

УДК 534.75

В.С. Дидковский, д.-р. техн. наук, **С.А. Лунева**, 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 2

Приводятся результаты исследования акустической передающей характеристики каналов улитки внутреннего уха человека на примере упрощенной расчетной модели. Модель выбрана в виде двух жесткостенных трубок, соединенных акустическим трансформатором, и учитывает только роль полостей улитки в распространении колебательного процесса от овального до круглого окна. Установлено, что система каналов проявляет частотные свойства фильтра низких частот. Ввиду малой эффективности излучения звуковых волн круглым окном, влияние обратного канала связи на колебания барабанной перепонки практически отсутствует.
Библ. 9, рис. 5.

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

Введение

Существующие в значительном количестве публикации на тему математического моделирования акустических процессов в органах внутреннего уха человека [1-5] все еще не предоставляют исчерпывающей информации о распространении звуковых колебаний во внутреннем и среднем ухе. В частности, практически отсутствуют данные об акустических свойствах полых каналов улитки и роли их в формировании слуховых ощущений, а также влиянии на процессы отоакустической эмиссии. Ввиду этого авторами предпринята попытка анализа частотных свойств полых каналов улитки на основе упрощенных моделей, состоящих из жесткостенных трубок, без учёта наличия эластичных элементов в улитке. Для получения расчетных данных применена разработанная авторами методика, описанная в работе [6].

Первый этап исследования, результаты которого опубликованы в работе [7], заключался в создании модели вестибулярного канала (ВК) и анализе полученной амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) канала, в том числе с учетом вязкости заполняющей его жидкости.

Характерные особенности АЧХ вестибулярного канала состоят в полной пропускающей способности на низких частотах, возникновении

резонансных колебаний на частоте, совпадающей с собственной частотой канала и дальнейшем ослаблении колебаний с частотами выше резонансной, то есть, по сути, «запирании» канала. В реальном улитковом ходе условия резонансов отсутствуют в виду наличия гибкой перегородки между вестибулярным и тимпанальными каналами. Однако, этот факт не препятствует вестибулярному каналу служить фильтром низких частот с частотой среза примерно равной собственной частоте канала. Таким образом, высокочастотные звуковые колебания, фактически, не достигают геликотремы не только из-за эластичных свойств базилярной мембраны [5], но и как результат акустических свойств самого канала.

Второй этап работы, представленный в данной статье, заключается в построении модели и анализе амплитудно-частотной характеристики всего улиткового хода: от овального до круглого окна, с учетом роли геликотремы в передаче колебательного процесса из вестибулярного канала в тимпанальный.

Площадь поперечного сечения канала у стремечка составляет приблизительно 4 мм^2 и уменьшается примерно до 1 мм^2 у противоположного тонкого конца (геликотремы). Круглое окно закрыто упругой мембраной и имеет площадь около 2 мм^2 [5].

Модель каналов улитки с закрытым круглым окном

Улитка внутреннего уха человека представляет собой завитый в 2,5 витка полый костный канал общей длиной 35 мм [3-5]. Для упрощения анализа улитку в большинстве случаев рассматривают развернутой и вытянутой, состоящей, по сути, из двух каналов: вестибулярного и тимпанального, соединенных отверстием (геликотремой). Такое представление возможно для «очень» узких труб, условию которых удовлетворяют каналы улитки, поскольку распространение волн в таких трубах не зависит от конфигурации оси канала [8].

Площадь поперечного сечения вестибулярного канала уменьшается приблизительно от 4 мм^2 у стремечка до 1 мм^2 у противоположного конца (геликотремы), при этом площадь входно-

го отверстия, так называемого овального окна, затянутого мембраной, составляет примерно 3 мм^2 . Сечение тимпанального канала (ТК) аналогично изменяется в сторону увеличения и закрывается круглым окном площадью около 2 мм^2 , закрытым тонкой ненатянутой мембраной [5].

В рамках выбранной модели представим улитку в виде двух трубок постоянного сечения одинаковых размеров (аналоги вестибулярного и тимпанального каналов), длиной 35 мм каждая и площадью поперечного сечения по 4 мм^2 (рис.1). Закрытые концы трубок соединяются отверстием площадью 1 мм^2 (аналог геликотремы). Колебания создаются поршнем площадью 3 мм^2 на входе в верхнюю трубку (ВК). Выходное отверстие (аналог круглого окна) верхней трубки, моделирующей тимпанальный канал наглухо закрыт, т.е. является акустически жёсткой границей.

