

Биомедицинские приборы и системы

УДК 534.23

С.А. Найда, д.-р. техн. наук, Е.Р. Кирильчик

Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”,
ул. Политехническая, 16, г. Киев-56, 03056, Украина.

Возможности многочастотной импедансометрии среднего уха человека

В работе сделан анализ метода диагностики слуха человека на основе многочастотной импедансометрии среднего уха. Поскольку при изучении вопросов физиологии уха и реконструкции звукопроводящего аппарата часто используют параметры изолированных височных костей, отдельно рассмотрен вопрос их соответствия акустическим характеристикам уха человека. В связи с актуальностью задачи скрининга слуха новорожденных проанализированы литературные экспериментальные данные по высокочастотной импедансометрии новорожденных. Библ. 12, рис. 3.

Ключевые слова: среднее ухо; тимпанометрия; акустический рефлекс; импеданс; иммитанс; адмиттанс; параметр нормы среднего уха.

Введение

В [1] возможности импедансометрии оцениваются следующим образом “Несмотря на то, что по значению акустического импеданса среднего уха или его составляющих можно в некоторых случаях заключить о присутствии патологических изменений, в большинстве случаев измерение самого по себе статического акустического импеданса дает малозначительную диагностическую информацию. Это объясняется большим межсубъектным разбросом данных, так что индивидуальные отклонения значений импеданса от некоторых усредненных значений, характерных для нормы и различных видов патологии, нередко могут перекрывать друг друга”. В [2] об импедансометрии уже говорится: “Этот метод стал уже стандартным и используется практически всеми практикующими аудиологами. Вместе с тем он продолжает развиваться. Так, недавно разработано новую разновидность импедансной аудиометрии - реактансную аудиометрию”. Суть ее состоит в записи частотной характеристики импеданса барабанной перепонки в диапазоне частот от 125 Гц до

8 ÷ 10 кГц: тональный сигнал частоты, которая автоматически меняется, подводится к микро-телефону, а звук в наружном слуховом проходе принимается миниатюрным микрофоном. Телефон с микрофоном расположены в электроакустическом зонде – таком же, как и у обычных импедансных аудиометров. Полученная кривая показывает, на каких частотах звуковая энергия проникает через барабанную перепонку в среднее ухо, а на каких она отражается от перепонки в наружный слуховой проход (НСП) – благодаря ее высокому акустическому импедансу (реактансу, от которого методика и получила свое название). Считается, что эта методика очень информативна, т.к. характеризует передаточную функцию среднего уха во всем частотном диапазоне, в отличие от тимпанометрии, в которой используется лишь одна частота зондирующего тона (обычно 226 Гц).

Следует заметить, что такая интерпретация не совсем правильная, т.к., во-первых, передаточную функцию характеризует полный импеданс, а реактивная компонента – только упругие и инерционные свойства барабанной перепонки вместе со слуховыми косточками, а во-вторых, и в тимпанометрии используются частоты 226 Гц, 660 Гц, 800 Гц или 1000 Гц.

Самый распространенный в настоящее время способ определения импеданса уха состоит в следующем.

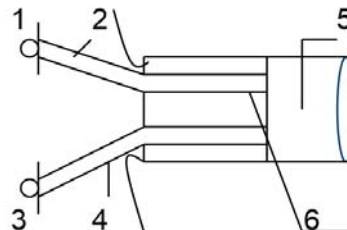


Рис.1. Акустический зонд импедансометра

В НСП вставляется зонд (рис.1), в состав которого входит: звукоизлучатель в виде миниатюрного телефона 1 со звукопроводной трубкой

2, создающий измерительный (зондовый) сигнал; микрофон – датчик 3 измерительного сигнала с зондовой трубкой 4. НСП 5 закрывается вкладышем 6, сквозь который пропущены трубки 2 и 4.

