

## РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО АВТОДИНА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОДВИЖНОСТИ БАРАБАННОЙ ПЕРЕПОНКИ

**Н. А. Дайхес** — Московский научно-клинический центр оториноларингологии Минздрава России, директор, профессор, доктор медицинских наук; **О. В. Мареев** — ГБОУ ВПО Саратовский ГМУ им В. И. Разумовского, заведующий кафедрой оториноларингологии, профессор, доктор медицинских наук; **Г. О. Мареев** — ГБОУ ВПО Саратовский ГМУ им В. И. Разумовского, кафедра оториноларингологии, ассистент, кандидат медицинских наук; **Д. А. Усанов** — ФГБОУ ВПО Саратовский ГУ им. Н. Г. Чернышевского, заведующий кафедрой физики твердого тела, профессор, доктор физико-математических наук; **А. В. Скрипаль** — ФГБОУ ВПО Саратовский ГУ им. Н. Г. Чернышевского, заведующий кафедрой медицинской физики факультета nano- и биомедицинских технологий, профессор, доктор физико-математических наук.

## APPLICATION OF LASER AUTODYNE FOR VIBRATION ASSESSMENT OF TYMPANIC MEMBRANE

**N. A. Daykhes** — Director of Moscow Clinical Center of Otolaryngology, Professor, Doctor of Medical Science; **O. V. Mareev** — Saratov State Medical University n.a. V. I. Razumovsky, Head of Department of Otolaryngology, Professor, Doctor of Medical Science; **G. O. Mareev** — Saratov State Medical University n.a. V. I. Razumovsky, Department of Otolaryngology, Assistant, Candidate of Medical science; **D. A. Usanov** — Saratov State University n.a. N. G. Chernyshevsky, Head of Department of Solid State Physics, Professor, Doctor of Physical and Mathematical Science; **A. V. Skripal** — Saratov State University n.a. N. G. Chernyshevsky, Head of Department of Medical Physics, Professor, Doctor of Physical and Mathematical Science.

Дата поступления — 11.10.2011 г.

Дата принятия в печать — 08.12.2011 г.

**Дайхес Н. А., Мареев О. В., Мареев Г. О., Усанов Д. А., Скрипаль А. В.** Результаты применения лазерного автодина для исследования подвижности барабанной перепонки // Саратовский научно-медицинский журнал. 2011. Т. 7, № 4. С. 894–897.

Описывается историческая ретроспектива и применение различных старинных и современных способов исследования подвижности структур среднего уха. Приведены результаты собственных исследований подвижности барабанной перепонки при помощи лазерного автодина измерителя и их значение в дифференциальной диагностике заболеваний уха. *Цель исследования:* оценка состояния структур среднего уха при помощи современных нанотехнологических методов. *Материалы.* Исследование проведено на 207 лицах, разделенных на следующие группы: отолгически здоровые лица, больные с нейросенсорной тугоухостью, отосклерозом, адгезивным отитом, тубоотитом. *Результаты.* Впервые получены точные амплитудно-частотные характеристики колебаний структур среднего уха и барабанной перепонки при исследовании в свободном звуковом поле как в норме, так и при различной патологии среднего и внутреннего уха; дана оценка их значения в дифференциальной диагностике заболеваний уха. *Заключение.* Применение лазерного автодина измерителя наносмещений в качестве перспективного объективного метода оценки слуховой функции вполне возможно и весьма необходимо в современной оториноларингологии для дифференциальной диагностики патологии слуха.

**Ключевые слова:** лазерный автодин, барабанная перепонка, среднее ухо, тугоухость.

**Daykhes N. A., Mareev O. V., Mareev G. O., Usanov D. A., Skripal An. V.** Application of laser autodyne for vibration assessment of tympanic membrane // Saratov Journal of Medical Scientific Research. 2011. Vol. 7, № 4. P. 894–897.

Research is devoted to assessing the state of the middle ear structures by usage of modern nanotechnology methods. The history of the problem, various ancient and modern methods for studying the mobility of the middle ear structures have been described. The results of the research of eardrum movements by laser autodyne and their value in differential diagnosis of ear diseases have been presented. *The research goal is to assess vibrations of middle ear structures by modern nanotechnological techniques. Materials:* The study included 207 persons, divided into groups of healthy individuals and patients with sensorineural deafness, otosclerosis, adhesive otitis and tubootitis. *Results:* Exact frequency response vibration patterns of the middle ear and tympanic membrane have been obtained. Measurements have been made in open sound field in normal ears and ears with various pathology of middle and inner ear. The value of this method in differential diagnosis of ear diseases has been investigated. *Conclusion:* The use of laser autodyne for measuring middle ear structures vibration is a perspective and objective method of assessing auditory function. It is very necessary in modern otolaryngology for differential diagnosis of hearing pathology.

