

УДК 534.134

## Новые возможности аудиометрии на основе формулы для параметра нормы среднего уха

О.А.Зубченко, С.А. Найда, д-р техн. наук

Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт", пр.Победы, 37, Киев-56, 03056, Украина

Рассматриваются возможности аудиометрии слуха человека на основе формулы для параметра нормы среднего уха, которая связывает между собой резонансную частоту механической колебательной системы, акустическую гибкость барабанной перепонки (эквивалентный объем), активную составляющую импеданса и физический объем барабанной полости. При межсубъектных отклонениях отдельных параметров уха человека в норме они таковы, что параметр нормы остается близким к единице. Малые отклонения его от единицы свидетельствуют о наличии физиологических (обратимых) нарушений в ухе. Библ. 16, рис.3, табл. 1.

**Ключевые слова:** *среднее ухо, внутреннее ухо, акустическая импедансометрия, отоакустическая эмиссия, эквивалентная схема, связанные контура*

### Введение

Обеспокоенность медиков развитых стран мира ухудшением слуха человека со дня рождения и связанной с этим задержкой развития речи, а с ней и умственного развития, привела к разработке универсальных программ скрининга слуха новорожденных с первых дней и использованию всего арсенала средств объективной диагностики слуха, созданных до получения формулы для параметра среднего уха [11-14] и очень дорогих. Это приборы для регистрации слуховых вызванных потенциалов (СВП) (acoustics brain reflex, ABR), отоакустической эмиссии (ОАЭ) разных видов (distortion product otoacoustic emission, DPOAE; transient evoked otoacoustic emission, TEOAE), а также одно- и многочастотной тимпанометрии [1-3,5]. Однако, проблема дифференциации нарушений между звукопроводящей системой среднего уха и слуховым анализатором (улитка, нервы, отделы мозга) оставалась нерешенной.

В 1996 г. начато внедрение единой системы раннего выявления нарушений слуха у детей со дня рождения и в Российской Федерации (методические рекомендации № 96/150 "Единая

система аудиологического скрининга", Г.А. Таварткиладзе и соавт.), а также [7,9]. Из-за того, что метод ОАЭ является весьма дорогостоящим и для работы на нем необходим квалифицированный персонал, ОАЭ применяется для скрининга слуха у детей в США, Германии, некоторых регионах Великобритании и ряде других стран [9]. В Бельгии для этих целей используется регистрация СВП. Однако, в большинстве даже экономически развитых стран отсутствуют государственные программы скринингового исследования слуха с применением эффективных методов. Отсутствуют они и в Украине.

В настоящей работе даются примеры того, насколько формула для параметра нормы среднего уха упрощает такие исследования, фактически сводя к нулю возможность диагностической врачебной ошибки.

### 1. Тимпанометрия

Наиболее распространенным методом объективного исследования слуха является тимпанометрия - измерение зависимости эквивалентного объема среднего уха (ml, cc) от величины относительного статического давления в герметически закрытом наружном слуховом проходе. Графическим изображением является тимпанограмма. Обычно снимают только стандартную (с частотой сигнала 226Гц) тимпанограмму и только по ее виду определяют и норму и характер нарушений в среднем ухе. На этой частоте эквивалентный объем определяется гибкостью барабанной перепонки. Существуют и двух- или многочастотные тимпанометры, в которых используется для детей частота 1000 Гц, как прибор Capella OAE/middle ear analyzer (ver.2.10 Beta) фирмы Madsen Electronics (Дания) в [2]. В нем скомбинирована диагностика с ОАЭ и тимпанометрия либо на 226, либо на 1000 Гц.

На рис.1 приведены тимпанограммы правого и левого женского уха, полученные с помощью трехчастотного (226, 660, 1000 Гц) импедансметра ZO-2020 фирмы Madsen Electronics. В рамках напечатаны: значение объема наруж-

ного слухового прохода – *ear canal volum (ECV)*; значение относительного давления в максимуме тимпанограммы – *tympanic pressure (P)*; значение эквивалентного объема среднего уха – *static compliance*, которое на частоте 226 Гц оп-

ределяется гибкостью барабанной перепонки, а на резонансной – активной составляющей акустического импеданса; градиент (*G*) в кПа.

