

## Биомедицинские приборы и системы

УДК 534.75

DOI: [10.20535/2312-1807.2017.22.1.94979](https://doi.org/10.20535/2312-1807.2017.22.1.94979)Найда С. А., д.т.н., OrcID [0000-0002-5060-2929](https://orcid.org/0000-0002-5060-2929)e-mail: [sa.nayda@aae.kpi.ua](mailto:sa.nayda@aae.kpi.ua)Лозенко А. Р., аспирант, OrcID [0000-0002-7670-1706](https://orcid.org/0000-0002-7670-1706)e-mail: [ma.kyrylchyk@gmail.com](mailto:ma.kyrylchyk@gmail.com)Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

### ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИЙ ЗОНД ШИРОКОПОЛОСНОГО УШНОГО ЭХО-СПЕКТРОМЕТРА ДЛЯ СКРИНИНГА СЛУХА НОВОРОЖДЕННЫХ

*Рассчитан электроакустический зонд для лабораторного макета прибора, который осуществляет экспресс-диагностику среднего уха человека, и позволяет получить количественные параметры состояния его слуховой системы.*

*Во многих работах, авторы которых использовали схему измерения комплексного импеданса, уже были предприняты попытки создания ушного эхо-спектрометра. Однако основная ошибка их исследований заключалась в том, что не было выполнено главное условие эхолокации: наличие достаточной пространственной базы для разделения излученного и отраженного импульсов.*

*Актуальность работы состоит в том, что разработанный ушной эхо-спектрометр позволяет проводить количественную диагностику слуха не только у взрослых, но и у новорожденных, что проблематично на сегодняшний день. Проблемой является то, что не существует количественных показателей в диагностике среднего уха человека, а диагностика среднего уха новорожденных невозможна из-за наличия пневмосистемы в акустическом импедансометре. Практическая значимость заключается в возможности проведения скрининга слуха новорожденных непосредственно в роддоме.*

*Дальнейшим этапом после создания макета для экспресс-диагностики среднего уха человека является его экспериментальное исследование в клинических условиях.*

*Библ. 10, рис. 2.*

**Ключевые слова:** среднее ухо; резонансная частота среднего уха; формула для параметра нормы среднего уха; импеданс

**Введение.** Проблема объективной диагностики слуха новорожденных в последнее время все-речь обеспокоила медицинское сообщество мира. Уже много тысяч новорожденных прошли программу скрининговых тестов слуха, которые включают измерение отоакустической эмиссии (ОАЕ) продуктов искажения (DPOAE), транзитивной вызванной ОАЕ (ТЕОАЕ) [1,2], а также регистрацию слуховых вызванных потенциалов (СВП) [3], или АБР (auditory brain reflexes) [4]. Дополнительно измеряется также акустический рефлекс (АР) [5]. Однако, проблема дифференциации нарушений между звукопроводящей системой среднего уха и слуховым анализатором (улитка, нервы, отделы головного мозга) осталась нерешенной.

Еще в прошлом веке Джозефом Звислоцким была предложена конструкция электроакустического моста, которая и была положена в основу построения акустических импедансометров. Они остаются основным средством диагностики среднего уха и в наше время [6]. Метод импедансометрии представляет собой регистрацию акустического сопротивления слухового канала и среднего уха, или обратной величины, в единицах эквивалентного объема, и является объективным методом (не требует участие испытуемого).

Используются две методики акустической импедансометрии — тимпанометрия и АР. При тимпанометрии измеряется зависимость эквивалентного объема от вынужденного изменения давления в герметически закрытом слуховом



канале, создаваемого пневмосистемой. Это позволяет отделить его объем от эквивалентного объема среднего уха, который на стандартной зондовой частоте 226 Гц характеризует гибкость барабанной перепонки.

АР основана на изменении эквивалентного объема среднего уха в ответ на тональный акустический стимул на частотах 500, 1000, 2000, 4000 Гц (речевой диапазон частот) интенсивностью выше пороговой ( $80 \div 90$  дБ) [5].

В США, Великобритании, Бельгии, Нидерландах, Германии, Испании, Турции, Палестинских территориях, Бразилии, Индии, были приняты универсальные программы скрининга слуха новорожденных [1]. Однако, в большинстве даже экономически развитых стран такие программы, с использованием эффективных и доступных средств, отсутствуют. Отсутствуют они и в Украине.

В работах посвященных ОАЭ отмечается схожесть принципа действия прибора ОАЭ и эхолокатора, но при этом абсолютно не берется в расчет тот факт, что для регистрации эхо-сигнала — короткого звукового импульса, необходима база, время прохождения которой превышает длительность импульса.

