ISSN 1812-5123. Российский журнал биомеханики. 2012. Т. 16, № 1 (55): 8–21

Российский Журнал Биомеханики
www.biomech.ru

УДК 531/534:[57+61]

ЛАЗЕРНЫЕ АВТОДИННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЙ БАРАБАННОЙ ПЕРЕПОНКИ

Д.А. Усанов[1], О.В. Мареев[2], А.В. Скрипаль[1], Г.О. Мареев[2]

[1] Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Россия, 410012, Саратов, ул. Астраханская, 83, e-mail: UsanovDA@info.sgu.ru, skripalav@info.sgu.ru
[2] Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского Минздравсоцразвития России, Россия, 410012, Саратов, ул. Б. Казачья, 112, e-mail: ovmareew@mail.ru, jey_trasher@mail.ru

Аннотация. В работе по результатам измерений с помощью полупроводникового лазерного автодина нанометровых смещений иследованы механические свойства барабанной перепонки в норме и при патологических изменениях. По результатам измерений амплитудно-частотных характеристик колебаний барабанной перепонки показана возможность диагностирования нарушений передаточной функции в цепи «барабанная перепонка – слуховые косточки». Установлены различия между амплитудно-частотными зависимостям барабанной перепонки и графиками нарастания амплитуды колебаний барабанной перепонки в зависимости от уровня звукового давления при адгезивных процессах, при сенсоневральной тугоухости и в норме. Экспериментально установлено наличие продольного смещения барабанной перепонки на фоне вибраций, возбуждаемых периодическим звуковым воздействием. Установлено, что при увеличении интенсивности звукового воздействия на барабанную перепонку в спектре механических колебаний происходит появление субгармонических составляющих. Проведенные исследования позволяют установить условия возбуждения нормальных колебаний барабанной перепонки и порога адекватного восприятия звукового сигнала.

Ключевые слова: биомеханика, барабанная перепонка, лазерный автодин, спектр колебаний, субгармоника.

ВВЕДЕНИЕ

Автодинные системы (системы с самовозбуждаемым колебательным контуром) нашли применение для контроля перемещений. В частности, продемонстрирована их высокая чувствительность к микро- и нановибрациям и смещениям [6, 12, 15, 18]. Кроме того, описаны способы измерений сверхмалых скоростей теплового расширения твердых тел, проводимых на основе анализа низкочастотного спектра автодинного сигнала [13, 22]. Если величина смещения поверхности объекта оказывается существенно меньше длины волны лазерного излучения, то применяют метод наложения дополнительных колебаний с известными характеристиками [13, 14].

Тот факт, что смещение барабанной перепонки при воздействии на нее звукового давления находится в пределах нескольких десятков и сотен нанометров, позволяет продемонстрировать преимущества и точность лазерного автодина как средства диагностики параметров движений биологических объектов.

© Усанов Д.А., Мареев О.В., Скрипаль А.В., Мареев Г.О., 2012
Усанов Дмитрий Александрович, д.ф.-м.н., проректор по НИР, академик МАН ВШ, профессор, зав. кафедрой физики твердого тела, Саратов
Мареев Олег Вадимович, д.м.н., профессор, зав. кафедрой оториноларингологии, Саратов
Скрипаль Анатолий Владимирович, д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой медицинской физики, Саратов
Мареев Глеб Олегович, к.м.н., ассистент кафедры оториноларингологии, Саратов

Известные в настоящее время контактные методы определения амплитуды колебаний барабанной перепонки [20, 21, 23] обладают низкой степенью точности, а лазерный допплеровский виброметр *Polytec HLV*–1000 (*Polytec PI*, *California*, *USA*) не откалиброван для проведения измерений амплитуд нанометровых вибраций [19]. В качестве основного результата измерений допплеровский виброметр *Polytec HLV*–1000 предполагает использование определения скорости движения – как основной характеристики вибраций микрообъектов; вычисление же непосредственно величины смещения барабанной перепонки из этих данных в нанометровом диапазоне описано не было и может оказаться довольно затруднительным.

В настоящее время для измерения величины нановибраций и смещений с помощью лазерного автодина разработаны методики, основанные на анализе низкочастотного спектра автодинного сигнала [5, 9, 11, 12]. Было показано, что при воздействии звукового давления в низкочастотном спектре появляются гармонические составляющие, кратные основной частоте колебаний контролируемого участка барабанной перепонки, по отношению которых можно определить амплитуду колебаний перепонки [8]. Анализ изменения низкочастотного спектра автодинного сигнала позволит определить динамическое состояние барабанной перепонки.

Определение амплитудно-частотной зависимости колебаний барабанной перепонки

Немаловажное значение в настоящее время имеет 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 [17]. Именно этот метод завоевывает все большую популярность для целей электроакустической коррекции слуха у больных тугоухостью. 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 [1–3, 7, 16].

Экспериментальное определение амплитуд колебаний барабанной перепонки проводилось с использованием автодинной измерительной системы [3], схема которой приведена на рис. 1.

В состав измерительной автодинной системы входит лазерный диод *RLD*–650 (*2*) на квантоворазмерных структурах с длиной волны излучения 652 нм. На барабанную перепонку (*1*) направляют когерентное излучение от лазерного диода (*2*), запитываемого от источника тока (*3*). Для обеспечения прямой видимости барабанной перепонки используют расширительную воронку. Отраженное от барабанной перепонки лазерное излучение регистрируется с помощью фотоприемника (*4*). Сигнал с фотоприемника поступает через широкополосный усилитель, содержащий фильтр переменного сигнала (*5*), на вход аналого-цифрового преобразователя *6* компьютера (*7*). Для возбуждения колебаний барабанной перепонки используется излучатель звуковых волн (*9*), работающий от генератора звуковых колебаний (*8*).

Исследования амплитудно-частотной характеристики барабанной перепонки проводились на препарированном слуховом аппарате свиньи. Для этого извлекалась пирамида височной кости, содержащая барабанную полость, и часть височной кости с улиткой. Вскрывался ушной проход для обеспечения прямой видимости барабанной перепонки и возможности контроля фокусировки лазерного излучения, при этом герметичность улитки не нарушалась, что позволило получить данные об амплитудно-частотных характеристиках барабанной перепонки у живых особей *in vitro*.

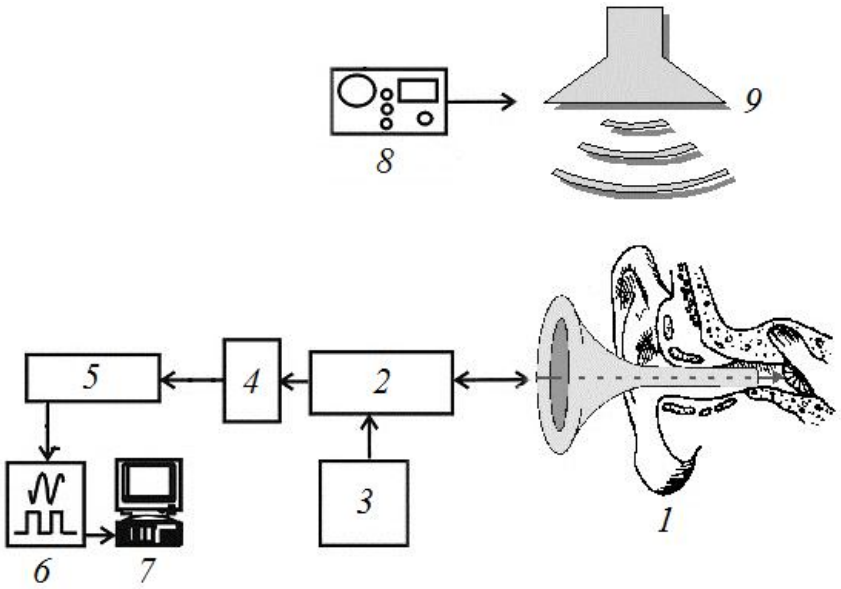

Рис. 1. Схема измерительной установки. *1* – барабанная перепонка с расширительной воронкой, *2* – лазерный диод на квантоворазмерных структурах, *3* – источник тока лазерного диода, *4* – фотоприемник, *5* – широкополосный усилитель, содержащий фильтр переменного сигнала, *6* – аналого-цифровой преобразователь, *7* – компьютер, *8* – генератор звуковых колебаний, *9* – излучатель звуковых волн