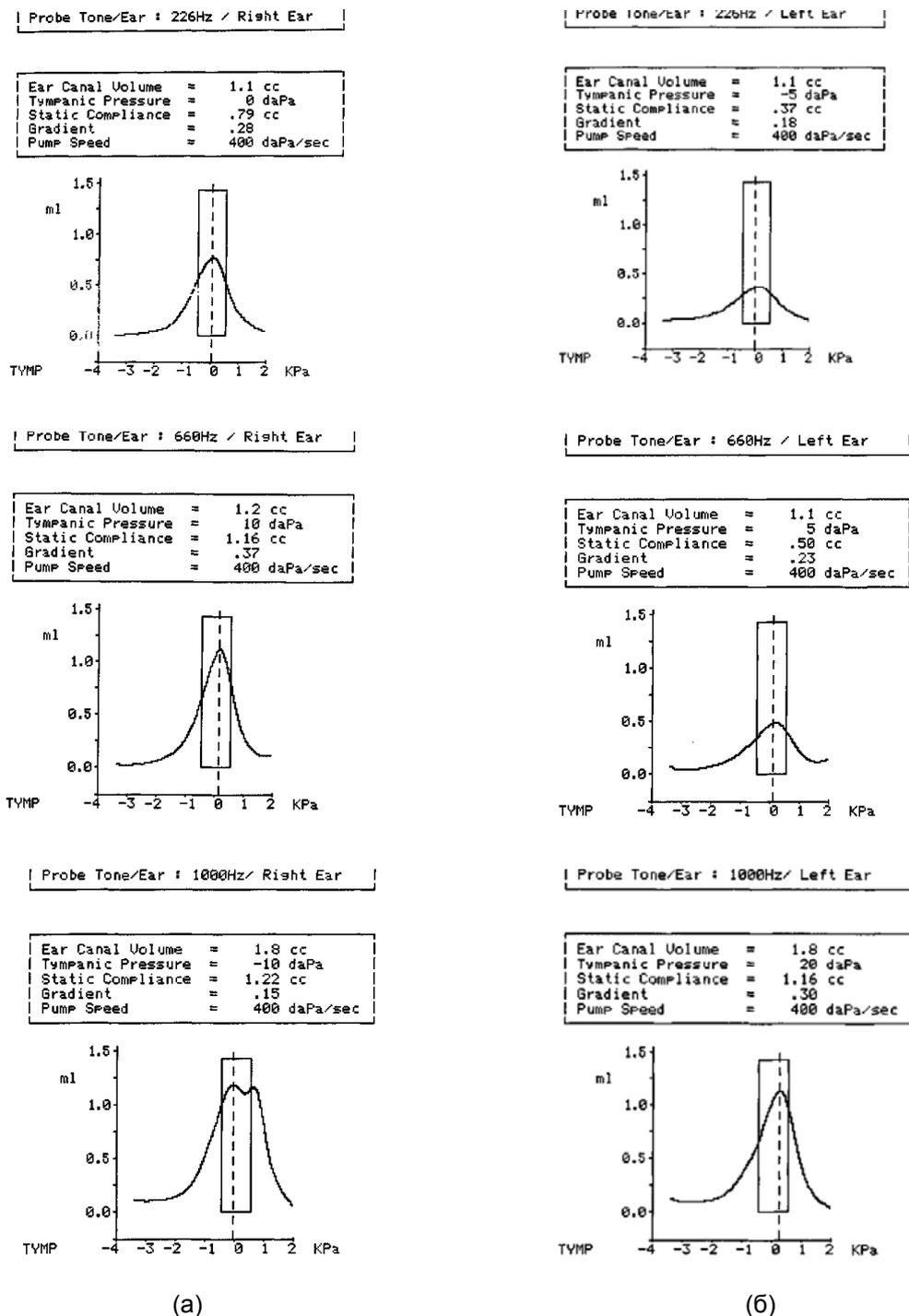


Рис.1. Тимпанограммы правого (а) и левого (б) женского уха

Из рис.1 видно, что на частоте 1000 Гц тимпанограмма имеет 2 максимума, из которых первый находится при – 10 дека Па (-100 Па), а второй при не указанном значении. Согласно

общепринятой классификации Джергера (1970 г.), кривая при 226 Гц характерна для нормального состояния системы среднего уха, а кривая, такая как при 1000 Гц – для атрофии и рубцо-

вых изменений барабанной перепонки. В действительности же это объясняется тем, что резонансная частота немного меньше 1000 Гц, а становится равной 1000 Гц при уменьшении гибкости с увеличением модуля относительного давления.