Эквивалентный объем среднего уха $V_{б.п}$ находится с помощью метода тимпанометрии. Суть его заключается в том, что в наружном слуховом проходе, герметически закрытом специальным ушным вкладышем (рис.1), создается плавное изменение статического давления воздуха от величины, большей нормального атмосферного, до величины, меньшей его. При этом непрерывно регистрируются значения эквивалентного объема среднего уха.

Физический объем барабанной полости $V_{б.пол}$ и эквивалентный объем барабанной перепонки $V_{б.п}$ связаны с соответствующими акустическими гибкостями соотношениями [3]:

$$\begin{aligned} V_{б.пол} &= \rho_0 c_0^2 S_{б.пол}^2 C_{а.б.пол}, \\ V_{б.п} &= \rho_0 c_0^2 S_{б.п}^2 C_{а.б.п} \end{aligned} \quad (1)$$

где $\rho_0 = 1,2 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха; $c_0 = 340 \text{ м/с}$ – скорость звука в нем; $V_{б.пол} \approx 1 \text{ см}^3$, $S_{б.п}$ и $S_{б.пол}$ – площадь барабанной перепонки и барабанной полости соответственно.

Более детальную информацию дают тимпанограммы для нескольких частот зондового сигнала. Так в [4] использовался сигнал с частотами 660-675 Гц, близкими к резонансной частоте механической системы среднего уха. Это дает возможность хорошо выявлять такое нарушение, как разрыв цепи слуховых косточек.

Как уже упоминалось, существует большой разброс межсубъектных значений импеданса и не существует количественного параметра нормы среднего уха. Для оценки его состояния полученную тимпанограмму сравнивают с тимпанограммами, которые характерны для разных форм патологий среднего уха (классификация по Джергеру) [5]. Эти тимпанограммы получены одночастотными (226 Гц) импедансометрами. Целью статьи является рассмотрение новых возможностей методики импедансометрии, а именно тимпанометрии, которые открываются при использовании ее многочастотного варианта с учетом формулы для параметра нормы среднего уха [6, 7].

1. О степени соответствия акустических характеристик изолированных височных костей и уха человека

Изолированные височные кости людей часто используются как модель при изучении вопросов физиологии уха и реконструкции звукопроводящего аппарата [8]. При этом многие исследователи считают, что среднее ухо в изолированных височных костях функционирует по-

добно таковому у живого человека. Считается, что определение иммитанса среднего уха в автоматическом режиме (запись тимпанограмм) позволяет сравнивать полученные данные. Получение формулы для параметра нормы среднего уха [6] дает основание усомниться в том, что процесс изоляции височной кости оставляет эти характеристики в норме. Это приобретает особую важность в связи с применением в тимпанопластике аллотрансплантата и созданием банка тканей [9, 10]. Во-первых, акустический рефлекс стременной мышцы у живого человека не сохраняется на изолированной височной кости. Кроме того, на частотной зависимости смещения стремени, получаемой на изолированной кости, всегда отсутствовал максимум, тогда как при многочастотной тимпанометрии по авторскому методу [11], аналогичная зависимость имеет максимум на частоте первого резонанса среднего уха человека ($f_{р.1м} \approx 700 \text{ Гц}$ у мужчин и $f_{р.1ж,д} \approx 1000 \text{ Гц}$ у женщин и детей), при этом $V(226)_{1м} \approx 0,54 \text{ см}^3$ у мужчин и $V(226)_{1ж} \approx 0,79 \text{ см}^3$ у женщин (рис.2). При этом параметр нормы среднего уха одинаков и равен единице:

$$A = \frac{V(f_p)}{V(226)} \frac{1}{\sqrt{1 + V_{б.пол} / V(226)}} = 1. \quad (2)$$

Рассмотрим постановку эксперимента по измерению иммитанса в [8]. Были взяты 20 свежих трупных блоков височных костей. Это противоречит тому, что установить в норме ли ухо после усреднения по мужским и женским ушам невозможно.