В процессе измерений регистрировалась амплитудно-частотная характеристика барабанной перепонки в низкочастотной области спектра от 200 Гц до 1,5 кГц. Для обеспечения достоверности полученных результатов была проведена предварительная калибровка генератора сигналов звуковой частоты и излучателя звуковых волн. В ходе калибровки было установлено, что в выбранном диапазоне частот амплитудно-частотных характеристик используемых приборов имеет линейный горизонтальный (равномерный) характер, что исключает необходимость приведения полученных амплитудно-частотных характеристик в соответствие с амплитудно-частотными характеристиками измерительного оборудования. Использование в установке широкополосного усилителя переменного сигнала обеспечило отсутствие искажения спектра автодинного сигнала. Это позволило проводить измерения в выбранном диапазоне частот без последующей нормировки полученных результатов, что способствовало уменьшению погрешности измерений и повышению их достоверности.

На рис. 2 приведен зарегистрированный автодинный сигнал (*а*) и его спектр (*б*) при уровне звукового давления на барабанную перепонку, превышающем порог слышимости на 50 дб, при частоте звукового воздействия 420 Гц. Как видно из рис. 2, *б*, в спектре автодинного сигнала максимальную амплитуду имеет гармоника, соответствующая утроенной частоте колебаний излучателя звуковых волн.

На рис. 3 приведена зарегистрированная АЧХ слухового аппарата в диапазоне от 200 Гц до 1,5 кГц при уровнях звукового давления, превышающих порог слышимости на 50 и 60 дб.

Из рис. 3 видно, что в низкочастотной области амплитудно-частотной характеристики барабанной перепонки с присоединенными слуховыми косточками наблюдаются четыре максимума, соответствующие четырем резонансным частотам данной системы – 375, 475, 550 и 675 Гц. С увеличением интенсивности звукового воздействия значительно увеличивается амплитуда колебаний барабанной перепонки на частоте близкой к 550 Гц, а положение максимума незначительно смещается в область низких частот. Рост амплитуды колебаний происходит также на частоте 675 Гц.

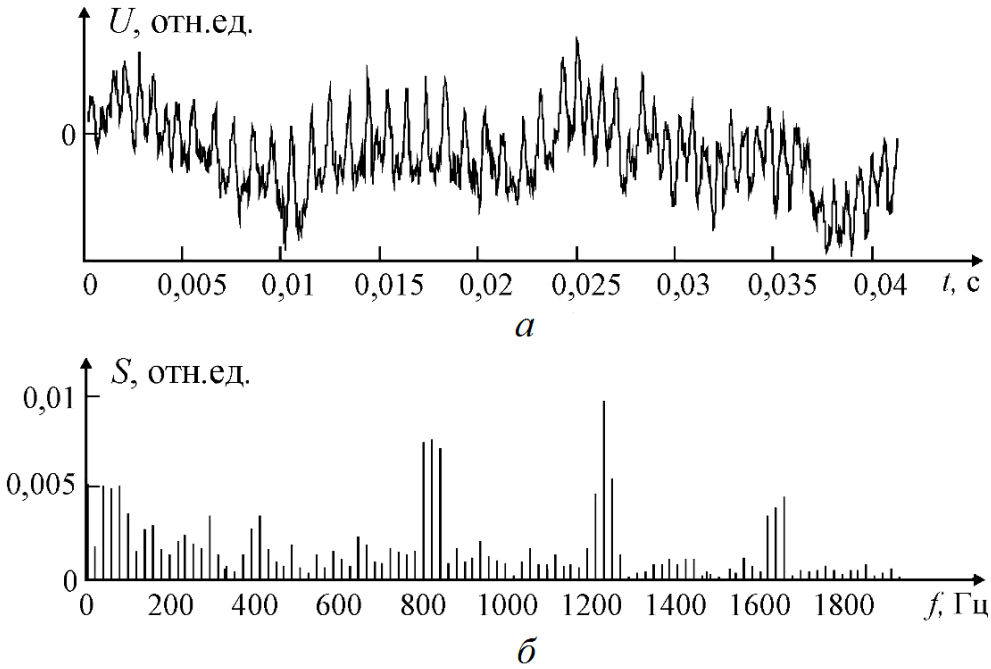

Рис. 2. Автодинный сигнал (*а*) при уровне звукового давления на барабанную перепонку, превышающем порог слышимости на 50 дб, при частоте звукового воздействия 420 Гц, и его спектр (*б*)