Обратим внимание, что:

1) истинное значение объема наружного слухового прохода  $ECV=1,1 \text{ см}^3$  определяется при частоте 226 Гц ( $ECV=1,8 \text{ см}^3$  при 1000 Гц из-за добавления эквивалентного объема пневмопривода);

2) значение  $ECV=1,1 \text{ см}^3 \cong V_{\text{экв}}(f_p) = 1,2 \text{ см}^3$ .

Следовательно, это значение тоже является важным диагностическим параметром для детского и женского уха в норме, которая определяется одним числом [1]:

$$A_{\text{пр}} = \frac{V(f_p)}{V(226)} \frac{1}{\sqrt{1 + V_{\text{б.пол}} / V(226)}} = \frac{1,2}{0,79} \frac{1}{\sqrt{1 + 1 / 0,79}} = 1,03 \quad (1)$$

где объем барабанной полости  $V_{\text{б.пол}} \cong 1 \text{ см}^3$ .

Для левого уха  $V(226)=0,37 \text{ см}^3$ ,  $f_p=1000 \text{ Гц}$ ,  $V(1000)=1,15 \text{ см}^3$ :

$$A_{\text{лев}} = \frac{1,15}{0,37} \frac{1}{\sqrt{1 + 1 / 0,37}} \cong 1,6 \neq 1,$$

т.е. имеется нарушение в среднем ухе.

Близость резонансных частот правого и левого уха в предположении равенства массы слуховых косточек при уменьшении гибкости в  $0,79/0,37=2,14$  раза указывает на то, что механическая гибкость осталась неизменной, т.е.:

$$V_{\text{пр}}(226) / S_{\text{б.п.пр}}^2 = V_{\text{лев}}(226) / S_{\text{б.п.лев}}^2,$$

откуда:

$$S_{\text{б.п.лев}} = S_{\text{б.п.пр}} \cdot \sqrt{V_{\text{б.п.лев}} / V_{\text{б.п.пр}}} = 0,68 \cdot S_{\text{б.п.пр}},$$

т.е. имеется дефект левого уха.

Площадь барабанной перепонки правого уха определяется из принципа отражения звука от барабанной перепонки на частоте резонанса, который для площади записывается в виде [12]:

$$S_{\text{б.п.пр}} = 5,8 \frac{\omega_p V(f_p)}{c_0} = 127 \text{ мм}^2. \quad (2)$$

Из рекламного проспекта одночастотного (226 Гц) импедансного аудиометра МТ 10 фирмы Interacoustics (Дания):  $ECV=1,47 \text{ мл}$ ,  $C_a=1,21 \text{ мл}$ ,  $G=114 \text{ декаПа}$  (акустическая гибкость  $C_a$  связана с величиной эквивалентного объема среднего уха  $V_{\text{экв}}$  соотношением:

$V_{\text{экв}}(226) = \rho \cdot c_0^2 \cdot C_a$ , где  $\rho=1,2 \text{ кг/м}^3$ ,  $c_0=342 \text{ м/с}$  – удельный вес воздуха и скорость звука в нем,  $C_a$  – в  $\text{м}^5/\text{Н}$ ). Считая, что тимпанограмма принадлежит детскому уху ( $V_{\text{б.пол}} \cong 0,6 \text{ см}^3$ ), т.е. вблизи нижней границы интервала значений для человека  $0,5-1 \text{ см}^3$ , получим:

