

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИОЛОГИИ СЛУХА *

Георг Бекеш-Будапешт

1. Анатомия уха

Хотя физикам и не следовало бы заниматься вопросами анатомии, тем не менее им приходится с этими вопросами сталкиваться даже при изучении чисто физических проблем слуха. И тогда можно осознать всю стройность анатомии уха и различие путей, которыми природа и техника разрешают одни и те же проблемы. При современном состоянии физиологии слуха, которая еще далека

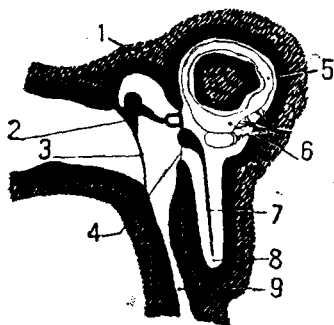


Рис. 1. Схематический разрез среднего и внутреннего уха. 1 — височная кость, 2 — слуховой проход, 3 — барабанная перепонка, 4 — круглое окно, 5 — полукружный канат, 6 — кохлеарный лабиринт, 7 — основная мембрана, 8 — геликотрема, 9 — евстахиева труба.

от возможности давать прямые ответы, такого рода познания играют большую роль. Ибо нередки случаи, когда физик после хорошего по его мнению разрешения проблемы при более близком ознакомлении с анатомией уха не может освободиться от чувства, что явления должны протекать совершенно иным порядком.

На рис. 1 представлен схематический разрез среднего и внутреннего уха, скомпилированный из двух рисунков, приведенных в известном труде Г. Гельмгольца „Учение о слуховых ощущениях“¹. Слуховой проход длиной в 2,5 см и шириной в 0,7 см заканчивается барабанной перепонкой, имеющей коническую форму. Барабанная перепонка связана с тремя слуховыми косточками — молоточком, наковальней и стремением,

находящимися в полости височной кости, именуемой средним ухом. Косточки прикреплены к стенкам полости при помощи эластичных связок. Среднее ухо соединяется евстахиевой трубой с полостью рта. У здорового человека, однако, эта труба обычно закрыта; она

* Elektrische Nachrichten-Technik, 12, 71 — 83, 1935. Перевод А. В. Рабиновича.

открывается лишь при глотании, чем достигается выравнивание возможной разности в давлениях по обеим сторонам барабанной перепонки. Это можно доказать на опыте. В трубке укрепляют маленький зуммер и вводят трубку в рот. Если евстахиева труба закрыта, то звук от зуммера едва слышен, при открытии же евстахиевой трубы получается громкий шум.

Таким образом барабанная перепонка подвергается одностороннему воздействию изменений давления звукового поля, и ее колебания через основание стремени передаются во внутреннее ухо. Последнее у человека состоит в основном из круглого канала длиной около 3,5 см и шириной около 0,25 см, свернутого спиралью и поэтому называемого улиткой. Канал разделяется по длине перегородкой на две равные части. Перегородка эта не доходит до конца канала, так что образуется отверстие (так называемая геликотрема), через которое жидкость может переливаться из верхней части канала в нижнюю. Этим достигается то, что при чрезмерном давлении стремени в начале верхней части канала жидкость не оказывает длительного давления на перегородку, выравниваясь через геликотрему и круглое окно (отверстие в нижней половине канала, затянутое перепонкой). Внутренняя часть перегородки, перпендикулярной к оси улитки, костная, тогда как наружная часть состоит из перепонки—так называемой основной мембраны. Основная мембрана вблизи стремени имеет ширину около 0,16 мм, приближаясь же к геликотреме расширяется до 0,5 мм.

В верхнюю половину канала улитки выходят отверстия трех перпендикулярных друг к другу так называемых полукружных каналов (на рис. 1 показан только один из них), наполненных подобно улитке жидкостью. Ранения черепа, распространяющиеся на полукружные каналы, вызывают головокружения—отсюда понятно их значение для удержания равновесия.

При вращении головы вокруг оси, перпендикулярной к плоскости полукружного канала, жидкость вследствие инерции отстает, причем ее перемещение по отношению к стенкам полукружного канала вызывает раздражение находящихся на этих стенках нервных окончаний.