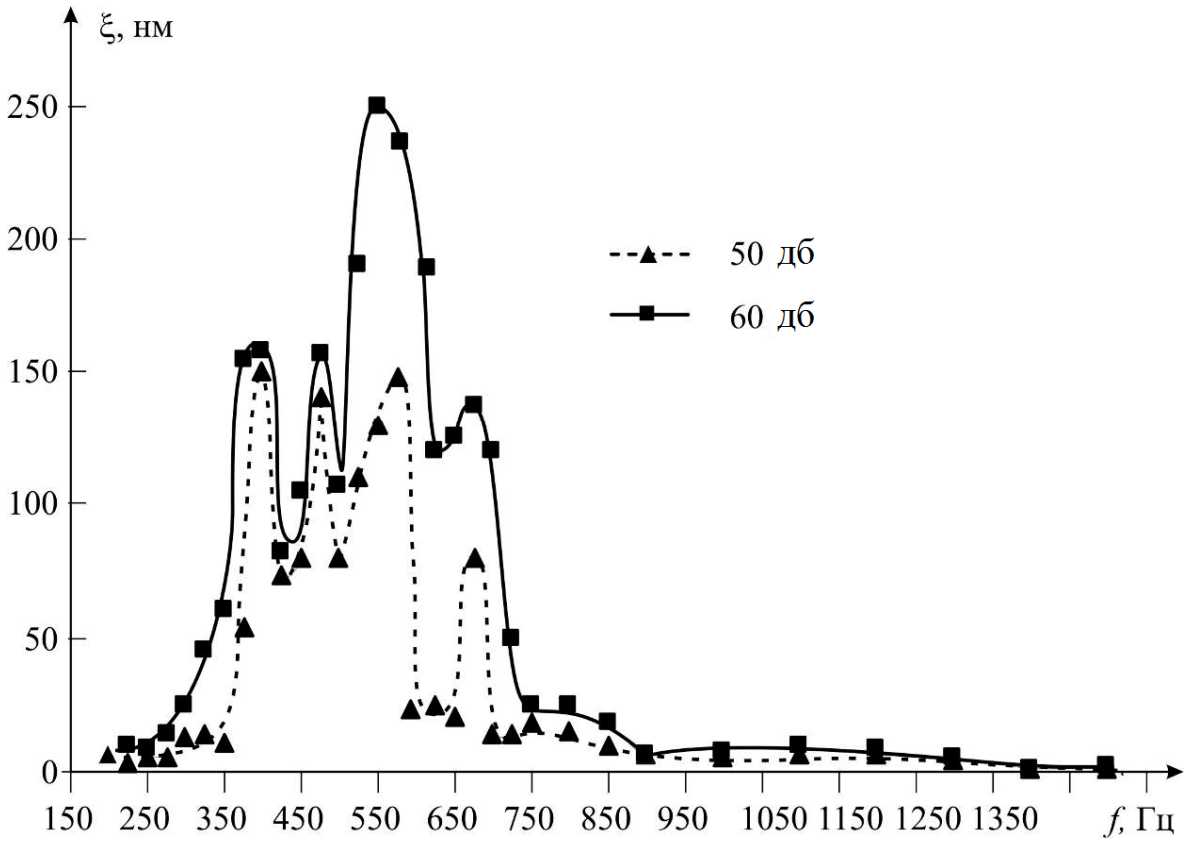

Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика слухового аппарата в диапазоне от 200 Гц до 1,5 кГц при уровнях звукового давления, превышающих порог слышимости на 50 и 60 дб

Амплитуда колебаний барабанной перепонки на остальных частотах возрастает незначительно. На частоте воздействия 550 Гц при уровне звукового давления, превышающем порог слышимости на 60 дб, максимальная зарегистрированная амплитуда составила 257 нм.

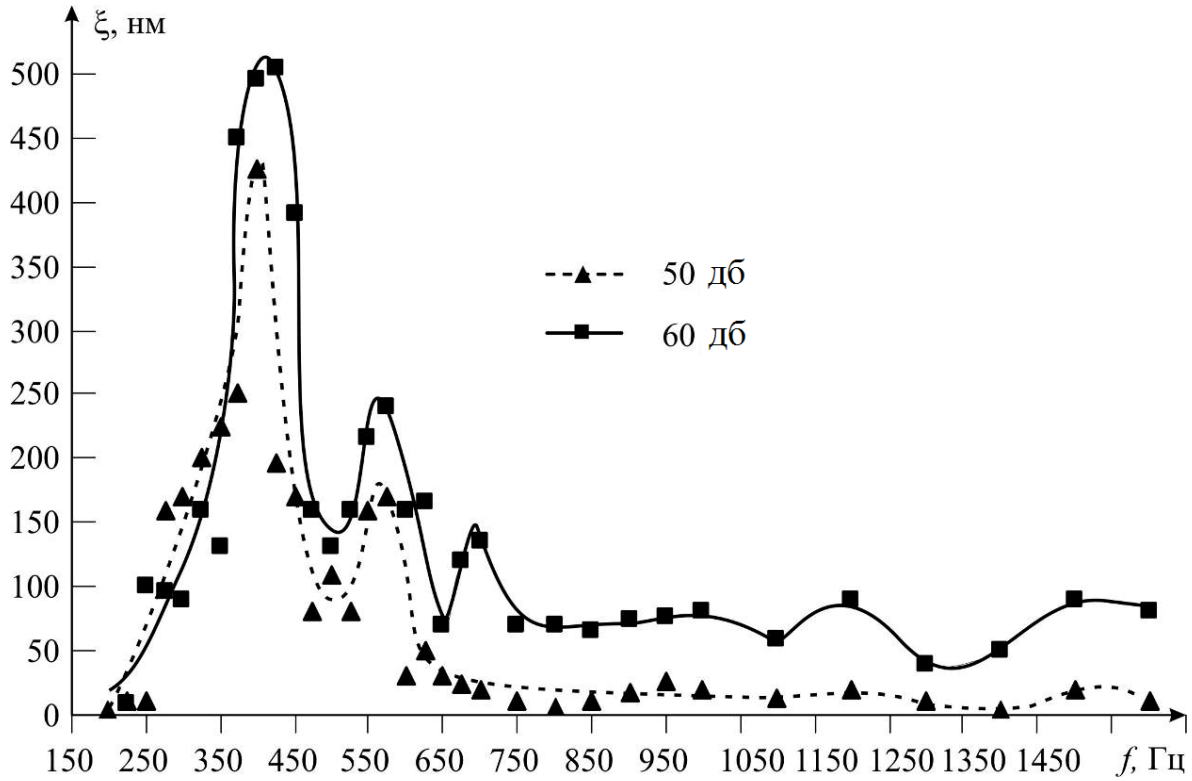

Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика барабанной перепонки в диапазоне от 200 Гц до 1,5 кГц при уровнях звукового давления, превышающих порог слышимости на 50 и 60 дб

Дополнительно проводились исследования амплитудно-частотной характеристики барабанной перепонки в «свободном» состоянии: для этого слуховые косточки отсоединялись от барабанной перепонки, разрыв производился между молоточком и наковальней. На рис. 4 приведена зарегистрированная амплитудно-частотная характеристика барабанной перепонки в диапазоне от 200 Гц до 1,5 кГц при уровнях звукового давления, превышающих порог слышимости на 50 и 60 дб.

Из результатов, приведенных на рис. 4, видно, что для «свободной» барабанной перепонки при уровне звукового давления, превышающем порог слышимости на 50 дб, наиболее выраженные максимумы амплитуды колебаний наблюдаются на частотах 370 и 575 Гц, с увеличением звукового давления на 10 дб. В этом случае можно говорить о равномерном увеличении амплитуды колебаний барабанной перепонки во всей области исследуемых частот, за исключением области вблизи 700 Гц, где наблюдается появление дополнительной резонансной частоты. Максимальная зарегистрированная амплитуда составила 505 нм на частоте воздействия 425 Гц при уровне звукового давления, превышающем порог слышимости на 60 дб.

Из сопоставления амплитудно-частотной характеристики барабанной перепонки для случая целостного слухового аппарата и случая с разрывом в цепи «барабанная перепонка – слуховые косточки» можно сделать вывод, что по спектральной картине амплитудного отклика барабанной перепонки на звуковую нагрузку различной интенсивности возможно диагностирование нарушения передаточной функции в цепи «барабанная перепонка – слуховые косточки». Амплитудный отклик контролировался по спектру сигнала полупроводникового лазерного излучателя на квантоворазмерных структурах, работающего в автодинном режиме.