$$A = \frac{1,47}{1,21} \frac{1}{\sqrt{1 + 0,6 / 1,21}} = 1. \quad (3)$$

Знание всех параметров колебательной системы среднего уха позволяет рассчитать коэффициент усиления акустического давления слуховыми косточками от барабанной перепонки в улитку внутреннего уха [13]. Максимальное значение коэффициента  $K_{\text{ус}} \cong 115$  (41 дБ) на частоте резонанса при  $A=1$  равно потери слуха при разрушении цепи косточек. Частотная зависимость в дБ представляет “аудиологический нуль”, который обычно получают для каждого телефона стандартизацией кривых порога слышимости достаточно большого отически здоровых молодых людей 18-30 лет. При  $A \neq 1$  рассчитанные по данным тимпанометрии испытуемого частотные зависимости коэффициента усиления сравниваются с “аудиологическим нулем” и дают кривые потери слуха в звукопроводной системе. Потери в слуховом анализаторе рассчитываются по измерению порогов акустического рефлекса на фиксированных частотах [13].

Хорошо известно, что пороги слуховой чувствительности у одного и того же обследуемого не являются абсолютно стабильной величиной. Они зависят от множества внешних факторов, воздействующих на организм человека, а также от функционального состояния самого организма. В этом можно убедиться, если проводить измерения порогов слышимости через определенные интервалы времени. Для количественной оценки колебаний слуховой чувствительности могут быть использованы стандартные отклонения. В [12], где подробно анализировались недостатки субъективной (с участием субъекта) аудиометрии, приведена табл.1 порогов слышимости.

Отмечается, что у нормально слышащих наибольший разброс порогов слышимости наблюдается на высоких частотах. У больных отосклерозом величина колебаний в среднем соответствует значениям, полученным в норме в диапазоне частот 1000-8000 Гц, и равномерна на всех частотах. У больных с нейросенсорной тугоухостью I группы колебания равномерны на всех частотах и превышают колебания у лиц с

отосклерозом, и лиц с нормальным слухом. Во II группу включены больные, у которых снижение слуха составило в среднем 25 дБ в диапазоне 125-2000 Гц и 60 дБ на частоте 4000 Гц. Подобные результаты ранее в литературе авторам не встречались. Обратим внимание на то, что из равномерного по частотам характера отклоне-

ний выпадают для первых трех категорий обследуемых колебания на частоте 1000 Гц: у нормально слышащих для  $\sigma$  наблюдается четкий максимум, а у больных отосклерозом и нейросенсорной тугоухостью I группы, наоборот, минимум.

**Таблица 1 Пороги слышимости**

Форма тугоухости	Стандартные отклонения в дБ ( $\pm\sigma$ ) на частотах (Гц)						
	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Нормально слышащие	5,2	4,6	4,1	8,2	6,5	6,4	7,5
Отосклероз	7,8	6,1	7,0	6,2	6,7	6,8	7,5
Нейросенсорная тугоухость:							
I группа	8,6	8,7	8,5	8,1	8,5	8,9	8,4
II группа	10,9	8,8	9,0	6,6	6,2	5,3	-

Легко показать, что отклонение порога слышимости в дБ от среднего для нормально слышащих равно:

$$\Delta(\text{дБ}) = 20 \cdot \log\left(1 + \left(\Delta p / p_{\text{пор}}(f)\right)\right) = 8,2 \text{ дБ.}$$

Откуда:

$$1 + \left(\Delta p / p_{\text{пор}}(f)\right) = 2,58, \text{ или } |\Delta p| / p_{\text{пор}}(f) = 1,58.$$

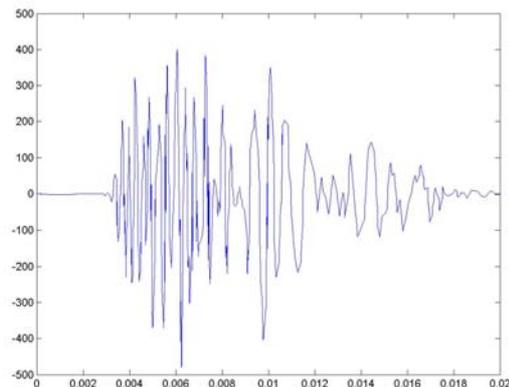
Это значение близко к  $V(f_p) / V(226) = 1,52$  в (1).