Для количественной индивидуальной характеристики системы среднего уха, которая необходима не только для скрининга слуха новорожденных, а и при операциях по имплантации слуховых косточек (тимпанопластике) [7], предложено новое направление исследований и диагностики слуха широкополосная акустическая ушная эхо-спектрометрия [8]. Она заключается в регистрации импульсного звукового сигнала, отбитого от барабанной перепонки. Необходимая база создается протяженностью жесткой трубки малого диаметра, такой, чтобы акустический сигнал распространялся в ней в виде плоской волны и не затухал.

В отличие от других национальных программ, программа универсального аудиологического скрининга новорожденных использующая разработанный ушной эхо-спектрометр будет базироваться на точных количественных соотношениях закона построения и функционирования слухового анализатора [9], сведет к нулю вероятность врачебной ошибки, и при этом, не будет требовать высокой квалификации персонала. Целью данной работы является расчет компонентов основного блока широкополосного ушного эхо-спектрометра – электроакустического зонда.

### Расчетные соотношения метода ушной эхо-спектрометрии.

Метод слуховой эхо-спектрометрии (рис.1) состоит в следующем: в слуховой проход плотно вставляется звукопровод (трубка). Если на свободном конце звукопровода, с помощью электроакустического преобразователя, создать плоскую волну, то она пройдет по всему звукопроводу без искажения фронта, как бы звукопровод не был изогнут. Для согласования диаметров преобразователя и звукопровода используется рупорный переход. Достигнув барабанной перепонки, волна отразится и пойдет в обратном направлении, ее регистрируют с помощью того же преобразователя (режим приема). Таким образом, образуются два сигнала: излученный и отраженный, включающий потери при распространении звука по трубке. Потери можно компенсировать, проведя предварительно измерения на материале с известным акустическим импедансом. По полученным сигналам измеряется  $\chi$  – коэффициент отражения от барабанной перепонки по давлению, из которого выражается искомый акустический импеданс среднего уха человека:

$$Z_2 = Z_1 \cdot \frac{1 + \chi}{1 - \chi}, \quad (1)$$

где  $Z_1$  – акустический импеданс воздуха, заполняющего звукопровод,  $Z_2$  – акустический импеданс среднего уха.

Электроакустический преобразователь, звукопроводная трубка, и рупор являются конструктивными элементами электроакустического зонда, а выражение (1) является основным соотношением, которое реализуется в процессе диагностики с помощью ушного эхо-спектрометра.

Частота заполнения звукового импульса выбирается равной резонансным частотам среднего уха мужчины (660 Гц) или женщины (1000 Гц) [9]. Ушной эхо-спектрометр работает в широкополосном режиме, т.е. длительность импульса выбирается равной 1,5 периода на соответствующей частоте, т.е.:  $\tau_{и} = 2.27$  мс, или  $\tau_{и} = 1.5$  мс.

Тогда полоса частот импульса на уровне 0.707 от максимума составит:  $2\Delta f = \frac{1}{\tau_{и}} = 440$  Гц или  $2\Delta f = 670$  Гц, т.е. диапазон частот равен: (440 ÷ 880) Гц, или (665 ÷ 1335) Гц.

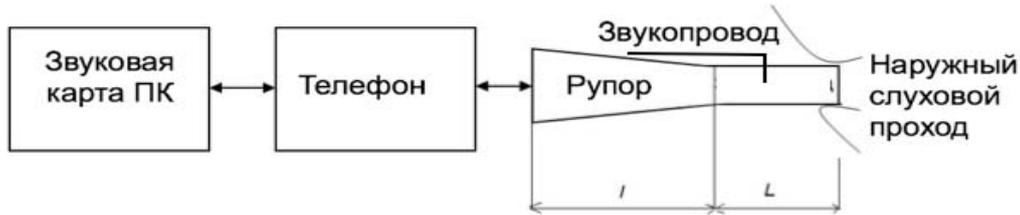


Рис.1. Электроакустический зонд ушного эхо-спектрометра

На электроакустический преобразователь подаются электрические импульсы:

$$y = y_m \sin(2\pi \cdot 660 \cdot t) \text{ при } 0 \leq t \leq 2.27 \cdot 10^{-3} \text{ с, или}$$

$$y = y_m \sin(2\pi \cdot 1000 \cdot t) \text{ при } 0 \leq t \leq 1.5 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

Количество посылок и интервалов между ними можно выбирать в процессе диагностики.