Кроме того, можно предположить возможность диагностирования изменения эластичности и ороговения тканей барабанной перепонки при понижении слуховой функции пациента, что проявится в снижении регистрируемых величин амплитудного

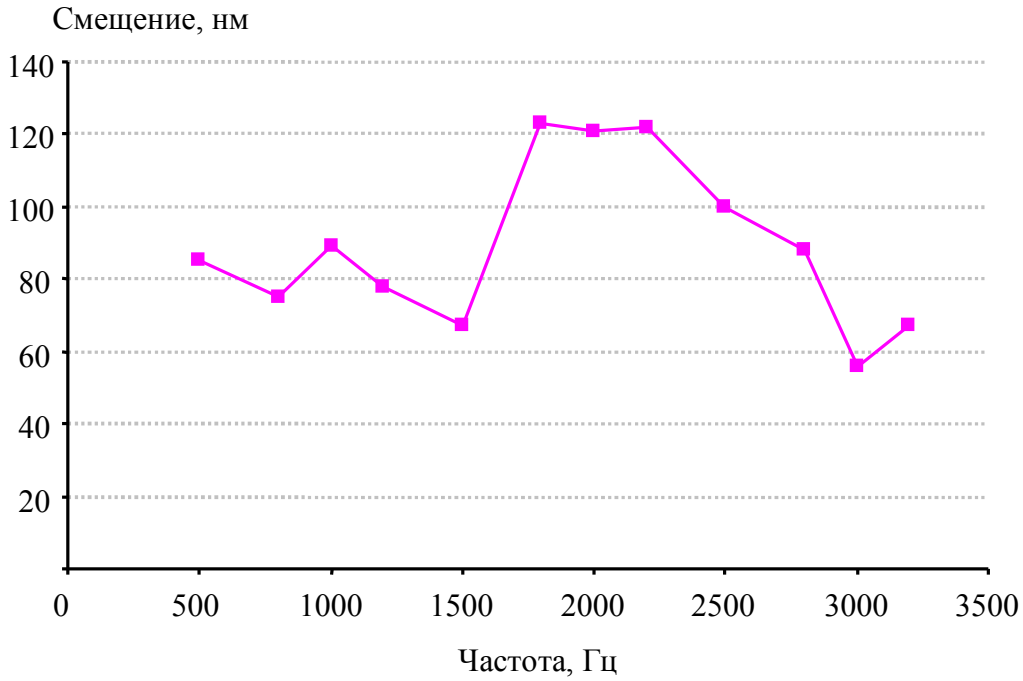

Рис. 5. Амплитудно-частотная вибрационная характеристика барабанной перепонки свежего препарата височной кости (уровень звукового давления 75 дб)

отклика на соответствующую звуковую нагрузку, исчезновении ярко выраженных максимумов амплитудно-частотной характеристики барабанной перепонки и изменении их частотного положения. Данное предположение требует проведения дальнейших клинических исследований.

Проводились также модельные опыты на свежих височных костях человека. При этом оценивалась амплитудно-частотная вибрационная характеристика барабанной перепонки в зоне *umbo*, а также нарастание амплитуды смещения в зависимости от уровня звукового давления. Результаты измерений показаны на рис. 5.

Как видно из графика, при больших уровнях звукового давления амплитуда колебаний барабанной перепонки на различных частотах лежит в интервале значений порядка 80–200 нм и имеет тенденцию к уменьшению в области высоких частот.

Проведены исследования *in vivo* на лицах без патологии слуха (15 чел.), у больных, страдающих сенсоневральной тугоухостью (10 чел.), а также в случае наличия адгезивного отита. Перед исследованием у всех лиц было проведено тщательное клиническое и аудиологическое обследование.

Исследования проводились в звукозаглушенной комнате. Исследовалось возбуждение барабанной перепонки в свободном звуковом поле. Уровень звукового давления в наружном слуховом проходе регистрировался при помощи измерительной аппаратуры фирмы «*Bruel & Kjaer*». Исследование при подаче сигнала с уровнем громкости 85 дб при его кратковременном воздействии обычно не вызывает явлений слухового дискомфорта у здоровых лиц [4]. Исследование также проводилось в зоне *umbo* барабанной перепонки.

Исследовалась характеристика нарастания амплитуды смещения барабанной перепонки при повышении уровня звукового давления на частотах 500, 1000, 2000, 4000 Гц в диапазоне уровня звукового давления от 25 до 85 дб (рис. 6).

Можно сделать вывод о близком к линейному закону нарастания амплитуды колебаний барабанной перепонки на всех частотах.

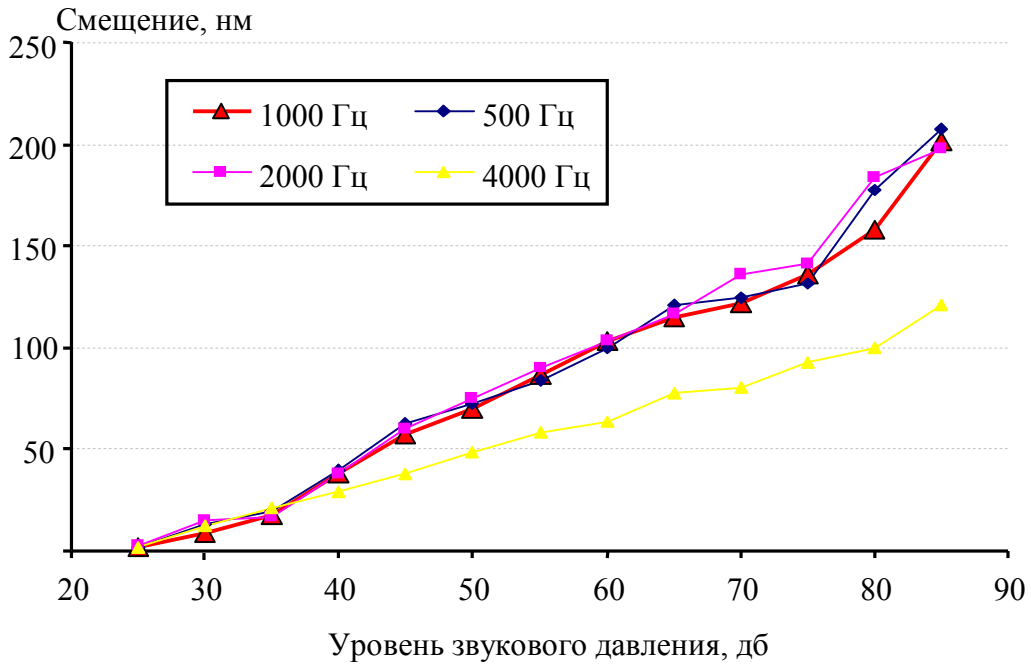

Рис. 6. Зависимость нарастания амплитуды смещения барабанной перепонки при повышении уровня звукового давления на различных частотах

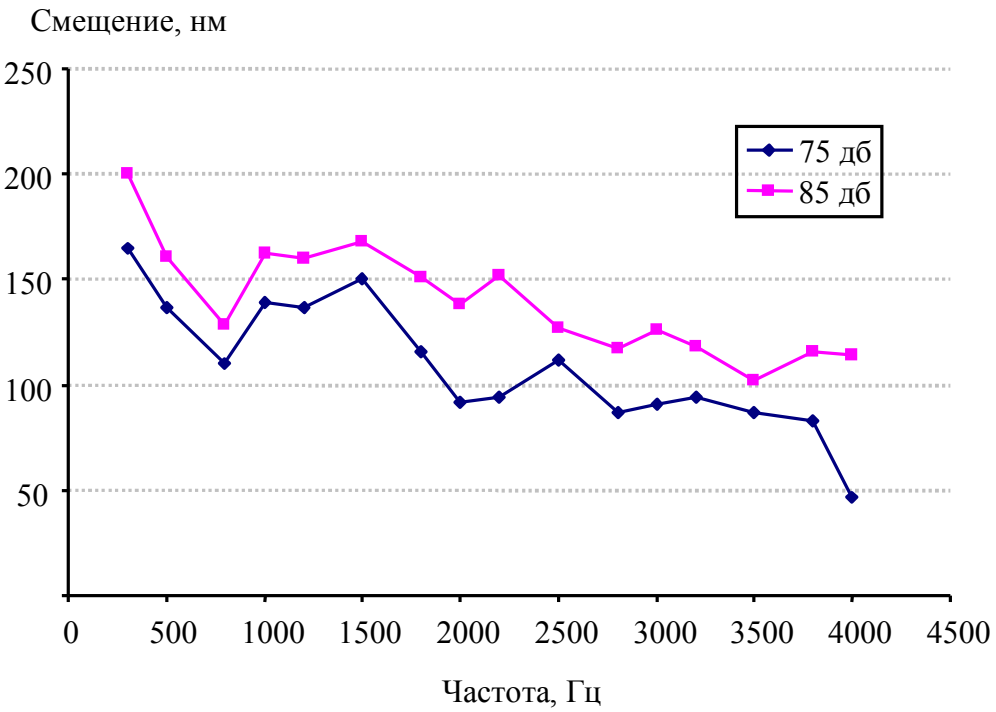

Рис. 7. Средняя амплитудно-частотная вибрационная характеристика барабанной перепонки у здоровых лиц, измеренная при уровнях громкости в 75 и 85 дб

На рис. 7 приведена вибрационная амплитудно-частотная характеристика барабанной перепонки у здоровых лиц, измеренная при уровнях громкости в 75 и 85 дб.