Если вблизи стремени благодаря выпрямлению колебаний жидкости создаются потоки жидкости, то они вследствие близости отверстий полукружных каналов переносятся в эти каналы, что также может явиться причиной нарушения равновесия.

Рис. 2 представляет собой фотографический снимок слуховых косточек, освобожденных от более мягких частей, как кожа, связки и хрящи.

Рукоятка молоточка, обозначенная на рисунке цифрой 4, по всей своей длине сращена с барабанной перепонкой, в то время как головка молоточка сращена с наковальной плоскостью, обозначенной цифрой 1. Прежде предполагали, что головка молоточка и наковальня не соединены неподвижно, а что они образуют нечто вроде заградительного сустава, передающего полностью небольшие

колебания и теряющего связь при чрезмерно больших колебаниях. Однако более поздние исследования на свежих височных костях не подтвердили этой точки зрения. Нижний узкий отросток наковальни соединяется со стремением при помощи сустава.

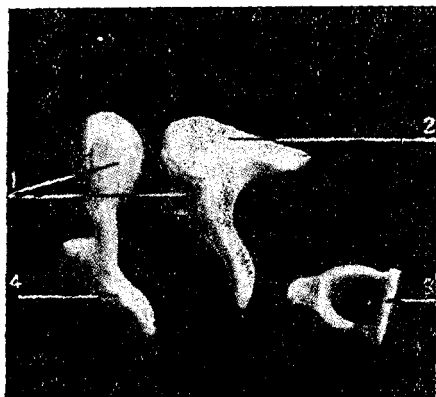


Рис. 2. Слуховые косточки. 1—поверхность сращения головки молоточка с наковальней, 2—наковальня, 3—основание стремени, 4—Рукоятка молоточка.

На рис. 3 изображены барабанная перепонка и слуховые косточки в их естественном положении. Отчетливо видна конусообразная форма барабанной перепонки 3 и сращенная с последней рукоятка молоточка 4. На рисунке, кроме места сращения между головкой молоточка и наковальней, видно также, как короткий ствол наковальни 1 гибко связан со стенкой височной кости. Рядом с суставной поверхностью, соприкасающейся со стремением 2, находится тонкое мускульное волокно, идущее к височной кости. Волокно это сращено с верхушкой стремени и сокращается под действием сильных звуков. В среднем ухе имеется еще один мускул, а именно мускул, начинающийся от рукоятки молоточка и натягивающий барабанную перепонку к внутренней части головы. Замечено, что некоторые люди могут натягивать этот мускул произвольно.

На рис. 4 видны стремя, его основание 2 и суставная головка 1. Так как овальное окно 4 лежит настолько глубоко, что стремя не удается сфотографировать в его нормальном положении, то на данном препарате оно вынужено, вследствие чего появилась возможность видеть и форму самого овального окна. Круглое окно 3 видно

На рис. 3 изображены барабанная перепонка и слуховые косточки в их естественном положении. Отчетливо видна конусообразная форма барабанной перепонки 3 и сращенная с последней рукоятка молоточка 4. На рисунке, кроме места сращения между головкой молоточка и наковальней, видно также, как короткий ствол наковальни 1 гибко связан со стенкой височной кости. Рядом с суставной поверхностью, соприкасающейся со стремением 2, находится тонкое мускульное волокно, идущее к височной кости. Волокно это сращено с верхушкой



Рис. 3. Барабанная перепонка и слуховые косточки в нормальном положении. 1—наковальня, 2—поверхность сустава, соприкасающегося со стремением, 3—барабанная перепонка, 4—рукоятка молоточка, 5—головка молоточка.

колебания и теряющего связь при чрезмерно больших колебаниях. Однако более поздние исследования на свежих височных костях не подтвердили этой точки зрения. Нижний узкий отросток наковальни соединяется со стремением при помощи сустава.

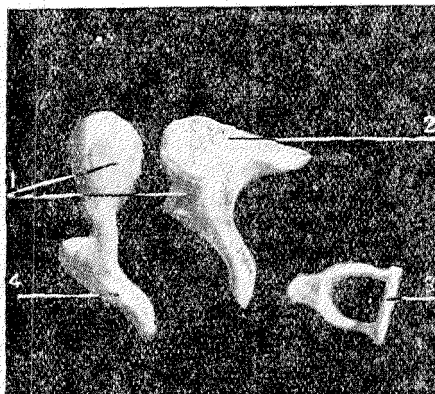


Рис. 2. Слуховые косточки. 1—поверхность сращения головки молоточка с наковальней, 2—наковальня, 3—основание стремени, 4—Рукоятка молоточка.