**Key words:** laser autodyne, middle ear, tympanic membrane, hearing loss.

**Введение.** По данным Министерства здравоохранения РФ, распространенность заболеваний органа слуха в России составляет 17,6 человека на 1 тыс. населения среди взрослых и 1,2 на 1 тыс. среди детей [1]. При этом чаще всего (до 70–80%) наблюдается поражение звуковоспринимающего аппарата, обусловленное дегенеративными изменениями улитки или слухового нерва — так называемая сенсоневральная тугоухость. У 20–30% больных

тугоухость связана с поражением звукопроводящего аппарата. В некоторых случаях дифференциальная диагностика этих двух форм тугоухости затруднена, часто встречается и смешанная форма тугоухости, при лечении которой весьма важно учитывать сравнительный вклад в потерю слуха патологии среднего и внутреннего уха. При такой патологии наряду с консервативным применяется и хирургическое лечение — слухоулучшающие операции. Среди хирургических способов, применяемых для улучшения слуховой функции при кондуктивной тугоухости, можно выделить такие, как тимпаноластика, стапедопла-

**Ответственный автор** — Мареев Глеб Олегович.  
Адрес: 410012 г. Саратов ул. Сакко и Ванцетти, 34, кв. 29.  
Тел.: 8–9053692597.  
E-mail: jey\_trasher@mail.ru

стика, мобилизация стремени. Однако отсутствие стойкого положительного эффекта в некоторых случаях может быть связано с различием физико-механических свойств тимпаноластических лоскутов, изменением соотношений микромеханики среднего уха. Таким образом, слухоулучшающие операции у больных с кондуктивной тугоухостью приводят к изменению механических свойств среднего уха, а потому крайне необходима возможность контроля результатов вмешательства при помощи оценки проводящей функции структур среднего уха, как в послеоперационном периоде, так и в некоторых случаях интраоперационно.

Немаловажное значение в настоящее время имеет также оценка состояния структур среднего уха при оперативных вмешательствах, сочетающихся с установкой в барабанной полости имплантируемых слуховых аппаратов, основанных на методике прямой стимуляции структур среднего уха [2]. Непосредственный контроль подвижности барабанной перепонки и всей цепи слуховых косточек необходим на этапах дооперационного обследования больных, идущих на данное хирургическое вмешательство, и после него; кроме того, чрезвычайно необходимы и методы контроля подвижности и условий передачи энергии реконструированной цепью слуховых косточек во время проведения таких операций.

Для измерения подвижности барабанной перепонки в модельном опыте на кошках S. M. Khanna, J. Thondorf [3] использовали голографическую интерферометрию. В дальнейшем эти опыты неоднократно повторялись в различных модельных опытах, поскольку размеры и громоздкость установки ограничивали ее применение *in vivo*. В последние годы появились многочисленные теоретические разработки механизма колебания барабанной перепонки и его моделирования [4]. При этом результаты моделирования в общем варьируют от 10 до 100 нм при различных уровнях звукового давления. В работе J. J. Rosowski et al. [5] путем весьма тщательно поставленных экспериментов продемонстрированы основные возможности по измерению подвижности барабанной перепонки и структур среднего уха *in vivo* путем лазерной доплеровской виброметрии и ее дифференциально-диагностические признаки при кондуктивной тугоухости различного генеза. Авторы использовали систему из лазерного доплеровского виброметра Polytec HLV-1000 (Polytec PI, California, USA). Однако в качестве основного результата измерений лазерная доплеровская виброметрия предлагает использование скорости движения как основной характеристики вибраций микрообъектов; вычисление же непосредственно амплитуды смещения барабанной перепонки из этих данных представляется довольно затруднительным.

В настоящее время в связи с созданием лазерных автодинов на квантово-размерных структурах появилась возможность проводить измерения микро- и нановибраций биологической ткани *in vivo*, что дает возможность с достаточной точностью провести исследования подвижности структур среднего уха.