Рассмотрим более подробно выбор и расчет конструктивных элементов электроакустического зонда ушного эхо-спектрометра.

**Выбор электроакустического преобразователя.** Поскольку громкоговорители и телефоны являются последними звеньями любого радиовещательного тракта или линии связи, то их свойства оказывают решающее влияние на его качество работы в целом.

Эффективность телефона оценивается его чувствительностью. Для разрабатываемого устройства необходим малогабаритный телефон, с рабочим диапазоном частот от 440 Гц до 1335 Гц. В качестве такового выбираем электродинамический малогабаритный телефон ТМ-2А (рис.2), который используется в слуховых аппаратах и, следовательно, способен развивать достаточное акустическое давление.

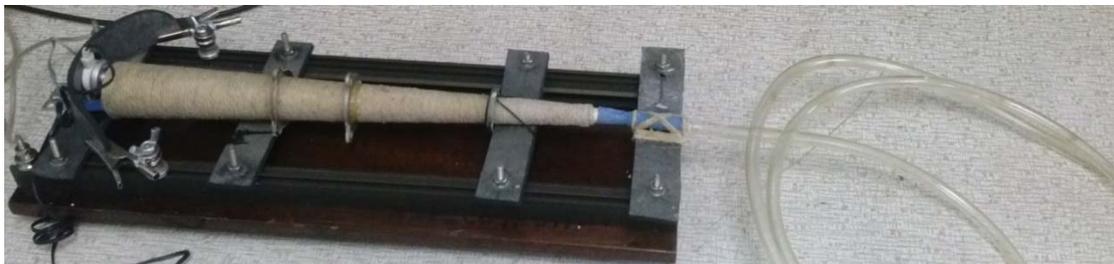


Рис.2. Лабораторный макет электроакустического зонда ушного эхо-спектрометра

Телефон относится к электроакустическим преобразователям с уравновешенным якорем. Корпус телефона изготовлен из ударопрочного никелевого сплава, диаметр передней крышки устройства составляет  $D=20$  мм.

В случае, когда чувствительность приемника в режиме телефона  $S_{\text{тел}}$ , Па/А, а  $R$  – его сопротивление постоянному току;  $U_{\text{возб}}$  и  $U_{\text{эхо}}$  – напряжение возбуждения и эхо-сигнала соответственно:

$$\frac{U_{\text{эхо}}}{U_{\text{возб}}} = \frac{S_{\text{тел}}^2}{R} \cdot H \cdot \chi, \quad (2)$$

где  $H = 2A_0/z_2$  ( $z_2 = 4.1 \cdot 10^2 \frac{\text{Па} \cdot \text{с}}{\text{м}}$ ) – коэффициент взаимности для плоской волны,  $A_0$  – площадь преобразователя.

Для телефона ТМ-2А:

$$A_0 = 3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2, \quad S_{\text{тел}} = 700 \text{ Па/А}, \quad R = 150 \text{ Ом}.$$

$$\frac{U_{\text{эхо}}}{U_{\text{возб}}} = 4.8 \cdot 10^{-3} \chi.$$

**Расчет параметров измерительной трубки.** Плоская акустическая волна, излучаемая телефоном, создается не в свободном пространстве, а в звукопроводе с диаметром, удовле-

творяющим условию, которое выводится из условия однородности волны в трубе [10]:

$$\frac{\lambda}{d} > 1.7, \quad (3)$$

где  $\lambda$  – длина волны,  $d$  – диаметр трубки.

Взяв диаметр трубки равным диаметру наружного слухового прохода  $d=0.6$  см, получим:  $\lambda > 1.02$  см, или  $f < \frac{c_0}{\lambda} = 3.33 \cdot 10^4$ .

Чтобы затухание волны в трубке не сказывалось на амплитуде эхо-сигнала, длина ослабления звуковой волны в  $n$  раз  $x_0$  должна быть гораздо больше удвоенной длины трубки  $L$ . Материалом трубки выбран поливинилхлорид (рис.2), широко применяемый в медицине. Например, из этого материала изготавливают трубки, используемые при переливании крови. Затухание в трубке определяется вязкостным механизмом, и оно значительно больше, чем в свободном пространстве.

Определим величину  $x_0$  [10]:

$$x_0 = \left( \sqrt{\frac{2\omega\rho_0}{\mu}} \cdot a \right) \cdot \frac{\lambda}{2\pi}, \quad (4)$$

где  $a = d/2$  – радиус трубки,  $\mu = 1.6 \cdot 10^{-5} \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}}$  – коэффициент вязкости воздуха.