Как следует из приведенных на этом рисунке реузультатов, амплитуда колебаний барабанной перепонки лежит в интервале от 60 до 200–250 нм на различных частотах, с тенденцией к значительному снижению на высоких частотах. У лиц с сенсоневральной тугоухостью (по данным клинического и аудиологического обследования) не было обнаружено значимых отклонений от результатов, полученных в группе здоровых лиц.

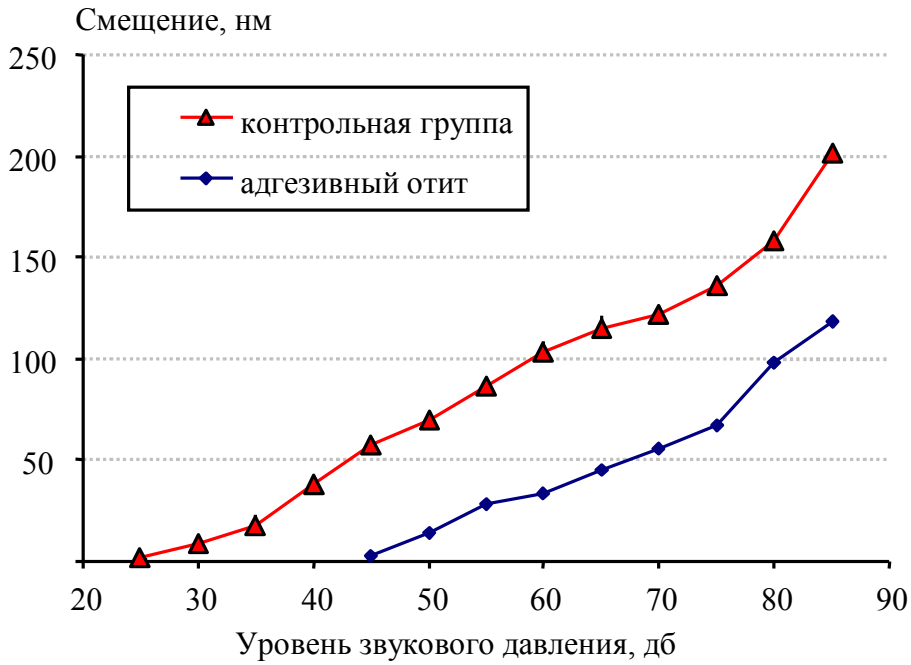

Рис. 8. Зависимость амплитуды смещения колебаний барабанной перепонки при адгезивных процессах на частоте 1000 Гц в сравнении со средним результатом контрольной группы

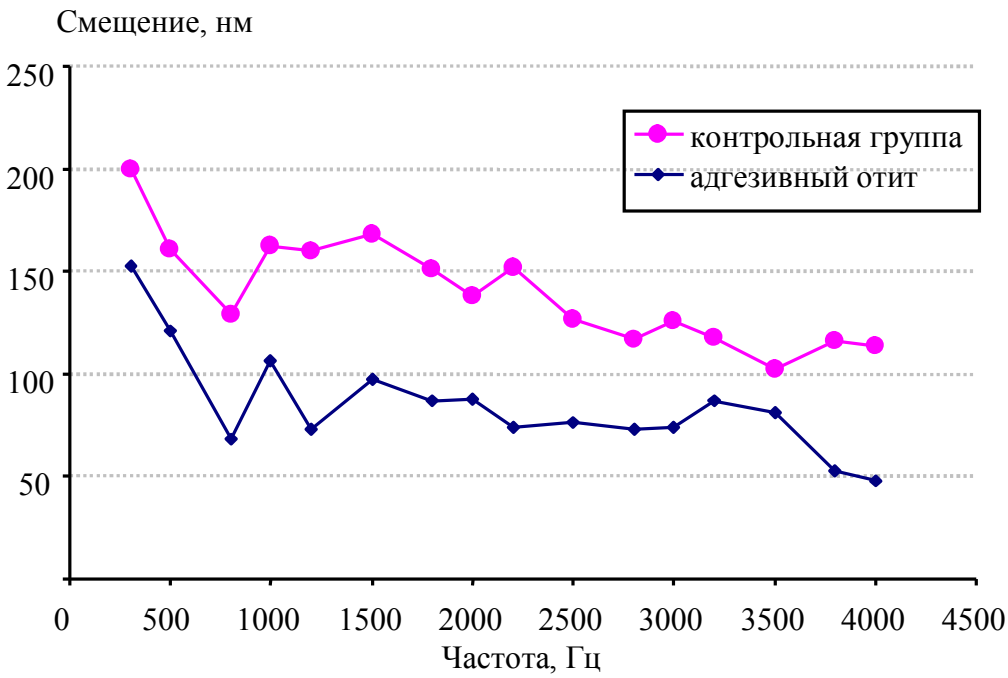

Рис. 9. Амплитудно-частотная вибрационная характеристика барабанной перепонки при адгезивном отите, измеренная при уровнях громкости в 85 дб в сравнении со средним результатом контрольной группы

На рис. 8 показана зависимость нарастания амплитуды смещения колебаний барабанной перепонки при адгезивных процессах на частоте 1000 Гц в сравнении со средним результатом контрольной группы.

Видно, что нарастание амплитуды при адгезивных процессах происходит более медленными темпами, кроме того при низких уровнях звукового давления не удается зафиксировать движения барабанной перепонки. При исследовании амплитудно-частотной характеристики у пациентов с адгезивным отитом наблюдается падение амплитуды колебаний барабанной перепонки относительно здоровых лиц, более выраженное в зоне средних и высоких частот (рис. 9). При адгезивном отите происходит

снижение подвижности всей звукопроводящей цепи, либо ее отдельных элементов; чаще всего, рубцовые спайки, локализующиеся в барабанной полости, нарушают подвижность цепи слуховых косточек, фиксируя их к стенкам барабанной полости. Подобные явления нарушают упругость и подвижность всей системы и хорошо регистрируются при помощи лазерного автодинного измерителя в области *umbo* барабанной перепонки, куда и прикрепляется рукоятка молоточка. При тимпаносклерозе (заполнение рубцовой тканью барабанной полости, с приращением к медиальной стенке барабанной перепонки) отмечается значительное снижение амплитуды колебаний барабанной перепонки во всех отделах.