**2. Регистрация сигналов вызванной ОАЭ (ВОАЭ)**

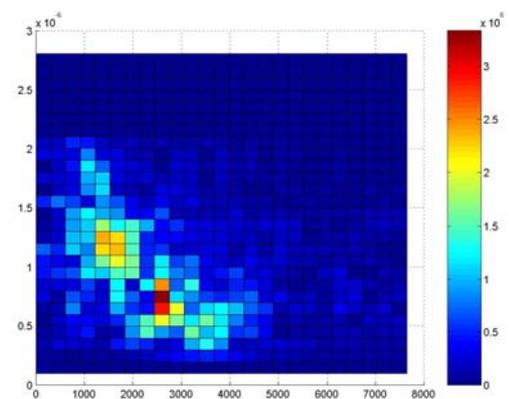
ВОАЭ представляет собой звук, появляющийся в закрытом слуховом проходе в ответ на широкополосный (щелчок) или тональный акустический импульс в течении 3-12 мс. Считалось, что она представляет собой эхо, до 2005 г., когда было показано [15], что ВОАЭ является импульсной функцией среднего уха и улитки, выходящей через круглое окно и барабанную полость.

Воспользуемся приведенной в [8] усредненной ( $n=1600$ ) формой эхо-сигнала задержанной ОАЭ (рис.2), полученной у нормально слышащего обследуемого в ответ на щелчок продолжительностью 80 мкс и интенсивностью 40 дБ, ограниченный частотами 400-5000 Гц.

Поскольку систему среднего уха возбуждают щелчком, то она отзывается на своих резонансных частотах. С помощью программных средств MatLab эти частоты были определены. Видно (рис.2), что система имеет два резонанса, приблизительно на частотах  $f_1=1500$  Гц и  $f_2=2600$  Гц, что совпадает с данными [10] и [15].



**Рис. 2. Форма эхо-сигнала ВОАЭ нормально слышащего обследуемого**



**Рис.3. Спектрограмма эхо-сигнала ВОАЭ**

## Выводы

Рассмотрены возможности диагностики и аудиометрии слуха на основе формулы для параметра нормы среднего уха.

1. Обнаружено, что при состоянии среднего женского и детского уха в норме объем наружного слухового прохода равен эквивалентному объему уха на частоте резонанса, что позволяет определять параметр нормы и объем барабанной полости даже с помощью одночастотного (226 Гц) тимпанометра.

2. Обнаружено, по литературным данным измерений колебаний порогов слуховой чувствительности в зависимости от частоты, при  $f=1000$  Гц максимум размаха у нормально слышащих и минимум у пациентов с отосклерозом и сенсоневральными нарушениями I группы (снижение слуха в среднем 25 дБ в диапазоне 125-200 Гц и 60 дБ на частоте 4000 Гц). Показано, что размах колебаний порога чувствительности у одного субъекта для акустического давления на частоте резонанса равен добротности среднего уха. Это представляет метод диагностики на функциональном уровне (обратимом) уровне.

3. Спектрограмма отклика ВОАЭ показывает, что система среднего уха имеет два резонанса: 1500 Гц и 2600 Гц.