Блок височной кости включал полностью слуховой проход, среднее ухо, пирамиду с внутренним слуховым проходом и сосцевидным отростком (последние в ухе человека на тимпанограммы на частотах до 1000 Гц включительно практически не влияют). Но при этом парафином перекрыли костный отдел (со стороны барабанной полости) слуховой трубы. А, как установлено в [6], она как раз и акустически шунтирует барабанную полость, так что иммитанс среднего уха на частотах до 1000 Гц равен только иммитансу барабанной перепонки. С закрытой трубой он равен иммитансу последовательного соединения барабанной перепонки и барабанной полости, т.е.:

$$\begin{aligned} \frac{1}{i\omega C_{а.з}} &= \frac{1}{i\omega C_{а.б.п}} + \frac{1}{i\omega C_{а.б.пол}} = \\ &= \frac{1}{i\omega C_{а.б.п}} \cdot \left(1 + \frac{C_{а.б.п}}{C_{а.б.пол}} \right), \end{aligned} \quad (3)$$

откуда

$$f_p = \frac{1}{\sqrt{C_{а.б.п} M_a}} \sqrt{1 + \frac{C_{а.б.п}}{C_{а.б.пол}}}. \quad (4)$$

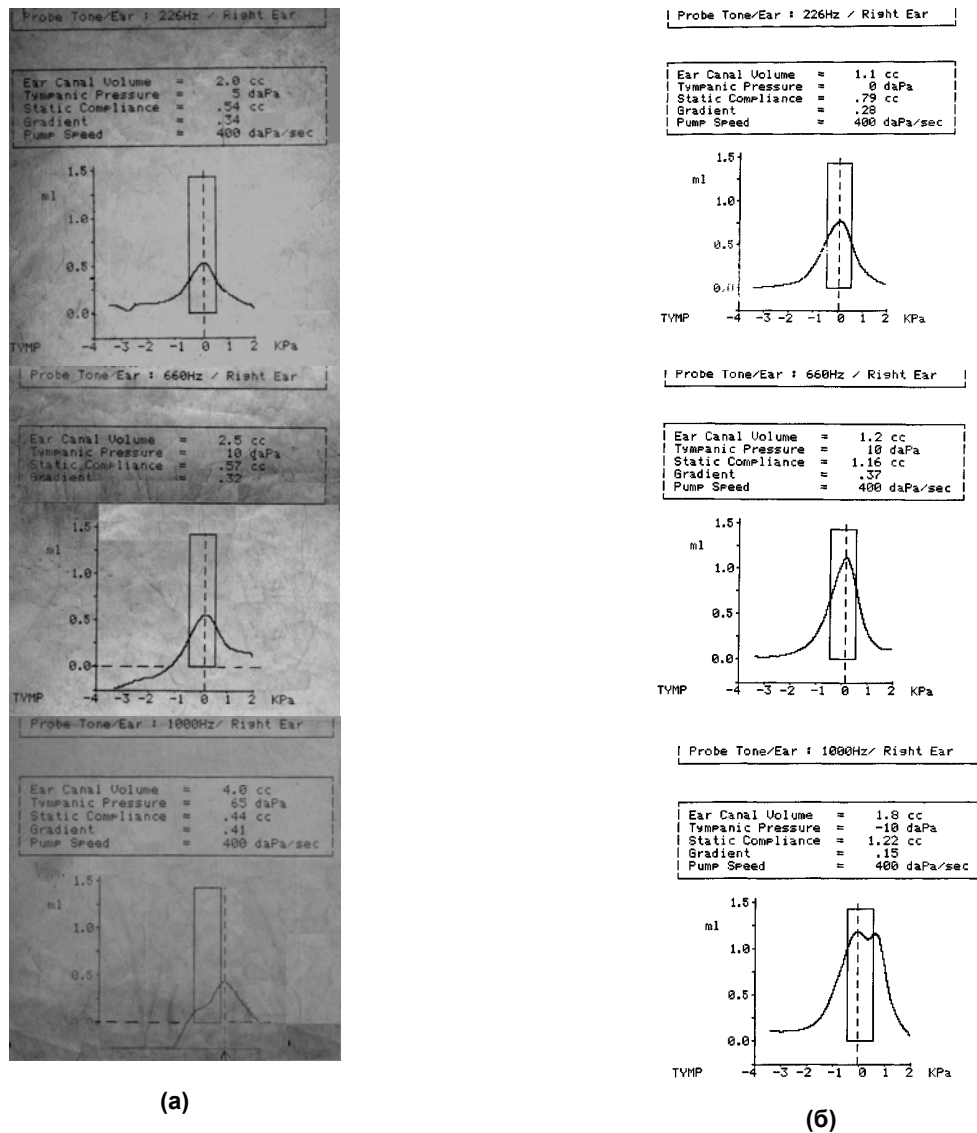


Рис.2. Тимпанограммы (а) - мужского уха (одного из авторов), (б) – женского уха, полученные с помощью многочастотного импедансометра ZO-2020 на частотах 226Гц, 660Гц, 1000Гц

Для мужского уха (рис.2,а):

$$f_{p.m} = f_{p.1m} \sqrt{1 + \frac{0,54}{1}} = 1,25f_{p.1m} \approx 800 \text{ Гц}, (5)$$

а для женского (рис.2,б):

$$f_{p.ж} = f_{p.1ж} \sqrt{1 + \frac{0,79}{1}} = 1,35f_{p.1ж} \approx 1350 \text{ Гц}. (6)$$

Эквивалентные объемы среднего уха составляют:

$$V(226)_m = V(226)_{1m} / 1,54 = 0,35 \text{ см}^3, (7)$$

$$V(226)_ж = V(226)_{1ж} / 1,54 = 0,52 \text{ см}^3, (8)$$

При тестировании обычно выполняли тимпанометрию и изучали статическую податливость и акустические рефлексy. Судя по тому, что о результатах последнего теста не говорится ничего, он не регистрировался, о чем упоми-