Основная цель нашей работы: использовать лазерный автодинный метод измерения наносмещений для оценки вибрационных характеристик среднего уха при звуковой стимуляции в свободном поле, дать оценку его применению в качестве инструмента дифференциальной диагностики заболеваний уха.

**Методы.** Нами обследовано 207 человек, разделенных на 7 основных групп по наличию той или

иной патологии слуха или ее отсутствию: 50 человек без сведений о патологии уха в анамнезе и имеющих нормальный слух по данным аудиометрического обследования (контрольная группа); 65 больных с нейросенсорной тугоухостью различного генеза; 20 больных адгезивным средним отитом; 12 больных с отосклерозом; 20 больных с острым гнойным средним неперфоративным отитом; 20 больных хроническим гнойным средним отитом; 20 больных с тубоотитом. Процедура измерений проводилась в соответствии с этическими стандартами Хельсинкской декларации.

Автодинный эффект — изменение режима работы лазерного диода при возвращении части излучения обратно в его резонатор. Устройства, использующие этот принцип измерения, обладают очень высокой чувствительностью к изменениям отраженного сигнала. Путем соответствующей математической обработки по спектру автодинного сигнала определяют амплитуду нанокосильных объектов. Авторами впервые предложена система, состоящая из лазерного автодинного измерителя для измерения подвижности барабанной перепонки, как в модельных опытах, так и в клинической практике (патент РФ № 2258462) [6, 7].

Разработанный нами прибор может быть укреплен на голове обследуемого; при помощи специального устройства он может быть закреплен и на операционный микроскоп (патент РФ № 88537, № 95997). В последнем случае прибор дает возможность исследования подвижности барабанной перепонки в нескольких точках. Чувствительность разработанного нами прибора — от единиц нанометров — позволяет проводить исследования на пороге слышимости для большинства частот звукового диапазона. В более ранних публикациях нами была доказана возможность использования данного метода измерений для оценки подвижности барабанной перепонки в экспериментах и модельных опытах *in vitro* и *in vivo*. Измерения проводились в свободном звуковом поле. Для создания необходимого уровня звукового давления использовался калиброванный по измерителю уровня звукового давления генератор. Калибровка нами производилась по уровню звукового давления (УЗД), создаваемого в наружном слуховом проходе при помощи акустического зонда. Акустические измерения выполнены на аппаратуре фирмы «Briel & Kjaer».

**Результаты.** Для выявления основных закономерностей и результатов, получаемых при исследовании колебаний барабанной перепонки предложенным методом, нами были проведены клинические измерения на группе отолитически нормальных лиц (не имеющих существенных изменений на аудиограмме, с отсутствием данных о патологии уха в анамнезе и признанных отолитически здоровыми после тщательного клинического обследования), которую составили 50 человек в возрасте от 15 до 75 лет (25 мужчин и 25 женщин). В каждом случае исследование проводилось на обоих ушах, всего обследовано 100 ушей. Исследования подвижности барабанной перепонки и вибрационных свойств интактного среднего уха проводились при помощи лазерной автодинной установки, жестко фиксируемой на голове обследуемого при помощи устройства для крепления приборов. Исследовалась амплитудно-частотная вибрационная характеристика (АЧВХ) барабанной перепонки на частотах 250–4000 Гц с УЗД 30, 55, 75, 85 дБ. Полученные данные приведены на рисунке: а (для УЗД 75 дБ). Из приведенного графика можно сделать вывод, что наибольшие колебания барабан-

ная перепонка совершает при стимуляции низкими частотами, резонансные частоты выражены в зоне 800–1250 Гц. При исследовании характера изменения колебаний барабанной перепонки с нарастанием УЗД отмечалось, что амплитуда колебаний нарастает практически линейно на всех частотах, однако с различной скоростью (что отражает различный угол наклона к оси абсцисс полученной зависимости на графиках).