## Литература

- Using middle-ear measurements to interpret cochlear, sensorineural, and behavioral responses in a study of neonatal hearing impairment / D. H. Keefe, M. P. Gorga, S. T. Neely [and etc.] // Proc. International Conf. - Villa Erba (Como), Italy. - 2002.
- High frequency (100 Hz) tympanometric findings in neonates: a normative study / J. Kei, J. Allison-Levick, J. Dockray [and etc.] // Proc. International Conf. - Villa Erba (Como), Italy. - 2002.
- Keefe D. H. Introduction to the use of acoustic reflectance and admittance to assess middle-ear status in neonates / D. H. Keefe // Proc. International Conf. - Villa Erba (Como), Italy. - 2002.
- Magazine IEEE Engineering in Medicine and biology. -1996. -V.15, №1. - P.125.
- Shahnaz N. Multifrequency, multicomponent tympanometry in 3-weeks old infants / N. Shahnaz // Proc. International Conf. - Villa Erba (Como), Italy. - 2002.
- Бабкина Л. И. Особенности отображения частотной структуры сигналов в периферическом отделе слухового анализатора в норме и патологии / Л. И. Бабкина, А. П. Молчанов // Вестник оториноларингологии. -2000. -№ 3.-С.28-30.
- Володин И. Н. Выявление патологии органа слуха в системе медицинского обеспечения детей раннего возраста / И. Н. Володин, Г. А. Таварткиладзе, Ю. В. Козунь // Российский вестник перинатологии и педиатрии. - 2000. -№ 5.-С.20-24.
- Диагностика нарушенной слуховой функции у детей первого года жизни/ [Г.А.Таварткиладзе, Т.Г.Гвелесиани, М.Е.Загорянская, М.Г.Румянцева]. - М.: Полиграф сервис. - 2001. - 23 с.
- Королева И. В. Опыт организации системы системы раннего выявления и абилитации детей с нарушениями слуха в Санкт-Петербурге /И. В. Королева, А. А. Ланцова, Г. А. Подосинникова // Вестник оториноларингологии. -2000. -№ 3.-С.23-27.
- Левина Ю.В. Диагностическое значение определения резонансной частоты среднего уха/ Ю.В.Левина, И.В.Иванец // Вестник оториноларингологии. - 2002. - №2. - С.11 - 13.
- Найда С. А. Формула середнього вуха людини в нормі. Відбивання звуку від барабанної перетинки / С. А. Найда // Акустичний вісник.-2002.-№ 3.-С.46-51.
- Найда С. А. О генетической связи между формантами звука "а" и "у" и резонансной частотой среднего уха в норме / С. А. Найда // Электроника и связь. -2002. -№ 17.-С.7-11.
- Найда С. А. Частотные характеристики коэффициента усиления звукового давления слуховыми косточками и акустического рефлекса / С. А. Найда // Электроника и связь.-2003.-№ 19.-С.11-16.
- Найда С. А. О возможности одноканальной динамической пассивной акустотермометрии головного мозга и улитки внутреннего уха новорожденных с помощью фокусированного ультразвука / С. А. Найда // Электроника и связь.-2003.-№ 18.-С.9-10.
- Найда С. А. Отоакустическая эмиссия – импульсная функция уха, ключ к оптимальному кодированию звука в улитковом имплантате /С. А. Найда //Доклады Академии наук Украины. -2005. -№5. -С.172-178.
- Розенблюм А. С. Новые методы диагностики нарушений слуха / А. С. Розенблюм, Е. М. Цирюльников-Л.:Ленинградский восстановительный центр ВОГ,1986.-50 с.

УДК 534.134

## Нові можливості аудіометрії на основі формули для параметра норми середнього вуха

О.О.Зубченко, С.А. Найда, д-р техн. наук,

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут"

пр.Перемоги, 37, Київ-56, 03056, Україна

*Розглядаються можливості аудіометрії слуху людини на основі формули для параметра норми середнього вуха, яка поєднує між собою резонансну частоту коливальної частини, акустичну гнучкість барабанної перетинки (еквівалентний об'єм), активну складову імпедансу і фізичний об'єм барабанної порожнини. При міжсуб'єктних відмінностях окремих параметрів вуха людини в нормі вони є такими, що параметр норми лишається близьким до одиниці. Малі відхилення його від одиниці свідчать про наявність фізіологічних (зворотних) порушень у вусі. Бібл.16, рис.3, табл.1.*

*Ключові слова: середнє вуха, внутрішнє вуха, акустична імпедансометрія, отоакустична емісія, еквівалентна схема, зв'язані контури.*

## New possibilities of audiometry on the basis of the formula for parameter of norm of the middle ear

O.A.Zubchenko, S.A.Naida

National technical university of Ukraine "Kiev polytechnic institute",

pr. Peremogy, 37, Kyiv-56, 03056, Ukraine.