налось выше. На принтере получали три тимпанограммы при частотах зондирующего тона 226Гц, 660Гц и 1000Гц. Затем с помощью операционного микроскопа и набора микроинструментов вскрывали и расширяли антрум и производили тимпанотомию. Тимпанограммы на стандартной частоте 226Гц использовали только для определения отсутствия некоторых патологических изменений среднего уха в соответствии с критерием Джергера (J. Jerger), который не указывает на состояние уха в норме (рис.3) [5]. Кривая типа А характерна для нормального состояния системы среднего уха и для отосклеротического анкилоза стремени; кривая типа В - для экссудативного среднего отита; кривая типа С - для нарушений функций слуховой трубы с возникновением вследствие этого отрицательного давления воздуха в полости

среднего уха; кривая типа D - для атрофии и рубцовых изменений барабанной перепонки; кривая типа E - для разрыва цепочки слуховых косточек.

За значение статической податливости в работе [8] бралось значение максимума тимпанограммы, печатаемое принтером для трех частот, а не значение при нулевом относительном давлении в НСП, как нужно.

После операционного вмешательства, вновь осуществляли тимпанометрию с указанными частотами зондирующего тона.

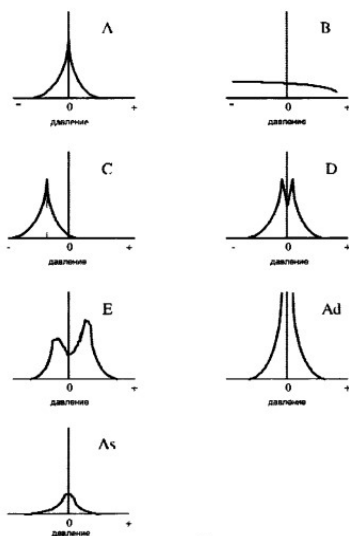


Рис. 3. Основные типы тимпанограмм, характерных для разных форм патологии среднего уха [5]

2. Высокочастотная (1000Гц) тимпанометрия у новорождённых: исследование нормы

Высокочастотная тимпанометрия (зондовая частота 1000Гц) является потенциально полезным исследованием функции среднего уха новорождённых в универсальной программе скрининга слуха новорождённых и развития аудиологии.