щейся со стремением 2, находится тонкое мускульное волокно, идущее к височной кости. Волокно это сращено с верхушкой стремени и сокращается под действием сильных звуков. В среднем ухе имеется еще один мускул, а именно мускул, начинающийся от рукоятки молоточка и натягивающий барабанную перепонку к внутренней части головы. Замечено, что некоторые люди могут натягивать этот мускул произвольно.

На рис. 4 видны стремя, его основание 2 и суставная головка 1. Так как овальное окно 4 лежит настолько глубоко, что стремя не удается сфотографировать в его нормальном положении, то на данном препарате оно вынута, вследствие чего получилась возможность видеть и форму самого овального окна. Круглое окно 3 видно

На рис. 3 изображены барабанная перепонка и слуховые косточки в их естественном положении. Отчетливо видна конусообразная форма барабанной перепонки 3 и сращенная с последней рукоятка молоточка 4. На рисунке, кроме места сращения между головкой молоточка и наковальней, видно также, как короткий ствол наковальни 1 гибко связан со стенкой височной кости. Рядом с суставной поверхностью, соприкаса-

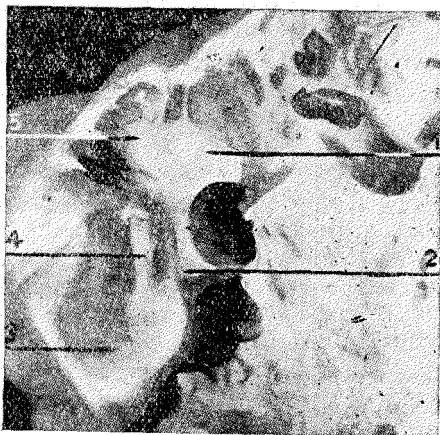


Рис. 3. Барабанная перепонка и слуховые косточки в нормальном положении. 1—наковальня, 2—поверхность сустава, соприкасающегося со стремением, 3—барабанная перепонка, 4—рукоятка молоточка, 5—головка молоточка.

в боковой проекции. Барабанная перепонка и слуховые косточки, как это особенно подчеркнуто Франком², способствуют тому, что звук не попадает одновременно на овальное и круглое окна. В противном случае между двумя окнами не имелось бы разницы в давлении, и следовательно, в улитке не происходили бы отклонения жидкости. О целесообразности и необходимости обоих внутриушных мускулов и о запутанном расположении слуховых косточек нельзя, однако, сказать ничего определенного. Вероятно история развития человека играет роль в отношении их формы, так как слуховые косточки у человека развились из скелета рыбьих челюстей и жабр.

На рис. 5 с левой стороны представлены костные части улитки. В нижнем витке видна перпендикулярная к оси улитки костная часть перегородки,³ делящая канал на две равные части; мягкое продолжение костной

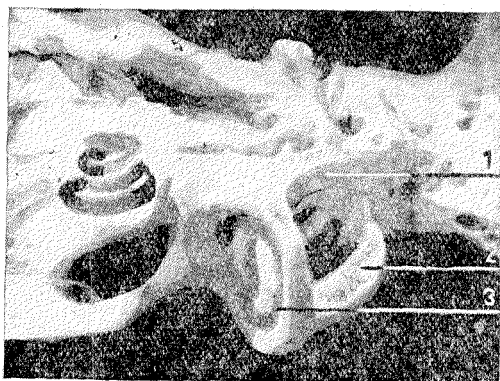


Рис. 5. Костная часть улитки и три расположенных перпендикулярно друг к другу полукружных канала

которой входит слуховой нерв. Отчетливо видно, что в нижних витках улитки, лежащих ближе к стремени, мягкая и тонкая часть перегородки уже, чем в верхних витках. Кроме того, на рисунке виден сросшийся с верхушкой улитки кончик основной мембраны с

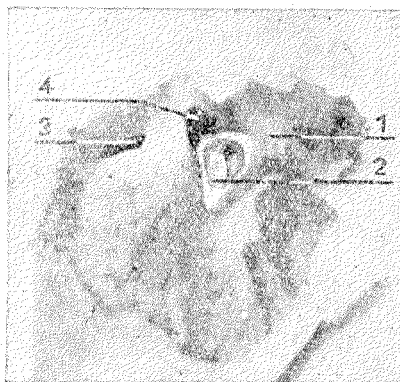


Рис. 4. Стремя, вынутое из овального окна. 1—суставная головка стремени, 2—основание стремени, 3—круглое окно. 4—Овальное окно.

