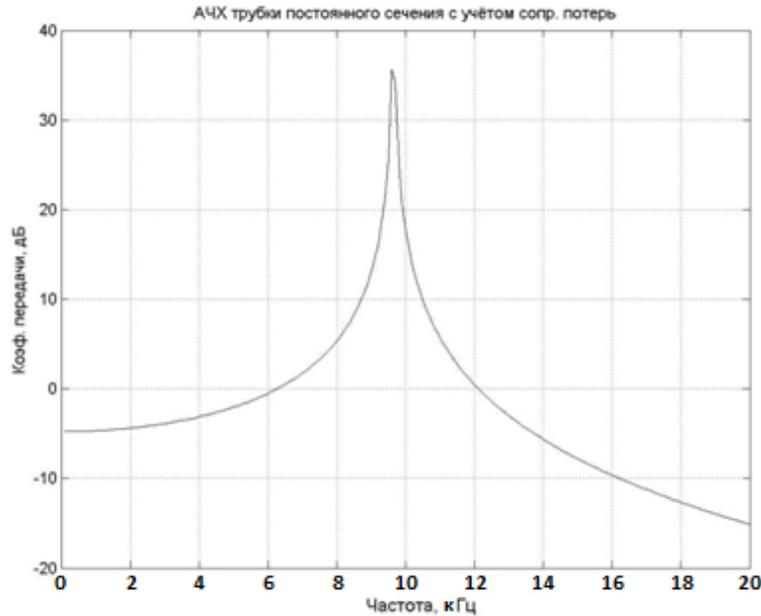


Рис. 5. График амплитудно частотной характеристики модели ВК с учётом сопротивления потерь

Из графика (рис. 5) следует, что внесение в схему модели активного сопротивления потерь несколько изменило её свойства, а именно, как и ожидалось, понизило коэффициент передачи (на 5 дБ равномерно во всём диапазоне частот). Примечательно, что изменение значения параметра нелинейности существенно не влияет на вид АЧХ.

Модель вестибулярного канала в виде конической трубки

Реальный канал улитки имеет форму, отличную от цилиндрической. Он имеет сложный профиль, который ближе всего к коническому, имеющему площадь сечения на входе равную 4 мм² и 1 мм² — на выходе. Необходимо установить, насколько существенно влияние формы канала на частотные характеристики модели, а именно, можно ли пренебрегать конусностью в рамках моделирования с принятой нами степенью приближения. При построении схемы замещения используем выражения (8), (9) и (10) для сопротивлений Т-образной схемы, полученные ранее для трубки конической формы [8] :

$$z_l = i\omega \frac{\rho l}{2S_1} \cdot \frac{2a + 1}{a^2 + a + 1}; \tag{8}$$

$$z_r = i\omega \frac{\rho l}{2aS_1} \cdot \frac{a + 2}{a^2 + a + 1}; \tag{9}$$

$$z_m = \frac{3\rho c^2}{i\omega S_1 l \cdot (a^2 + a + 1)}. \tag{10}$$

Эквивалентная электроакустическая схема конической трубки приведена на рис.6.

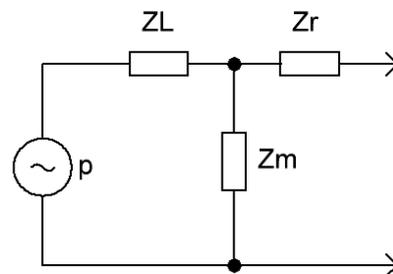


Рис. 6. Электроакустическая схема замещения модели ВК в виде конической трубки

Выражение для амплитудно-частотной характеристики модели ВК в виде конической трубки:

$$\frac{p_2}{p_1} = \left| 1 - \frac{2z_l}{z_l + z_m} + \frac{z_l}{z_m} - \frac{z_l^2}{z_m(z_l + z_m)} \right|. \tag{11}$$

Результаты расчёта АЧХ представлены на рис. 7.

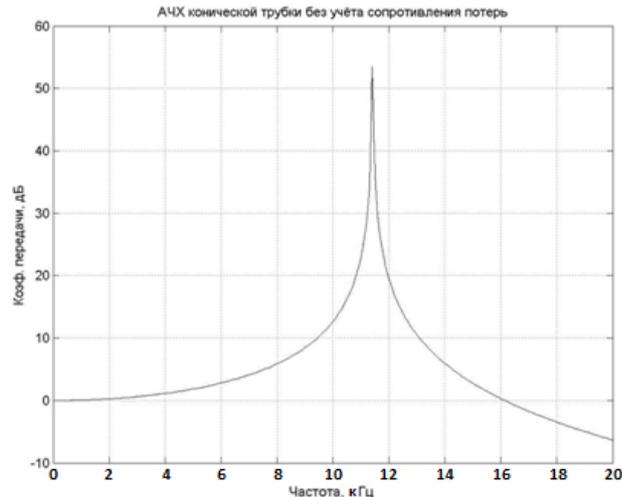


Рис. 7. График амплитудно-частотной характеристики модели ВК в виде конической трубки

Особенностью модели в виде конической трубки является более высокая частота резонанса, чем у трубки постоянного сечения, порядка 11 кГц. Форма же характеристики полностью сохраняется. Таким образом, в рамках принятой нами степени приближения, конической формой трубки можно пренебречь и выполнять расчеты для трубок постоянного сечения.