Электроакустическая схема замещения в этом случае будет иметь вид цепи из двух связанных Т-образных звеньев [6], разделенных акустическим трансформатором Т1 (рис.2). Трансформатор отражает изменение площадей входного овального окна и геликотремы; коэффициент трансформации составляет 3:1. Сопротивления z и z_m , согласно методике, изложенной в [6], рассчитываются по формулам, соответствующим низкочастотной асимптотике при заполнении труб идеальной жидкостью:

$$z = i\omega \frac{\rho l}{2S}; \quad (1)$$

$$z_m = \frac{1}{i\omega \left(\frac{Sl}{\rho c^2} \right)}, \quad (2)$$

где l – длина трубы, S – площадь поперечного сечения, ω – круговая частота воздействия, ρ – плотность жидкости в каналах, c – скорость звука в жидкости.

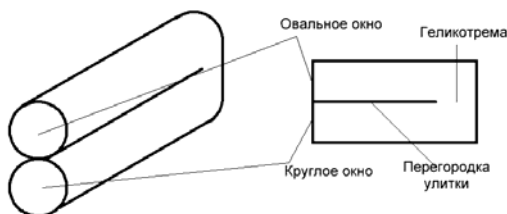


Рис. 1. Схематическое изображение модели улитки в виде соединённых трубок постоянного сечения

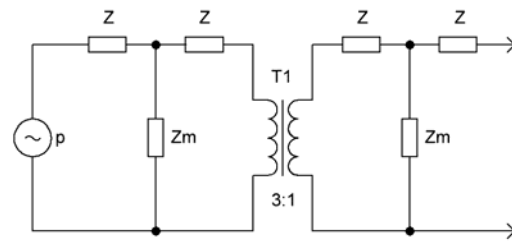


Рис. 2. Электроакустическая схема замещения модели, представленной на рис. 1

График АЧХ исследуемой модели представлен на рис. 3.

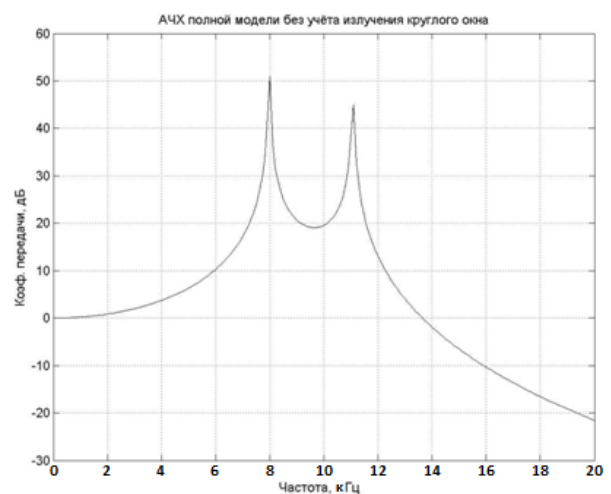


Рис. 3. Изображение АЧХ модели каналов улитки с закрытым круглым окном

Полученная АЧХ (рис. 3) полностью соответствует избранной расчётной модели, поскольку представляет собой частотную характеристику связанных колебательных контуров для случая сильной связи. На графике наблюдаются две резонансные частоты. Нижняя резонансная частота равна примерно 8 кГц , частота более высокого резонанса составляет примерно 11 кГц . Обоснуем физический смысл этих частот.

Первая собственная частота канала длиной $l = 35 \text{ мм}$ в режиме открытого выходного отверстия равна $\frac{c}{2l} = \frac{1500}{2 \cdot 35 \cdot 10^{-3}} \approx 10700 \text{ Гц}$, а за-

крытого, соответственно, – 5350 Гц [9]. Таким образом, полагаем, что более высокий по частоте резонанс соответствует резонансу колебаний в вестибулярном канале (рис. 3), а более низкий – резонансу тимпанального канала, возбуждаемого колебаниями, переданными из вес-

тибулярного канала через геликотрему. Расхождение частот резонанса, полученных применяемым методом, с частотами, рассчитанными волновым методом, объясняется взаимным влиянием контуров эквивалентной электроакустической схемы и различием сопротивлений акустических нагрузок двух трубок, чего волновой метод в данном случае не учитывает.

Поскольку в реальной улитке условия возникновения резонансов отсутствуют, частоты резонансов, полученные в ходе анализа модели, следует понимать как ориентировочные частоты среза, выше которых канал улитки начинает ослаблять распространяющиеся вдоль него звуковые волны.

Характерно, что закономерность полного пропускания системы каналов улитки на низких и «запирание» на высоких частотах, сохраняется при переходе от модели изолированного вестибулярного канала [7] к рассматриваемой модели системы каналов улитки.