Учитывая изложенные данные, можно сделать вывод о применимости лазерного автодинного измерителя вибраций в клинических исследованиях, а также о его будущей значимости в фундаментальных исследованиях механики среднего уха. В частности, при сопоставлении амплитудно-частотных характеристик барабанной перепонки для случая целостного слухового аппарата и случая наличия адгезивных процессов в среднем ухе можно сделать вывод о том, что наличие видимых изменений в амплитудно-частотной характеристике при адгезивных процессах, а также изменение графиков нарастания амплитуды колебаний барабанной перепонки в зависимости от уровня звукового давления в отличие от таковых в норме и при сенсоневральной тугоухости делает данный метод применимым для дифференциальной диагностики этих процессов.

Исследование продольного смещения барабанной перепонки

Для исследования продольного сдвига от положения равновесия при увеличении уровня звукового давления была использована измерительная установка, схема которой приведена на рис. 1, и методика определения нанометровых перемещений отражателя по спектру автодинного сигнала полупроводникового лазера, изложенная ранее.

При проведении измерений на частоте звукового воздействия 550 Гц уровень звукового давления равномерно повышался от 20 до 60 дб и с помощью аналого-цифрового преобразователя автодинный сигнал непрерывно фиксировался в виде файла. Далее зафиксированный файл был обработан в соответствии с выбранной методикой решения обратной задачи. На рис. 10 приведены участки зафиксированного автодинного сигнала полупроводникового лазера при увеличении интенсивности звукового воздействия на барабанную перепонку.

При увеличении уровня звукового воздействия амплитуда колебаний барабанной перепонки возрастает. На рис. 11 приведена экспериментально зафиксированная зависимость амплитуды колебаний барабанной перепонки ξ от величины звукового давления излучателя звуковых волн в дб.

Информация о величине продольного смещения барабанной перепонки получалась из найденных в результате решения обратной задачи значений стационарного набега фазы автодинного сигнала. Предложенный ранее метод определения нанометровых перемещений позволяет определять только относительные перемещения внешнего отражателя составного автодинного резонатора, поэтому величина продольного смещения отсчитывалась от положения барабанной перепонки при уровне звукового давления в 20 дб. На рис. 11 приведена также рассчитанная зависимость продольного смещения барабанной перепонки Δ от величины звукового давления излучателя звуковых волн в дб.

Таким образом, экспериментально установлено, что с увеличением интенсивности звукового воздействия на барабанную перепонку происходит не только увеличение амплитуды ее колебаний, но и ее продольное смещение как единого целого.

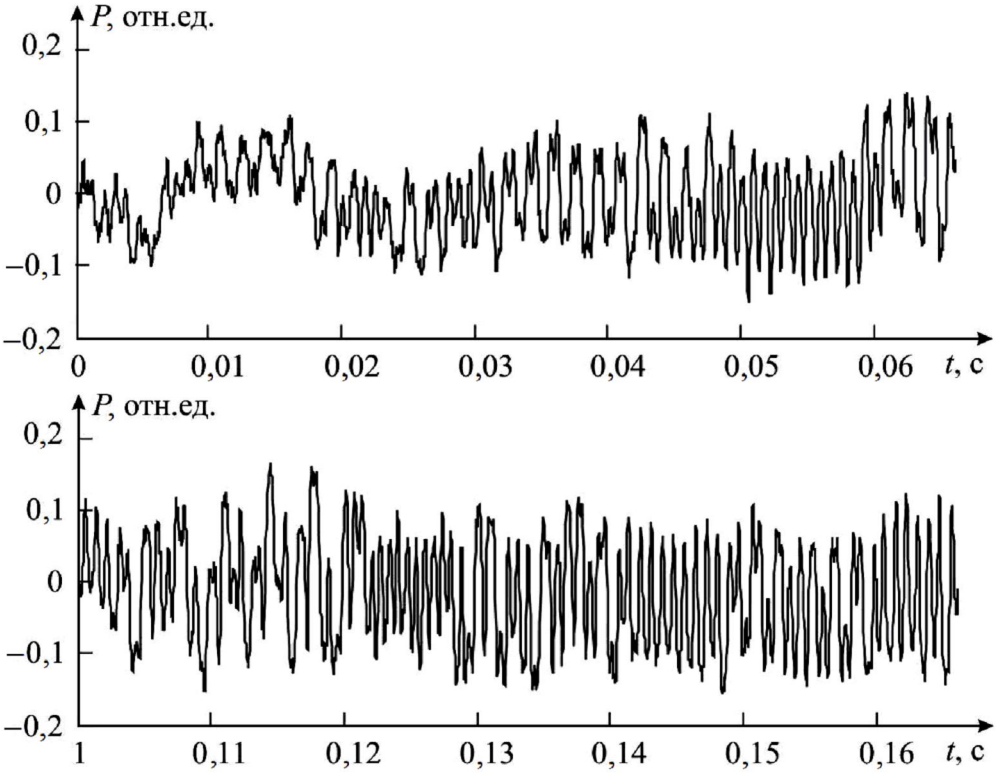

Рис. 10. Участки зафиксированного автодинного сигнала полупроводникового лазера при увеличении интенсивности звукового воздействия на барабанную перепонку

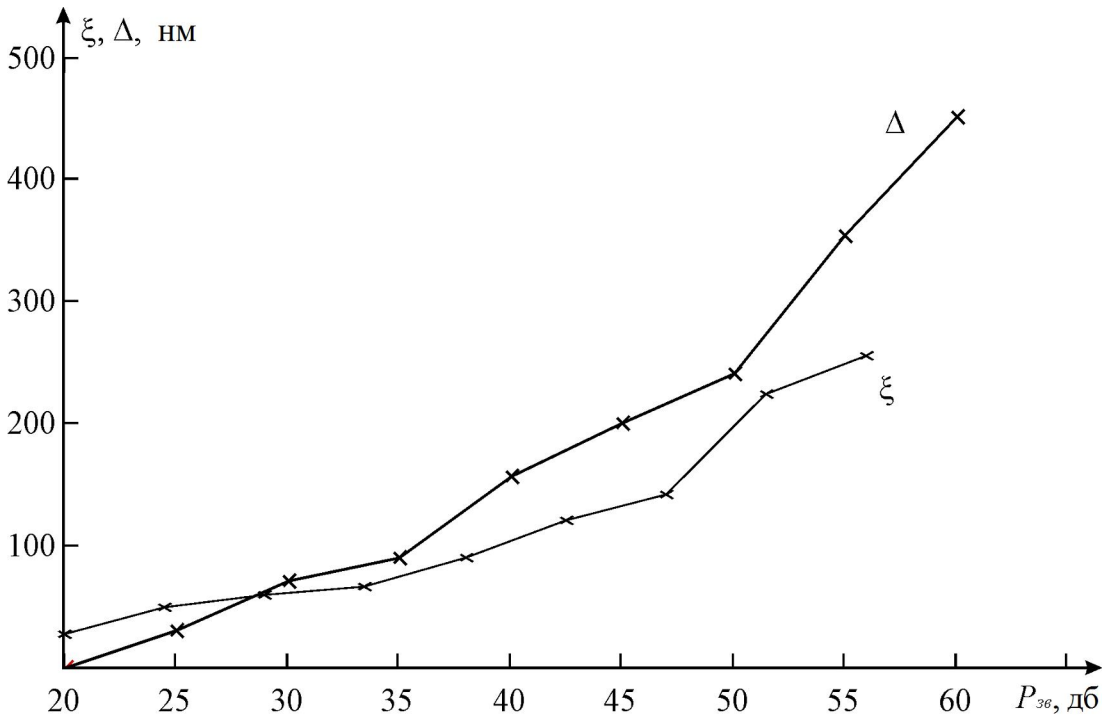

Рис. 11. Зависимость амплитуды колебаний барабанной перепонки от интенсивности звукового воздействия

КОЛЕБАНИЯ БАРАБАННОЙ ПЕРЕПОНКИ ПРИ ВЫСОКОМ УРОВНЕ ЗВУКОВОГО ДАВЛЕНИЯ

Для исследования поведения барабанной перепонки при высоких уровнях звукового давления анализировался спектральный состав автодинного сигнала при различных интенсивностях воздействия.