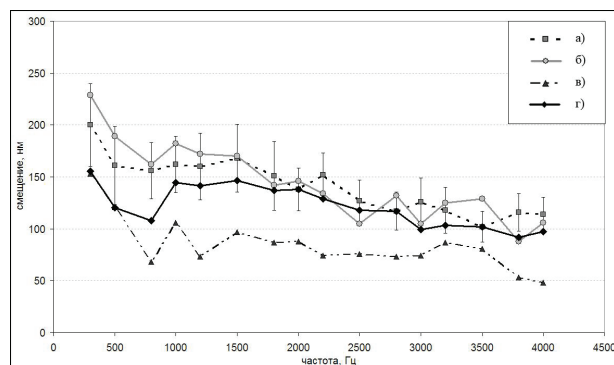
При сравнении АЧВХ в различных возрастных группах (сформировано 3 подгруппы с возрастным интервалом 20 лет) не было обнаружено статистически значимых отличий, что свидетельствует об отсутствии возрастных изменений в микромеханике среднего уха с возрастом у отолитически нормальных лиц.

Для установления клинических дифференциально-диагностических критериев патологии среднего и внутреннего уха при использовании для диагностики лазерного автодинного метода нами было проведено исследование нескольких групп больных с различной патологией уха. Всем больным проводилось тщательное аудиологическое и клиническое обследование, а также измерение подвижности барабанной перепонки по оригинальным авторским методикам. Нами проводилось измерение АЧВХ барабанной перепонки при уровнях звукового давления в 75 и 85 дБ, а также исследовалась зависимость нарастания амплитуды смещения колебаний барабанной перепонки от роста уровня звукового давления на частоте 1000 Гц.

Исследована подвижность барабанной перепонки предложенным нами методом у 20 больных адгезивным отитом (12 женщин, 8 мужчин). Из них тугоухость I степени отмечена у 8 обследованных, II степени — у 8, III степени — у 4. У больных с адгезивным отитом отмечается выраженное уменьшение смещения барабанной перепонки, регистрируемое во всех случаях. При этом форма кривой на графике АЧВХ смещения барабанной перепонки повторяет форму кривой воздушной проводимости на аудиограмме. Различия амплитуды смещения барабанной перепонки по сравнению с отолитически нормальными лицами являются статистически значимыми (рисунок: в). Кривая нарастания амплитуды колебания барабанной перепонки на частоте 1000 Гц заметно более пологая, чем средняя кривая в группе отолитически нормальных лиц.

Обследовано 65 больных с нейросенсорной тугоухостью различного генеза (25 женщин, 15 мужчин). Из них тугоухость I степени отмечалась у 10 больных, II степени — у 25, III степени — у 30 лиц. На основании результатов этих исследований можно сделать вывод о том, что у больных с нейросенсорной тугоухостью не наблюдается выраженных изменений колебательной способности барабанной перепонки. В сравнении с результатом, полученным у здоровых лиц, амплитудно-частотная характеристика не выходит за пределы нормы (рисунок: б). В отличие от больных адгезивным отитом форма кривой на графике АЧВХ смещения барабанной перепонки не адекватна форме кривой воздушной проводимости на аудиограмме.

При отосклерозе (группа больных представлена 12 больными, с изменениями на аудиограмме, характерными для кондуктивной тугоухости) не отмечается столь выраженного изменения нарастания амплитуды смещения колебаний и снижения амплитуды колебаний на АЧВХ перепонки, как при адгезивных



Средние АЧХ среднего уха человека в различных группах обследованных при измерениях в частотном диапазоне 250–4000 Гц со стимуляцией в свободном звуковом поле (УЗД=75 дБ в наружном слуховом проходе): а — отолитически нормальные лица (показана граница статистически незначимых отклонений от кривой); б — сенсоневральная тугоухость; в — адгезивный средний отит; г — отосклероз

процессах. В этих случаях кривая АЧВХ не отличается статистически значимо от таковой у здоровых лиц, несмотря на прослеживающуюся тенденцию к некоторому уменьшению амплитуды колебаний на низких частотах (различия в группах статистически значимы только на частотах 250–750 Гц, рисунок: е).

Исследования, проведенные нами у больных с острым гнойным средним неперфоративным отитом (20 человек), показывают, что имеется значительное снижение амплитуды колебания барабанной перепонки в разгар заболевания. При этом снижение амплитуды колебаний происходит практически на всех частотах звукового спектра, больше всего — в зоне низких и средних частот. Различия с группой отолитически нормальных лиц статистически значимы.