Для нижней частоты исследуемого диапазона (440 Гц)  $x_0 = 8$  м.

Для верхней частоты (1335 Гц)  $x_0 = 4.64$  м.

Следовательно,  $2L \ll x_0 = 5.15$  м, и выберем окончательно  $L = 1.5$  м.

**Расчет согласующего рупора.** Рупор применяется для согласования размеров электроакустического преобразователя ( $D = 20$  мм) и звукопровода ( $d = 6$  мм). Хотя он и не изменяет отношения (2), однако на 20 дБ увеличивает уровень акустического давления возле барабанной перепонки по сравнению с давлением на поверхности телефона:

$$p_{\text{б.п}} = p_{\text{тел}} \left( \frac{D}{d} \right)^2 \approx 10 \cdot p_{\text{тел}}. \quad (5)$$

Выберем конический рупор, как наиболее технологичный. Он, к тому же, не имеет критической частоты [10].

Влияние конечной длины трубы рупора скажется в образовании резонансных максимумов и минимумов активной и реактивной составляющих его входного сопротивления.

Для нижней частоты данного устройства  $f=440$  Гц длина рупора составит [10]:

$$l = 3 \cdot \frac{c_0}{\omega} \cdot \ln \frac{D}{d} = 44 \text{ см.}$$

Таким образом, в разрабатываемом электроакустическом зонде был изготовлен конический рупор длиной 44 см из тонкого декоративного бумажно-слоистого пластика, обладающего достаточной жесткостью (рис.2).

По проведенным расчетам всех конструктивных составляющих электроакустического зонда был разработан и изготовлен лабораторный макет электроакустического зонда прибора для экспресс диагностики среднего уха человека (рис.2).

**Выводы.** Анализируя существующие объективные методы диагностики слуха человека, можно сделать вывод, что каждый из них не универсален. Метод отоакустической эмиссии дает упрощенную информацию: есть нарушение слуха или нет, и при этом не позволяет его дифференцировать. Процедура регистрации слуховых вызванных потенциалов не пригодна для новорожденных в связи с большой продолжительностью ее проведения. Акустическая импедансометрия также обладает рядом недостатков: не существует количественного анализа результатов; для новорожденных процедура представляет опасность, т.к. есть риск повреждения слуховой системы из-за повышенного давления, создаваемого пневмосистемой.

Все эти факторы, в совокупности, определили актуальность создания нового метода, лишённого перечисленных недостатков — ушной эхо-спектрометрии. Разработан прибор, который реализует этот метод. Ушной эхо-спектрометр обладает рядом преимуществ перед аналогами: между электроакустическим зондом и барабанной перепонкой отсутствует замкнутый объем внешнего слухового прохода и, как следствие, отпадает необходимость в использовании пневмосистемы; существует возможность дифференциальной диагностики слуха; используются значительно меньшие средние по времени уровни звукового давления; прибор является полностью цифровым.

Перспективою дальніших досліджень є створення нової, ефективною та економічною програмою скринінгу слуху новонароджених; нового покоління аудіологічних засобів для об'єктивної діагностики слуху,

та вивчення впливу на нього негативних факторів середовища: шуму, ототоксичних препаратів, антибіотиків.

Надійшла до редакції 07 лютого 2017 р.