Исследование [12] имело цель получить нормативные данные тимпанометрии на частоте 1000Гц для группы новорождённых. Участниками были 122 новорожденных, родившихся в срок, в возрасте между 1 и 6 днями (70 мальчиков; 52 девочки) (средний возраст равен 3,29 дня, стандартное отклонение (SD) составляет 0,89) с историей вынашивания без случайностей, и свободных от каких-либо предшествующих условий или истории, составляющих фактор риска для потери слуха. Все участники исследовались на наличие задержанной вызванной отоакустической эмиссии (ЗВОАЭ) в обоих ушах, и проводилась тимпанометрия обоих ушей при поддержании герметичности зонда в НСП.

Результаты указывают на значительную зависимость от уха: большее среднее значение пика компенсированного статического иммитанса, среднего статического иммитанса при +200 даПа и среднего значения ширины тимпанограммы, и меньшее среднее значение градиента, чем левого уха. Никакой значительной зависимости результатов от пола не обнаружено.

Нормативные данные, полученные из этих находок, характеризуются следующим:

1. однопиковая тимпанограмма с зависимостью акустического иммитанса от относительного давления (+200 до -200 даПа);
2. пиковое значение компенсированного иммитанса (90% интервал) – правое ухо: 0,39 до 2,28 мМо (mmho) и левое: 3,39 до 1,95 мМо;
3. акустический иммитанс при +200 даПа: правое ухо: 1,40 до 5,01 мМо и левое ухо: 1,54 до 5,09 мМо;
4. давление воздуха в ушном канале (90% диапазон) – оба уха: -58 до 87 даПа;
5. ширина тимпанограммы (90% диапазон) – правое ухо: 57 до 154 даПа и левое ухо: 46 до 144 даПа;
6. градиент (90% диапазон) – правое ухо: 0,27 до 0,75 и левое ухо – 0,33 до 0,71.

Использовался прибор Capella OAE/middle ears analyzer (ver. 2.10 Beta) (Madsen Electronics). Вместе с соответствующими модулями он может быть скомбинирован для проведения различных исследований, в том числе и скрининговой тимпанометрии (используя 226 или 1000 Гц зондовый тон). Обычно эквивалентный объем наружного слухового прохода, который также является диагностируемым параметром и печатается, измеряется на частоте 226 Гц. В многочастотных тимпанометрах он печатается и на других частотах, однако с физическим объемом может не совпадать. Так, на рис.2,а значение эквивалентного объема 4,0 см³ (Ear Canal Volume) на частоте 1000Гц почти в 2 раза больше, чем на частоте 226Гц – 2,0 см³. Это связано с тем, что трубчатый пневмопривод для изменения статического давления является акустическим элементом, увеличивая на частоте 1000 Гц физический объем наружного слухового прохода.

Все ли измерения проводились на частоте 1000 Гц, в [12] не указано. И если значение для 226 Гц, то значение 440к.Ом близко к акустическому сопротивлению потерь R_a мужского уха на резонансной частоте.

Возникают вопросы и к пункту 3. Во всех импедансометрах тимпанограмма начинает измеряться от положительного максимума статического давления, где значение акустического импеданса максимальное, а эквивалентного объема равно нулю. Поэтому следует предполо-

жить, что 200 даПа указано ошибочно; нужно 200 Па (20 даПа). Один или два пика при этом наблюдаются, в пункте 3 не указывается. Видно, что минимальное значение $R_a \approx 200$ ак.Ом совпадает со значением $R_a \approx 190$ ак.Ом, полученным из рис.3, из того, что $200\text{Па} > 0$ следует, что $f_p \leq 1000$ Гц.

Выводы

1. Максимальное значение эквивалентного объёма (только на частоте 226 Гц – податливость) не позволяет определить ни частоту нижнего резонанса, ни активную и реактивную составляющие иммитанса.