У лиц, страдающих хроническим гнойным средним отитом, при исследовании обнаружены (обследовано 20 человек), довольно значительные изменения в колебательной способности остатков барабанной перепонки, коррелирующие с размером перфорации в барабанной перепонке. Так, при сравнительно небольших перфорациях барабанной перепонки наблюдается нормальная кривая либо незначительное повышение амплитуды колебаний барабанной перепонки на низких частотах. При наличии значительных перфораций (занимающих 25–30%) площади барабанной перепонки отмечается значительное повышение колебаний остатков барабанной перепонки. В данном случае отсутствует корреляция с данными тональной пороговой аудиометрии. Это можно объяснить тем, что при нарушении анатомической целостности барабанной перепонки амплитуда колебания ее свободных краев значительно увеличивается, наличие кондуктивной тугоухости у данных пациентов в основном определяется в таком случае не столько перфорацией барабанной перепонки, сколько отсутствием градиента давления при действии звуковой волны.

Интерес представляют исследования, выполненные у больных с тубоотитом (евстахеитом). Исследования проводились у больных (всего обследовано 20 чел.) с выраженной клинической симптоматикой тубоотита — субъективными ощущениями заложенности уха, снижением слуха и шумом в ухе, аутофонией; отрицательными результатами пробы Вальсальвы и продувания по Политцеру; наличием по данным аудиометрии кондуктивной тугоухости с костно-воздушным интервалом не менее 20–25 дБ.

При этом были выявлены изменения АЧВХ барабанной перепонки, коррелирующие с выраженностью изменений на аудиограмме и заключающиеся в понижении амплитуды колебаний барабанной перепонки, некотором изменении нарастания амплитуды колебаний барабанной перепонки относительно здоровых лиц. В данном случае также проводилась специальная проба на проходимость слуховой трубы. При подаче зондирующего тона в исследуемое ухо (частотой 1500–2000 Гц) интенсивностью 75–85 дБ и выполнении обследуемым пробы Вальсальвы на графике спектрограммы сигнала автодина, исследуемого в реальном времени, не появлялось резких изменений спектрограммы, свидетельствующих о нарушении гармонического характера колебаний барабанной перепонки (т.е. о проходимости слуховой трубы). При неизменности картины в данном случае (непроходимости слуховой трубы) выполнялась проба Политцера. Выполнение указанных проб при данном исследовании проходимости слуховой трубы дает возможность классифицировать проходимость слуховой трубы на несколько степеней. Предложенный способ является объективной регистрацией степени проходимости слуховой трубы (патент РФ № 2388406).

**Обсуждение.** Полученные в результате исследования данные дополняют и уточняют известную ранее информацию о подвижности структур среднего уха. В сравнении с данными, изложенными в литературе прошлого столетия [8], отмечается значительно меньший размах колебаний барабанной перепонки, однако полученные результаты намного превосходят данные G. Bekesy, ввиду того что последние были получены не путем прямых измерений, а при помощи аппроксимации на область малых значений данных, полученных при натуральных измерениях значительных амплитуд смещения барабанной перепонки. Наши результаты в целом хорошо согласуются с современными данными, полученными с помощью лазерной доплеровской виброметрии J. J. Rosowski и S. Merchant [5]. В наших опытах отмечена несколько большая амплитуда подвижности барабанной перепонки, чем у Rosowski [et al.] [5]; результаты исследования при патологии среднего уха сходны, хотя в целом результаты этих исследований тяжело сравнивать с нашими из-за значительной разницы использованных методик измерения. Наиболее сходными с нашими являются данные измерения *in vitro* при помощи чувствительного магнитометра [9]. Кроме того, указанные результаты измерений хорошо согласуются с полученными методами математического моделирования результатами H. Wada [4]. Поведение барабанной перепонки с перфорацией аналогично изложенному в литературе модельному эксперименту [10].

**Заключение.** Таким образом, лазерный автодинный метод измерения наносмещений барабанной перепонки является весьма перспективным методом получения информации о состоянии структур среднего уха человека, что позволяет внести его в число методов объективной оценки слуховой функции и рекомендовать к внедрению в клиническую практику.

**Конфликт интересов.** Исследование проведено при поддержке гранта «УМНИК» ФС МП НТС. Правообладателями патентов на описанные в публикации методики и устройства являются авторы статьи.