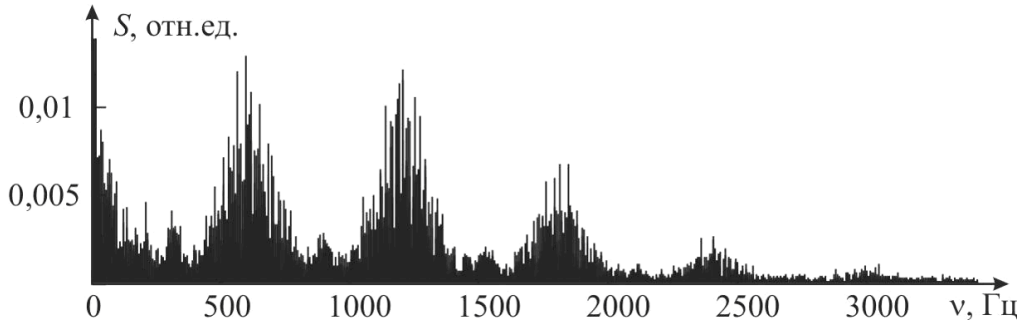

Рис. 12. Спектр автодинного сигнала для пациента при частоте звукового воздействия 600 Гц при уровне звукового давления 70 дб

На рис. 12 приведен спектр автодинного сигнала для пациента при частоте звукового воздействия 600 Гц, при уровне звукового давления 70 дб.

Как видно из рис. 12, в спектре автодинного сигнала, наряду со спектральными составляющими, кратными частоте возбуждающего звукового воздействия, наблюдаются спектральные составляющие на частотах, кратных половине частоты возбуждающего звукового воздействия. Это позволило сделать вывод о возникновении в гармонических колебаниях барабанной перепонки дополнительной субгармоники на половинной частоте основных колебаний. Пороговая величина возникновения субгармонических колебаний была индивидуальна для каждого пациента и превышала порог слышимости от 65 до 75 дб. У некоторых пациентов наблюдать возникновение субгармонических колебаний не удалось, вследствие того, что звуковое давление вызывало неприятные ощущения.

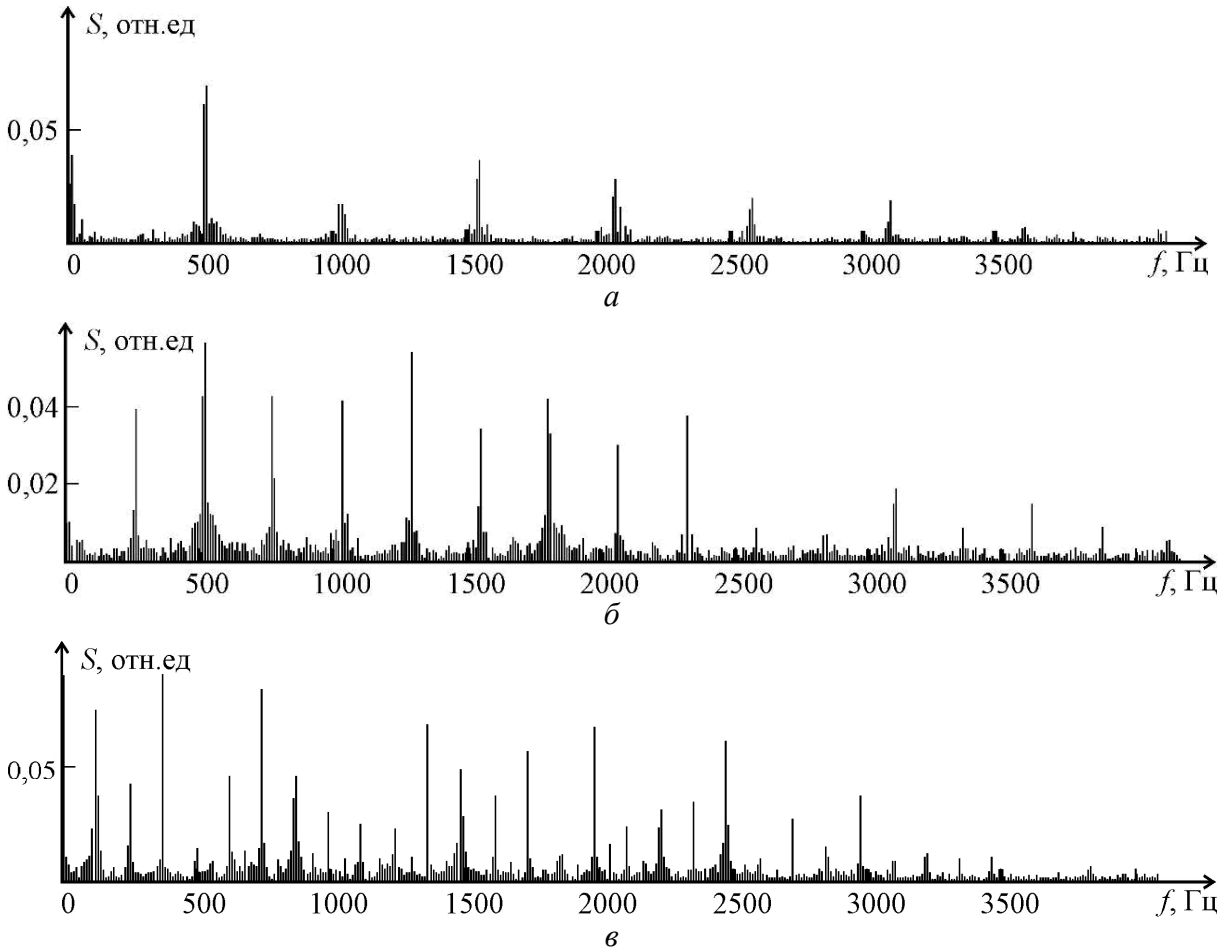

Рис. 13. Спектр автодинного сигнала при подаче на костный возбудитель сигнала с генератора с частотой 520 Гц и напряжением: *а* – 0,7 В; *б* – 0,9 В; *в* – 2 В

Дополнительно были проведены исследования возможности возникновения субгармонических колебаний барабанной перепонки на препарированном слуховом аппарате свиньи. Для возбуждения колебаний барабанной перепонки использовался костный возбудитель, применяемый в аудиометрических клинических исследованиях. На рис. 13, *а* приведен спектр автодинного сигнала при подаче на костный возбудитель сигнала с генератора с частотой 520 Гц и напряжением 0,7 В.

При увеличении напряжения подаваемого сигнала до величины 0,9 В в спектре автодинного сигнала наблюдались субгармонические составляющие на частотах, кратных половине частоты подаваемого сигнала (рис. 13, *б*). При дальнейшем увеличении напряжения подаваемого сигнала до величины 2 В в спектре автодинного сигнала наблюдались дополнительные субгармонические составляющие на частотах, кратных четверти частоты подаваемого сигнала, (рис. 13, *в*).