Модель улитки с учётом излучения круглого окна в воздушное пространство

Постановка задачи в данном случае такая же, как и в предыдущем, за исключением того, что выходной конец трубки, моделирующей ТК, закрыт тонкой невесомой мембраной площадью 2 мм², излучающей акустические колебания в воздушное пространство в режиме плоского поршня в экране.

Электроакустическая схема замещения такой модели показана на рис. 4. Трансформатор T2 с коэффициентом трансформации 1:2 имитирует изменение площади входного (геликотремы) и выходного отверстий (круглого окна) в тимпанальном канале. Сопротивления z и z_m вычисляются по формулам (1) и (2) соответственно.

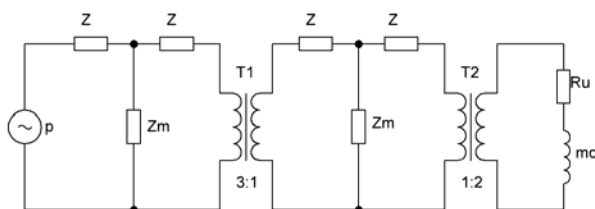


Рис. 4. Электроакустическая схема замещения модели улитки с учётом излучения круглого окна в воздух

Цепь $T_2 R_u m_c$ представляет собой модель круглого окна в виде отверстия площадью 2мм², закрытого мембраной; R_u – активная состав -

ляющая сопротивления излучения круглого окна, рассчитанная для поршня в экране; m_c – колеблющаяся масса воздуха:

$$R_u = \rho_e c_e S_3 \frac{(ka_3)^2}{2}; \tag{3}$$

$$m_c = \frac{8}{3} \rho_e \cdot a_3^3; \tag{4}$$

$\rho_e = 1,29$ кг/м³ – плотность воздуха; $c_e = 340$ м/с – скорость звука в воздухе; $S_3 = 2$ мм² – площадь круглого окна; a_3 – радиус круглого окна; $k = \omega / c_e$ – волновое число.

Выходным сопротивлением системы полагаем сопротивление излучения R_u , поскольку физически выходным звуковым давлением является давление, создаваемое на поверхности мембраны круглого окна.

График АЧХ анализируемой модели представлен на рис. 5.

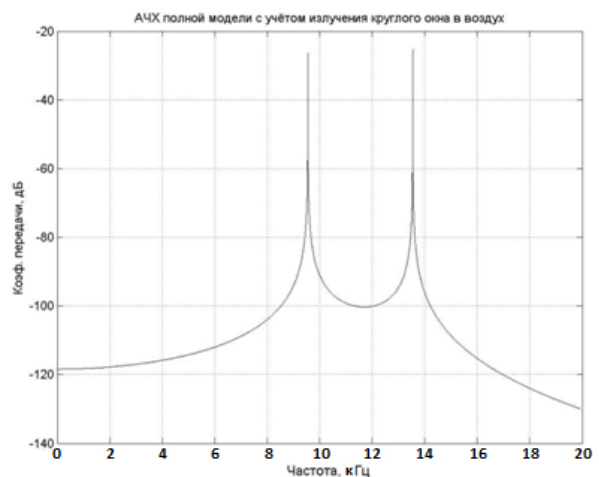


Рис. 5. Изображение АЧХ модели улитки, учитывающей излучение круглого окна в воздушное пространство

График (рис. 5), построенный с учетом излучения мембраной круглого окна в воздух, указывает на сохранение полученных ранее закономерностей. Однако, эффективность излучения настолько мала, что уровень звукового давления в барабанной полости на поверхности круглого окна почти на 120 дБ ниже уровня входного давления в улитку. Из этого следует, в частности, что сигналы отоакустической эмиссии поступают в слуховой проход через овальное окно и систему слуховых косточек, но не по воздуху барабанной полости от круглого окна, о чем высказывалось предположение в работе [3].

Выводы

Разработанная математическая модель каналов улитки не учитывает наличия эластичных элементов в каналах и позволяет лишь качественно оценить частотные свойства каналов:

1. Система каналов улитки является акустическим фильтром низких частот. Таким образом, высокочастотные составляющие слышимого звука, а также продуктов отоакустической эмиссии затухают в вестибулярном и тимпанальном каналах и не достигают круглого окна. Частота запирания, исходя из предложенной в данной статье модели находится в районе 10-14 кГц. В реальной улитке эта частота, вероятно, находится ниже ввиду наличия эластичной перегородки между каналами.