*Possibilities of measurement of hearing of the person by acoustical methods on the basis of the formula for parameter of norm of a middle ear which connects among themselves a resonant frequency of mechanical oscillatory system, acoustical flexibility of an eardrum (equivalent volume), an active component of an impedance and physical volume of a drum-type cavity are observed. At between subject deviations of separate parameters of an ear of the person in norm they are that that the norm parameter remains close to unit. Its small deviations from unit testify to presence of physiological (reversible) infringements in an ear. Reference 16, figures 3, table 1.*

*Keywords: a middle ear, an internal ear, measurement of an acoustic impedance, otoacoustic issue, the equivalent scheme, connected a contour.*

1. Using middle-ear measurements to interpret cochlear, sensorineural, and behavioral responses in a study of neonatal hearing impairment / D. H. Keefe, M. P. Gorga, S. T. Neely [and etc.]/Proc. International Conf. - Villa Erba (Como), ITALY. - 2002.
2. High frequency (100 Hz) tympanometric findings in neonates: a normative study / J. Kei, J. Allison-Levick, J. Dockray [and etc.]/Proc. International Conf. - Villa Erba (Como), Italy. - 2002.
3. Keefe D. H. Introduction to the use of acoustic reflectance and admittance to assess middle-ear status in neonates / D. H. Keefe//Proc. International Conf. - Villa Erba (Como), Italy. - 2002.
4. Magazine IEEE Engineering in Medicine and biology.-1996.-V.15, №1. - P.125.
5. Shahnaz N. Multifrequency, multicomponent tympanometry in 3-weeks old infants / N. Shahnaz//Proc. International Conf. - Villa Erba (Como), Italy. - 2002.
6. Babkina L.I. Features of display of frequency structure of signals in peripheral department of the acoustic analyzer in norm and pathology/ L.I.Babkina, A. P.Molchanov// The Bulletin of otolaryngology.-2000. - № 3.-P.28-30. (Rus)

7. *Volodin I. N.* Revealing of a pathology of an organ of hearing in system of medical maintenance of children of early age / I.N.Volodin, G.A.Tavartkiladze, J. V.Kozun//The Russian bulletin of perinatologiya and pediatrics.-2000. - № 5.-P.20-24. (Rus)
8. Diagnostics of the broken acoustical function at children of the first year of life / [G.A.Tavartkiladze, T.G.Gvelesiani, M.E.Zagorjanskaja, M.G.Rumjantseva]. - M: The Polygraph service. - 2001. - 23 p. (Rus)
9. *Koroleva I. V.* Organization experience of system of early revealing and aftertreatment children with a hearing disorder in St.-Petersburg/ I. V.Koroleva, A.A.Lantsova, G.A.Podosinnikova// The Bulletin of otolaryngology.-2000. - № 3.-P.23-27. (Rus)
10. *Levina J.V.* Diagnostic value of definition of resonant frequency of an middle ear/ J.V.Levina, I.V.Ivanets//The Bulletin of otolaryngology. - 2002. - №2. - P.11 - 13. (Rus)
11. *Naida S.A.* Formula of a middle ear of the person in norm. Reflexion from eardrum membrane/S.A.Naida// Acoustic messenger.-2002. №3.-P.46-51. (Ukr)
12. *Naida S. A.* About a genetic relation between formant a sound "a" and "u" and resonant frequency of a middle ear in norm/ S.A.Naida //Electronics and communication.-2002. - № 17.-P.7-11. (Rus)
13. *Naida S. A.* Frequency characteristics of factor of strengthening of sound pressure acoustical stones and acoustic reflex/ S.A.Naida // Electronics and communication.-2003. № 19.-P.11-16. (Rus)
14. *Naida S. A.* About possibility single-channel dynamic passive acoustic thermometry a brain and a snail of an internal ear of newborns by means of the focused ultrasound / S.A.Naida // Electronics and communication.-2003. № 18.-P.9-10. (Rus)
15. *Naida S.A.* Otoacoustic issue - pulse function of an ear, a key to optimum coding of a sound in implantate/ S.A.Naida//Reports of Academy of Sciences of Ukraine.-2005. - №5.-P.172-178. (Rus)
16. *Rozenblum A.S.* New methods of diagnostics of a hearing disorder / A.S. Rozenblum, E. M.Tsirjulnikov. -L.: Leningrad recovery center VOG, 1986.-50 p. (Rus)

*Поступила в редакцию 11 декабря 2012 г.*