2. Отсутствие слуховой трубы преобразует среднее ухо в систему однорезонансную и приводит к смещению частот в большую сторону.

3. Усреднение результатов по 20 височным костям, без учёта половой принадлежности, не даёт возможности получить индивидуальные характеристики.

4. Тимпанометрия на одной частоте 1000 Гц не может служить для определения состояния среднего уха. Для нахождения параметра нормы нужны измерения адмиттанса на частотах 226 Гц, 660 Гц или 800 Гц и 1000 Гц отдельно для каждого уха, обращая внимание на пол ребенка.

5. Определение состояния среднего уха новорожденных с помощью многочастотной импедансометрии значительно упрощает интерпретацию результатов регистрации вызванной отоакустической эмиссии, слуховых вызванных потенциалов, позволяя отказаться от некоторых из них.

Список использованных источников

1. Лисовский В. А. Слуховые приборы и аппараты / А. Лисовский, В. А. Елисеев. - М.: Радио и связь, 1991. - 192с.
2. Соколов Ю. К. Американська аудіологія – добрий приклад для України / Ю. К. Соколов, О. В. Соколова. // Аудіологічний вісник. - 1997. - Т.18, № 2.
3. Вахитов Я. Ш. Теоретические основы электроакустики и электроакустическая аппаратура / Вахитов Я. Ш. - М.: Искусство, 1982. - 415с.
4. Umberto Cotrona. Understanding impedance measurement. Denmark / Umberto Cotrona.- Oticon, 1989.
5. Ya. A. Altman, G.A. Tavartkiladze, Handbook on audiology, DMK Press, Moscow, 2003.
6. S.A. Naida, "A formula of normal human middle ear. Sound reflection from a tympanic membrane," Acoustic bulletin, No. 3, pp. 46-51, 2002.
7. S. Naida, "Acoustic theory problems of speech production in the light of the discovery of the formula for the middle ear norm parameter," Proc. of IEEE 35th Int. Sc. Conf. Electronics and Nanotechnology (ELNANO), pp. 347-350, 21-24 April 2015, Kyiv, Ukraine. DOI:10.1109/ELNANO.2015.7146907.
8. Березнюк В. В. Показатели тимпанометрии в экспериментах на трупных височных костях человека / В. В. Березнюк // Журнал вушних, носових і горлових хвороб. - 1994. - № 3. - С.54-57.
9. V. S. Didkovskyi, S. A. Naida, O. A. Zubchenko, "Technique for rigidity determination of the materials for ossicles prostheses of human middle ear," Radioelectronics and Communications Systems, Vol. 58, No. 3, pp. 134-138, 2015. DOI:10.3103/S073527271503005X.
10. Найда С. А. Определение биоакустических параметров тимпано-оссикулярного аллотрансплантата при его отборе и приготовлении для создания банка тканей / С. А. Найда, О. Н. Борисенко. // Электроника и связь. -2004.-№22.-С.33-35.
11. S.A. Naida, "Frequency characteristics of coefficient of amplification of sound pressure by the auditory ossicles and acoustic reflex," Electronics and Communications, No. 19, pp. 11-16, 2003.
12. J. Kei, J. Allison-Levick, J. Dockray, R. Harrys, C. Kirkegard, J. Wong, M. Maurer, J. Hegarty, J. Young, D. Tudehope, "High-frequency (1000 Hz) tympanometry in normal neonates," Journal of the American Academy of Audiology, V. 14, No. 1, pp. 20-28, 2003.

Поступила в редакцию 21 октября 2015 г.

УДК 534.23

С.А. Найда, д.-р. техн. наук, **О.Р. Кирильчик**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
ул. Політехнічна, 16, м. Київ-56, 03056, Україна.