### Література

1. Kemp D. T. Otoacoustic emissions, their origin in cochlear function, and use / D. T. Kemp // Br. Med. Bull. -2002. - V. 63, №1. –P. 223-241. - DOI: [10.1093/bmb/63.1.223](https://doi.org/10.1093/bmb/63.1.223).
2. [Trzaskowska B.](#) Criteria for detection of transiently evoked otoacoustic emissions in schoolchildren / [Bartosz Trzaskowska](#), [Edyta Pilkaa](#), [W. Wiktor Jedrzejczaka](#), [Henryk Skarzynski](#) // [International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology](#). -Published Online: June 29, 2015. - Available at: [http://www.ijporonline.com/article/S0165-5876\(15\)00304-3/fulltext](http://www.ijporonline.com/article/S0165-5876(15)00304-3/fulltext). DOI:[10.1016/j.ijporl.2015.06.028](https://doi.org/10.1016/j.ijporl.2015.06.028).
3. Stach Brad A. Clinical Audiology: An Introduction / Brad A. Stach. - Detroit, Michigan: Delmar, Cengage Learning, 2010. -788 p. - ISBN: 9780766862883.
4. Tate Maltby Maryanne. Principles of Hearing Aid Audiology / Maryanne Tate Maltby. - London and Philadelphia: Whurr Publishers, 2002. – 350 p. - ISBN: 1861562578.
5. [Sahley Tony L.](#) Basic Fundamentals in Hearing Science / [Tony L. Sahley](#), [Frank E. Musiek](#). - San Diego: Plural Publishing, 2014. - 686 p. ISBN: 9781597565493.
6. Bergevin Christopher. External and middle ear sound pressure distribution and acoustic coupling to the tympanic membrane / Christopher Bergevin, Elizabeth S. Olson // The Journal of the Acoustical Society of America. -2014. -V. 135, №3. -P. 1294-1312. - DOI:[10.1121/1.4864475](https://doi.org/10.1121/1.4864475).
7. Didkovskiy V.S. Technique for Rigidity Determination of the Materials for Ossicles Prostheses of Human Middle Ear / V.S. Didkovskiy, S.A. Naida, O.A. Zubchenko // Radioelectronics and Communications Systems. -2015. - V. 58. - №3. – P.134-138. - DOI:[10.3103/S073527271503005X](https://doi.org/10.3103/S073527271503005X).
8. Didkovskiy V.S. Building-up principles of auditory echoscope for diagnostics of human middle ear / V.S. Didkovskiy, S.A. Naida // Radioelectronics and Communications Systems. -2016. - V. 59. - №. 1. - P. 39-46. - DOI:[10.3103/S0735272716010039](https://doi.org/10.3103/S0735272716010039).
9. Naida Sergey. Acoustic Theory Problems Of Speech Production In The Light Of The Discovery Of The Formula For The Middle Ear Norm Parameter / Sergey Naida // Proc. of IEEE 35th Int. Sc. Conf. Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, Ukraine, April 21-24, 2015. - P.347-350. - DOI:[10.1109/ELNANO.2015.7146907](https://doi.org/10.1109/ELNANO.2015.7146907).
10. Beranek Leo L. Acoustics – Sound Fields and Transducers/ Leo L. Beranek, Tim J. Mellow. - San Diego: Elsevier – Academic Press. – 2012. – 721p. - ISBN: 9780123914217.

УДК 534.75

**Найда С. А.**, д.т.н., OrCID [0000-0002-5060-2929](https://orcid.org/0000-0002-5060-2929)

e-mail: [sa.nayda@aae.kpi.ua](mailto:sa.nayda@aae.kpi.ua)

**Лозенко О. Р.**, аспірант, OrCID [0000-0002-7670-1706](https://orcid.org/0000-0002-7670-1706)

e-mail: [ma.kyrylchuk@gmail.com](mailto:ma.kyrylchuk@gmail.com)

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ЕЛЕКТРОАКУСТИЧНИЙ ЗОНД ШИРОКОСМУГОВОГО ВУШНОГО ЕХО-СПЕКТРОМЕТРА ДЛЯ СКРИНІНГУ СЛУХУ НОВОНАРОДЖЕНИХ

*Розрахований електроакустичний зонд для лабораторного макету приладу, який здійснює експрес-діагностику середнього вуха людини, та дозволяє також отримати кількісні параметри стану її слухової системи.*

*У багатьох роботах, автори яких використовували схему вимірювання комплексного імпедансу, вже були зроблені чисельні спроби створення вушного ехо-спектрометра. Однак основна*



помилка їх досліджень полягала в тому, що не була виконана головна умова ехолокації: наявність достатньої просторової бази для розділу випроміненого і відбитого імпульсів.

Актуальність роботи полягає в тому, що розроблений вушний ехо-спектрометр дозволяє здійснювати кількісну діагностику слуху не тільки у дорослих, але і у новонароджених, що проблематично на сьогоднішній день. Проблемою є те, що не існує кількісних показників в діагностиці середнього вуха людини, а діагностика середнього вуха новонароджених унеможливлена наявністю пневмосистеми в акустичному імпедансометрі. Практична значимість полягає в можливості проведення скринінгових досліджень слуху новонароджених безпосередньо в пологовому будинку.

Подальшим етапом після створення макету приладу для експрес-діагностики середнього вуха людини є його експериментальне дослідження в клінічних умовах.

Бібл. 10, рис. 2.