**Библиографический список**

1. Тарасов Д. И., Лебедев В. П., Токарев О. П. Тугоухость у детей. М., 1984. 239 с.
2. Hough J. Middle ear electromagnetic implantable hearing device-initial clinical results / R. Dyer, K. Dormer, P. Matthews [et al.] // The Function and Mechanics of Normal, Diseased and Reconstructed Middle Ears / J. Rosowski and S. Merchant (Eds). Netherlands: Kugler Publications, 2000. P. 353–366.
3. Tonndorf J., Khanna S. M. Submicroscopic displacement amplitudes of the tympanic membrane (cat) measured by a laser interferometer // J. Acoust. Soc. Amer. 1968. Vol. 44. P. 1546–1554.
4. Wada H., Kobayashi T. Dynamic frequency characteristics of the middle ear in guinea pig: the finite-element analysis // Audiology Japan. 2002. Vol. 45. № 4. P. 289–297.
5. Rosowski J. J., Mehta R. P., Merchant S. N. Diagnostic Utility of Laser-Doppler Vibrometry in Conductive Hearing Loss with Normal Tympanic Membrane // Otol. Neurotol. 2004. Vol. 25 (3). P. 323–332.
6. Мареев О. В., Усанов Д. А., Скрипаль А. В. Результаты использования метода лазерного автодинного измерения смещения барабанной перепонки а дифференциальной диагностике патологии среднего уха // Медицинский альманах. 2008. № 3. С. 49–51.
7. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Добдин С. Ю. Определение ускорения при микро- и наносмещениях по автодинному сигналу полупроводникового лазера на квантово-размерных структурах // ПЖТФ. 2010. Т. 36, вып. 21. С. 78–84.
8. Кобрак Г. Среднее ухо. М.: Медгиз. 1963. 455 с.
9. Sosa M., Carneiro A. A. O., Baffa O., Colafemina J. F. Human ear tympanum oscillation recorded using a magneto-resistive sensor // Rev. Sci. Instrum. 2002. Vol. 73. P. 3695–3695.
10. Voss S. E., Rosowski J. J., Merchant S. N., Peake W. T. Middle-ear function with tympanic-membrane perforations. II.: A simple model // The Journal of the Acoustical Society of America. 2001. Vol. 110, issue 3. P. 1445–1452.

**Translit**

1. Tarasov D. I., Lebedev V. P., Tokarev O. P. Tugouhost' u detej. M., 1984. 239 s.
2. Hough J. Middle ear electromagnetic implantable hearing device-initial clinical results / R. Dyer, K. Dormer, P. Matthews [et al.] // The Function and Mechanics of Normal, Diseased and Reconstructed Middle Ears / J. Rosowski and S. Merchant (Eds). Netherlands: Kugler Publications, 2000. P. 353–366.
3. Tonndorf J., Khanna S. M. Submicroscopic displacement amplitudes of the tympanic membrane (cat) measured by a laser interferometer // J. Acoust. Soc. Amer. 1968. Vol. 44. P. 1546–1554.
4. Wada H., Kobayashi T. Dynamic frequency characteristics of the middle ear in guinea pig: the finite-element analysis // Audiology Japan. 2002. Vol. 45. № 4. P. 289–297.
5. Rosowski J. J., Mehta R. P., Merchant S. N. Diagnostic Utility of Laser-Doppler Vibrometry in Conductive Hearing Loss with Normal Tympanic Membrane // Otol. Neurotol. 2004. Vol. 25 (3). P. 323–332.
6. Mareev O. V., Usanov D. A., Skripal' A. V. Rezul'taty ispol'zovaniya metoda lazernogo avtodinnogo izmerenija smewenija barabannoj pereponki a differencial'noj diagnostike patologii srednego uha // Medicinskij al'manah. 2008. № 3. С. 49–51.
7. Usanov D. A., Skripal' A. V., Dobdin S. Ju. Opredelenie uskorenija pri mikro- i nanosmewenijah po avtodinnomu signalu poluprovodnikovogo lazera na kvantovo-razmernyh strukturah // PZhTF. 2010. Т. 36, vyp. 21. S. 78–84.
8. Kobrak G. Srednee uho. M.: Medgiz. 1963. 455 s.
9. Sosa M., Carneiro A. A. O., Baffa O., Colafemina J. F. Human ear tympanum oscillation recorded using a magneto-resistive sensor // Rev. Sci. Instrum. 2002. Vol. 73. R. 3695–3695.
10. Voss S. E., Rosowski J. J., Merchant S. N., Peake W. T. Middle-ear function with tympanic-membrane perforations. II.: A simple model // The Journal of the Acoustical Society of America. 2001. Vol. 110, issue 3. R. 1445–1452.