Можливості багаточастотної імпедансометрії середнього вуха людини

В роботі зроблено аналіз методу діагностики слуху людини на основі багаточастотної імпедансометрії середнього вуха людини. Оскільки при вивченні питань фізіології вуха і реконструкції звукопровідного апарату часто використовують параметри ізольованих скроневих кісток, окремо розглянуто питання їх відповідності акустичним характеристикам вуха людини. У зв'язку з актуальністю задачі скринінгу слуху новонароджених проаналізовані літературні експериментальні дані з високочастотної імпедансометрії новонароджених. Бібл. 12, рис. 3.

Ключові слова: *середе вуха; тимпанометрія; акустичний рефлекс; імпеданс; імпеданс; адмиттанс; параметр норми середнього вуха.*

UDC 534.23

S. Naida, Dr.Sc., O. Kyrylchuk

National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute",
st. Polytechnique, 16, Kiev-56, 03056, Ukraine.

Acoustic Membranes in Broadband Electro-Acoustic Paths of Devices for Diagnostics of Hearing of the Human

In paper the analysis of a method of diagnostics of hearing of the person on the basis of measurement of an impedance at several frequencies is made. As when studying questions of physiology of an ear and reconstruction of the sound carrying out device often use parameters of the isolated temporal bones, the question of their compliance to acoustic characteristics of an ear of the person is separately considered. Due to the relevance of a problem of screening of hearing of newborns literary experimental data on measurement of an impedance of a middle ear of newborns at a high frequency are analyzed. References 12, figures 3.

Keywords: *middle ear; tympanometry; acoustic reflex; impedance; immittance; admittance; parameter of norm of a middle ear.*

References

1. *Lisovsky, V. A. (1991). Acoustical units and devices, Radio and communication, Moscow. (Rus)*
2. *Sokolov, Yu. K. (1997). Audiology in America – a good example for Ukraine. The audiological messenger, Vol.18, No. 2. (Ukr)*
3. *Vakhitov, Ya. Sh. (1982). Theoretical bases of electro-acoustics and electro-acoustic equipment. Art, Moscow. (Rus)*
4. *Umberto Cotrona. (1989). Understanding impedance measurement. Denmark. Oticon.*
5. *Altman, Ya. A., Tavartkiladze, G. A. (2003). Handbook on audiology, DMK Press, Moscow. (Rus)*
6. *Naida, S. A. (2002). A formula of normal human middle ear. Sound reflection from a tympanic membrane. Acoustic bulletin, No. 3, pp. 46-51. (Ukr)*
7. *Naida, S. (2015). Acoustic theory problems of speech production in the light of the discovery of the formula for the middle ear norm parameter. Proc. of IEEE 35th Int. Sc. Conf. Electronics and Nanotechnology (ELNANO), pp. 347-350, 21-24 April 2015, Kyiv, Ukraine. DOI:10.1109/ELNANO.2015.7146907.*
8. *Bereznyuk, V. V. (1994). Tympanometry indicators in experiments on cadaveric temporal bones of the person. Journal of ear, nose and throat diseases, No. 3, pp.54-57. (Rus)*
9. *Didkovskiy, V. S., Naida, S. A., Zubchenko, O. A. (2015). Technique for rigidity determination of the materials for ossicles prostheses of human middle ear. Radioelectronics and Communications Systems, Vol. 58, No. 3, pp. 134-138. DOI:10.3103/S073527271503005X.*
10. *Naida, S. A., Borysenko, O. N. (2004). Determination of bioacoustics parameters of a tympano-ossicles allotransplant at its selection and preparation for creation of bank of tissues. Electronics and Communications, No. 22, pp. 33-35.*
11. *Naida, S.A. (2003). Frequency characteristics of coefficient of amplification of sound pressure by the auditory ossicles and acoustic reflex. Electronics and Communications, No. 19, pp. 11-16. (Rus)*
12. *Kei, J., Allison-Levick, J., Dockray, J., Harrys, R., Kirkegard, C., Wong, J., Maurer, M., Hegarty, J., Young, J., Tudehope, D. (2003). High-frequency (1000 Hz) tympanometry in normal neonates. Journal of the American Academy of Audiology, V. 14, No. 1, pp. 20-28.*