**Ключові слова:** середнє вухо; резонансна частота середнього вуха; формула для параметра норми середнього вуха; імпеданс

UDC 534.75

**Naida S. A.**, Dr.Sc. (Eng.), OrCID [0000-0002-5060-2929](https://orcid.org/0000-0002-5060-2929)

e-mail: [sa.nayda@aae.kpi.ua](mailto:sa.nayda@aae.kpi.ua)

**Lozenko O.R.**, postgraduate, OrCID [0000-0002-7670-1706](https://orcid.org/0000-0002-7670-1706)

e-mail: [ma.kyrylchuk@gmail.com](mailto:ma.kyrylchuk@gmail.com)

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

## ELECTRO-ACOUSTIC PROBE BROADBAND EAR ECHO-SPECTROMETER FOR SCREENING OF HEARING OF NEWBORNS

*The article presents the calculation and analysis of the earing echo-spectrometer: tube, horn, the phone choice rationale, also the signal processing algorithm is described in article. The main advantage of the developed method over other methods of objective human hearing diagnostic is grounded.*

*Development of laboratory model of the device for rapid diagnosis of the state of the average human ear was made on the basis of the analytical relations for the quantitative parameters of the state of human middle ear.*

*In the since works there were attempts to create auditory sound methodology. The authors used a measuring circuit the complex impedance. However, the main concern of their research concluded that it was not satisfied the main condition of echolocation: the availability of sufficient spatial framework for the separation of the emitted and reflected pulses. Instead, it was mentioned the delay in the electric echo signal.*

*The relevance of the present work is the developed method which allows to make the diagnosis of hearing not only for adults but for newborns also, and this is a great issue today. In addition, a simulated layout for the rapid diagnosis of the average human ear makes it possible to obtain a quantitative criterion hearing assessment for adults. The scientific problem is the lack of quantitative indicator in the diagnosis of middle ear of adults today. A diagnosis of middle ear of newborns is complicated by the presence of the pneumatic system. Thus, the practical significance is to provide newborn hearing screening and providing of the quantitative indicators of the state of the middle ear for adults.*

*Thus, a further step after the layout development for the rapid diagnosis of human middle ear is an experimental study of the layout created.*

*Ref. 10, fig. 2.*

**Keywords:** middle ear; resonant frequencies of the middle ear; formula for the middle ear norm parameter; impedance; tympanometry

### References

- [1]. D. T. Kemp, "Otoacoustic emissions, their origin in cochlear function, and use," [Br. Med. Bull., V. 63, pp. 223-241, 2002. DOI:10.1093/bmb/63.1.223.](#)



- [2]. [Bartosz Trzaskowskia](#), [Edyta Pilkaa](#), [W. Wiktor Jedrzejczaka](#), [Henryk Skarzynskia](#), "Criteria for detection of transiently evoked otoacoustic emissions in schoolchildren," [International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology](#), Published Online: June 29, 2015. Available at: [http://www.ijporlonline.com/article/S0165-5876\(15\)00304-3/fulltext](http://www.ijporlonline.com/article/S0165-5876(15)00304-3/fulltext). DOI:[10.1016/j.ijporl.2015.06.028](#).
- [3]. Brad A. Stach, *Clinical Audiology: An Introduction*, Delmar, Cengage Learning, Detroit, Michigan, 2010. 721 p. ISBN: 9780766862883.
- [4]. Maryanne Tate Maltby, *Principles of Hearing Aid Audiology*, Whurr Publishers, London and Philadelphia, 2002. 350 p. ISBN: 1861562578.
- [5]. [Tony L. Sahley](#), [Frank E. Musiek](#), *Basic Fundamentals in Hearing Science*, San Diego: Plural Publishing, 2014. 686 p. ISBN: 9781597565493.
- [6]. Christopher Bergevin, Elizabeth S. Olson, "External and middle ear sound pressure distribution and acoustic coupling to the tympanic membrane," *The Journal of the Acoustical Society of America*, V. 135, No. 3, 2014, pp. 1294-1312. DOI:[10.1121/1.4864475](#).
- [7]. 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*, V. 58, No. 3, pp. 134-138, 2015. DOI: [10.3103/S073527271503005X](#).
- [8]. V.S. Didkovskyi, S.A. Naida, "Building-up principles of auditory echoscope for diagnostics of human middle ear," *Radioelectronics and Communications Systems*, V. 59, No. 1, pp. 39-46, 2016. DOI: [10.3103/S0735272716010039](#).
- [9]. Sergey 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](#).
- [10]. Leo L. Beranek, Tim J. Mellow. *Acoustics – Sound Fields and Transducers*, San Diego: Elsevier – Academic Press, 2012. 721 p. ISBN: 9780123914217.