Выводы

Разработанная математическая модель внутреннего уха, представляющая каналы улитки полностью жесткостенными, ввиду значительной степени упрощения позволяет произвести только качественную оценку полученных результатов:

1. Вестибулярный канал (преддверная лестница) улитки имеет свойства фильтра низких частот, следовательно, высокочастотные колебания не проходят в тимпанальный канал (барабанную лестницу) не только из-за свойств базилярной мембраны, но и вследствие свойств самого канала.

2. Фильтрующие свойства вестибулярного канала проявляются в виде отсутствия высокочастотных выходных сигналов (звукового давления) вблизи круглого окна улитки.

3. Потери, возникающие при распространении звуковых волн в жидкости улитки в результате ее вязкости и вихреобразования, снижают коэффициент передачи каналов улитки во всём диапазоне частот примерно на 5 дБ.

Результаты данной работы могут быть использованы при дальнейшей разработке математических моделей внутреннего уха либо для усовершенствования существующих моделей.

Список использованных источников

1. *Bekesy G.* Experiments in Hearing. – McGraw-Hill Book company, 1960. – 745 p.
2. *Fastle H., Zwicker E.* Psychoacoustics. Facts and Models. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. – 462 p.
3. *Jaffer T., Kunov H., Wong W.* A model cochlear partition involving longitudinal elasticity // JASA. – 2002. – №112 (2). – P. 576 – 589.
4. *Альтман Я.А., Таварткиладзе Г.А.* Руководство по аудиологии. – М.: ДМК Пресс, 2003. – 360 с.
5. *Исакович М.А.* Общая акустика: учебное пособие. – М.: Наука, глав. ред. физ.-мат. лит., 1973. – 496 с.
6. *Слуховая система / Ред. Я. А. Альтман.* – Л.: Наука, 1990. – 620 с.
7. *Фланаган Дж.Л.* Анализ, синтез и восприятие речи/ пер. с англ. под ред. А.А.Пирогова. – М.: Связь, 1968. – 392 с.
8. *Дидковский В.С., Лунева С.А., Калинин С.С.* Метод анализа звукового поля в конических трубах // Электроника и связь, 2013.- № 6(77).-с. 38-43.

Поступила в редакцию 20 ноября 2013 г.

УДК 534.75

В.С. Дідковський, д-р. техн. наук, **С.А. Лунова**, канд. фіз.-мат. наук, **С.С. Калінін**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
вул. Політехнічна, 16, корпус 12, м. Київ, 03056, Україна.

Передатна функція завитки внутрішнього вуха людини. Частина 1

У статті наведено результати початкового етапу дослідження акустичної передатної характеристики каналу завитки внутрішнього вуха людини. Спрощена розрахункова модель вибрана у вигляді вузької трубки із жорсткими стінками, заповненої ідеальною рідиною. Розраховані частотні характеристики завитки свідчать про те, що високочастотні складові сприйнятого людиною звуку загасають у вестибулярному каналі, не досягаючи гелікотреми. Бібл. 8, рис. 7.

Ключові слова: внутрішнє вуха, завитка, частотна характеристика, жорсткостинні трубки, електроакустичні аналогії.

UDC 534.75

V.S. Didkovsky, Dr.Sc., **S.A. Luniova**, Ph.D., **S.S. Kalinin**

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute",
st. Polytechnique, 16, Kiev, 03056, Ukraine.

The human cochlea transfer function. Part 1

This paper describes the results of the initial phase of human inner ear cochlear duct acoustic transfer function study. A simplified calculation model of cochlea is represented by a narrow pipeline filled with ideal liquid. Calculated frequency response of the cochlea, allows to understand that high frequency components of the sound decay in the scala vestibuli, not reaching helicotrema. Reference 8, figures 7.

Keywords: cochlea, frequency response, electro-acoustic analogy.

References

1. *Bekesy G.* (1960), "Experiments in Hearing". McGraw-Hill Book company. P. 745.
2. *Fastle H., Zwicker E.* (2007), "Psychoacoustics. Facts and Models". Springer-Verlag Berlin Heidelberg. P. 462.
3. *Jaffer T., Kunov H., Wong W.* (2002), "A model cochlear partition involving longitudinal elasticity". JASA. no.112 (2), pp.576 – 589.
4. *Altman Ya.A., Tavartkiladze G.A.* (2003), "Audiology Handbook". Moskva, DMK Press. P. 360. (Rus)
5. *Isakovich M.A.* (1973), "General Acoustics". Moskva, Nauka. P. 496. (Rus)
6. *Altman Ya.A.* (1990), "Auditory System". Leningrad, Nauka. P. 620. (Rus)
7. *Flanagan J.L.* (1968), "Speech Analysis, Synthesis and Perception". Moskva, Svyaz. P. 392. (Rus)
8. *Didkovskiy V., Lunyova S., Kalinin S.* (2013), "Modeling of sound processes in narrow pipes via electro-acoustic analogy method". Electronics and Communications, No 6(77). Pp. 38-43. (Rus)