2. Круглое окно является крайне неэффективным излучателем звука, ввиду его малых волновых размеров и особенностей излучения из жидкости в воздух. В частотном диапазоне (20 Гц – 2 кГц), в котором практически имеет место полное пропускание вестибулярного и тимпанального каналов улитки, колебания, излучаемые в воздух барабанной полости круглым окном, ослабляются по амплитуде звукового давления примерно на 120 дБ. В результате, влияние излучения круглого окна на барабанную перепонку представляется крайне не существенным. Сигналы отоакустической эмиссии (изначально слабые, зачастую ниже порога слышимости) претерпевают очень сильное ослабление при излучении круглым окном. Следовательно, единственный путь прохождения сигналов отоакустической эмиссии в слуховой проход – через овальное окно и систему слуховых косточек.

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

Список использованных источников

1. *Fastle H., Zwicker E.* Psychoacoustics. Facts and Models. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. – 462 p.
2. *Jaffer T., Kunov H., Wong W.* A model cochlear partition involving longitudinal elasticity // JASA. – 2002. – №112 (2). – P. 576 – 589.
3. *Альтман Я.А., Таварткиладзе Г.А.* Руководство по аудиологии. – М.: ДМК Пресс, 2003. – 360 с.
4. *Слуховая система / Ред. Я. А. Альтман.* – Л.: Наука, 1990. – 620 с. – (Основы современной физиологии).
5. *Фланагаган Дж.Л.* Анализ, синтез и восприятие речи. Пер. с англ. Под ред. А.А.Пирогова. – М.: Связь, 1968. – 392 с.
7. *Дидковский В.С., Лунева С.А., Калинин С.С.* Метод анализа звукового поля в конических трубах с жесткими стенками // Электроника и связь, 2013.- № 6(77).-с. 38-43.
8. *Дидковский В.С., Лунева С.А., Калинин С.С.* Передаточная функция улитки внутреннего уха человека. Часть 1 // Электроника и связь, 2014.- № 4(81).-с. 50-55.
9. *Исакович М.А.* Общая акустика: учебное пособие – М.: Наука, глав. ред. физ.-мат. лит., 1973. – 496 с.
10. *Скучик Е.* Основы акустики. Т.1. Пер. с англ. Под ред. Л.М. Лямшева. – М.: Мир, 1976. – 520 с.

Поступила в редакцию 03 ноября 2014 г.

УДК 534.75

В.С. Дідковський, д.-р.техн.наук, **С.А. Луньова**, 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 2

Описано початковий етап дослідження акустичної передатної характеристики каналу завитки внутрішнього вуха людини методом електроакустичних аналогій на основі спрощеної розрахункової моделі, яка враховує лише акустичні властивості каналу. Проаналізовано частотні

властивості моделі системи каналів завитки зі входом у овальному вікні та виходом у круглому. Система каналів має властивості фільтра низьких частот. Виявлено, що кругле вікно є вкрай неефективним випромінювачем звуку, тому вплив його випромінювання на барабанну перетинку малоімовірний. Бібл. 9, рис. 5.

Ключові слова: внутрішнє вухо, завитка, частотна характеристика, жорсткостінні 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 2

This paper describes the initial phase of study of human inner ear cochlear duct acoustic transfer function via electro-acoustic analogy method. A simplified calculation model of cochlea takes into account only the linear acoustic properties of the duct. Frequency response of the cochlea, obtained at this stage of the study, allows to understand that high frequency components of the sound decay in the scala vestibuli, not reaching helicotrema. Fenestra cochleae is ineffective sounder and does not influence a tympanic membrane in any way. Reference 9, figures 5.

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

References

1. *Fastle H., Zwicker E.* (2007), "Psychoacoustics. Facts and Models". Springer-Verlag Berlin Heidelberg. P. 462.
2. *Jaffer T., Kunov H., Wong W.* (2002), "A model cochlear partition involving longitudinal elasticity". JASA. no.112 (2), pp.576 – 589.
3. *Altman Ya.A., Tavartkiladze G.A.* (2003), "Audiology Handbook". Moskva, DMK Press. P. 360. (Rus)
4. *Altman Ya.A.* (1990), "Auditory System". Leningrad, Nauka. P. 620. (Rus)
5. *Flanagan J.L.* (1968), "Speech Analysis, Synthesis and Perception". Moskva, Svyaz. P. 392. (Rus)
6. *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)
7. *Didkovskiy V., Lunyova S., Kalinin S.* (2014), "Modeling the human cochlea transfer function. Part 1". Electronics and Communications, No 4(81). Pp. 50-55. (Rus)
8. *Isakovich M.A.* (1973), "General Acoustics". Moskva, Nauka. P. 496. (Rus)
9. *Scurdzyk E.* (1976), "The Foundations of Acoustics. V.1". Moskva, Mir. P. 520. (Rus)