Таким образом, установлено, что при увеличении интенсивности звукового гармонического воздействия на барабанную перепонку с частотой ω в ее механических колебаниях может возникать субгармоника на частоте $\omega/2$. При механическом возбуждении гармонических колебаний барабанной перепонки с помощью электромеханического возбудителя, используемого для проведения клинических исследований, посредством костной проводимости, удалось зафиксировать появление второй субгармоники на частоте $\omega/4$. Проведенные исследования позволяют установить условия возбуждения нормальных колебаний барабанной перепонки и порога адекватного восприятия звукового сигнала.

Выводы

Таким образом, проведенные исследования показали перспективность применения метода, основанного на использовании эффекта автодинного детектирования в полупроводниковом лазере, для анализа динамического состояния барабанной перепонки. Определена амплитудно-частотная характеристика амплитуды колебаний барабанной перепонки при различных уровнях звукового воздействия на нее. Установлены различия между амплитудно-частотными зависимостям барабанной перепонки и графиками нарастания амплитуды колебаний барабанной перепонки в зависимости от уровня звукового давления при адгезивных процессах, при сенсоневральной тугоухости и в норме. Данный факт позволяет использовать лазерный автодинный измеритель для дифференциальной диагностики этих процессов без хирургического вмешательства.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке программы Министерства образования и науки РФ.

Список литературы

1. Базаров В.Г., Лисовский В.А., Мороз Б.С., Токарев О.П. Основы аудиологии и слухопротезирования. – М.: Медицина, 1984. – 252 с.
2. Кобрак Г. Среднее ухо. – М.: Медгиз, 1963. – 455 с.
3. Нейман Л.В. Анатомия, физиология и патология органов слуха и речи. – М., 1977. – 320 с.
4. Сагалович Б.М., Денисова Г.А. Уровень слухового дискомфорта в норме и при различных формах тугоухости // Журн. ушн. нос. и горл. бол. – 1974. – № 4. – С. 59–64.
5. Скрипаль А.В., Усанов Д.А., Авдеев К.С., Мареев О.В., Мареев Г.О. Определение подвижности барабанной перепонки по спектру автодинного сигнала полупроводникового лазера // Альманах клинической медицины. – 2008. – Т. XVII, Часть 2. – С. 358–362.

6. Скрипаль А.В., Чанилов О.И., Усанов Д.А., Камышанский А.С. Восстановление негармонической функции движения объекта по сигналу полупроводникового лазера, работающего в автодином режиме // Известия ВУЗов. Прикладная нелинейная динамика. – 2005. – № 1. – С. 79–87.
7. Ундриц В.Ф. Темкин Я.С., Нейман Л.В. Болезни уха, горла и носа. – Л., 1960. – 150 с.
8. Усанов Д.А., Мареев О.В., Скрипаль А.В., Мареев Г.О., Камышанский А.С. Бифуркации удвоения периода колебаний барабанной перепонки при увеличении звукового давления // Письма в ЖТФ. – 2007. – Т. 33, Вып. 21. – С. 90–94.
9. Усанов Д.А., Мареев О.В., Скрипаль А.В, Феклистов В.Б., Камышанский А.С. Способ измерения амплитуды колебаний барабанной перепонки: патент РФ № 2258462. Опубл. 20.08.2005. Бюл. № 23.
10. Усанов Д.А., Мареев О.В., Скрипаль А.В, Феклистов В.Б., Камышанский А.С. Устройство для измерения амплитуды колебаний барабанной перепонки: патент на полезную модель РФ № 38442. Опубл. 20.06.2004. Бюл. № 17.
11. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Добдин С.Ю. Определение характеристик колебаний упругой сферической оболочки, заполненной несжимаемой жидкостью, с помощью полупроводникового лазерного автодина // Письма в ЖТФ. – 2011. – № 18. – С. 65–72.
12. Усанов Д.А., Скрипаль А.В. Измерение микро- и нановибраций и перемещений с использованием полупроводниковых лазерных автодинов // Квант. электроника. – 2011. – Т. 41, № 1. – С.86–94.
13. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Камышанский А.С. Измерение скорости нанометровых перемещений по спектру автодинного сигнала лазера на квантоворазмерных структурах // Письма в ЖТФ. – 2004. – № 7. – С. 77–82.
14. Усанов Д.А., Скрипаль А.В, Камышанский А.С. Способ измерения скорости движения объекта: патент на изобретение РФ № 2247395. Опубл. 27.02.2005. Бюл. № 6.
15. Усанов Д.А., Скрипаль А.В. Определение характеристик вибраций микрообъектов с помощью лазерного излучения // Микросистемная техника. – 2003. – № 7. – С. 34–42.
16. Gan R.Z., Dyer R.K., Wood M.W., Dormer K.J. Mass loading on the ossicles and middle ear function // Ann. Otol. Rhinol. Laryngol. – 2001. – Vol. 110. – P. 478–485.
17. Hough J., Dyer R., Dormer K., Matthews P., Gan R. Z., Wood M. Middle ear electromagnetic implantable hearing device-initial clinical results // The Function and Mechanics of Normal, Diseased and Reconstructed Middle Ears. J. Rosowski and S. Merchant (Eds). – Netherlands: Kluwer Publications, 2000. – P. 353–366.
18. Ohtsuka Y. Dynamic measurements of small displacements by laser interferometry // Trans. Inst. Measure. Control. – 1982. – Vol. 4. – P. 115–124.
19. 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.
20. Sosa M., Carneiro A.A.O., Baffa O., Colafemina J.F. Human ear tympanum oscillation recorded using a magnetoresistive sensor // Rev. Sci. Instrum. – 2002. – Vol. 73. – P. 3695.
21. Tonndorf J., Khanna S.M. Submicroscopic displacement amplitudes of the tympanic membrane (cat) measured by a laser interferometer // J. Acoust. Soc. Am. – 1968. – Vol. 44. – P. 1546–1554.
22. Usanov D.A., Skripal A.V., Mashkov D.A., Kamyshanskyi A.S. Autodyne measurements of micro and nano vibrations by the low-frequency spectrum of diode laser // Proc. SPIE. – Vol. 5503. – 2004. – P. 551–558. (Sixth International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques: Advances and Applications; Enrico P. Tomasini, Ed.)
23. Wada H., Koike T., 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.

LASER AUTODYNE MEASUREMENTS OF THE PARAMETERS OF THE TYMPANIC MEMBRANE MOTIONS

D.A. Usanov, O.V. Mareev, A.V. Skripal, G.O. Mareev (Saratov, Russia)

The investigation of mechanic properties of the tympanic membrane in normal state and with pathological changes is based on the results of measurements obtained from semiconductor structure laser operating in the autodyne regime. We show the ability to diagnose the transfer function violation in “the tympanic membrane – auditory ossicles” chain, based on the measurements data of responses of the tympanic membrane oscillations there. We have established the differences between the tympanic membrane amplitude-frequency dependences and the graphs of the increase in amplitude of the tympanic membrane oscillations depending on the acoustic pressure level during adhesive processes, sensorineural hearing loss and in normal state. We have experimentally determined the appearance of the tympanic membrane longitudinal displacement caused by vibrations excited by periodic sound stimulation. It is established that an increase in the acoustic pressure leads to the appearance of subharmonics in the spectrum of the tympanic membrane oscillations. The carried out research allows us to determine the conditions of the excitation of the tympanic membrane normal oscillations and the threshold of adequate perception of a sound signal.

Key words: biomechanics, tympanic membrane, laser autodyne, oscillations spectrum, subharmonics.

Получено 25 декабря 2011