перегородки — основная мембрана — удалена. Верхний виток достигает верхушки улитки, откуда можно через геликотрему проследить переход от нижней к верхней части канала. Справа на рисунке видны три перпендикулярные друг к другу плоскости полукружных каналов.

На рис. 6 воспроизведена улитка в нормальном виде. В середине помещается ось улитки 2, так называемая модиола, внутрь

находящейся перед ней геликотремой. Количество витков улитки различно: у кита $1\frac{1}{2}$ витка, у человека $2\frac{3}{4}$, у морской свинки 4.

Благодаря своей улиткообразной форме канал защищен от деформирования.

Если спилить верхушку улитки, то можно увидеть геликотрему вместе с целым витком (рис. 7). Виден конец основной мембраны, сращенной с верхушкой улитки и достигающей здесь максимальной ширины. Если наполнить верхушку улитки жидкостью и закрыть отверстие тонкой стеклянной пластинкой, то таким путем удастся проследить за колебаниями основной мембраны на протяжении целого витка, не нарушая при этом нормальных соотношений.

На рис. 8 показан в увеличении поперечный разрез

канала улитки морской свинки. Нижняя, у морской свинки сравнительно небольшая, часть канала улитки ограничена сверху основной мембраной 3, на которой лежит ряд клеток с волосками; еще выше расположена текториальная мембрана 4. Так как эта мембрана механически относительно устойчива, то при отклонениях основной мембраны оказывается давление на находящиеся под текториальной мембраной клетки, между которыми находятся, как показал Корти, также и окончания слухового нерва. На этом определении Корти основано предположение о том, что деформация основной мембраны обуславливает слуховой процесс. Далее вверх идет рейснерова мембрана, чрезвычайно тонкая и невидимая на рис. 6. Промежуточное пространство

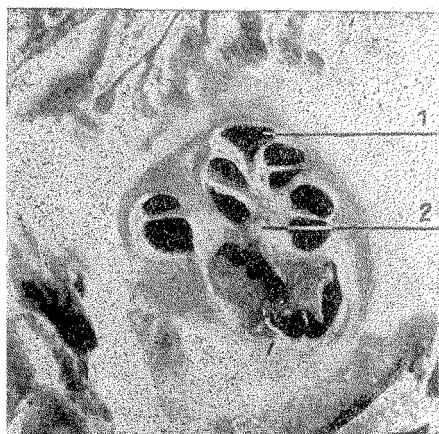


Рис. 6. Поперечный разрез улитки.
1—верхний виток основной мембраны,
2—модиюла

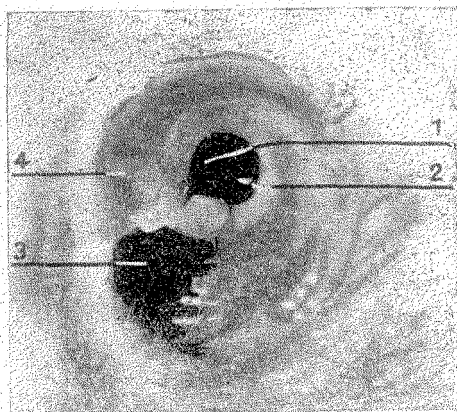


Рис. 7. Верхний виток улитки. 1—геликотрема, 2—модиюла, 3—начало нижнего витка, 4—конец основной мембраны

между рейснеровой и основной мембранами, так называемое ductis cochlearis, наполнено вязкой жидкостью.

Наблюдения, произведенные над препаратом, изображенным на рис. 7, на котором была сохранена рейснерова мембрана, показали, что обе мембраны — текториальная и основная — колеблются с совершенно одинаковыми фазами, так что с физической точки зрения

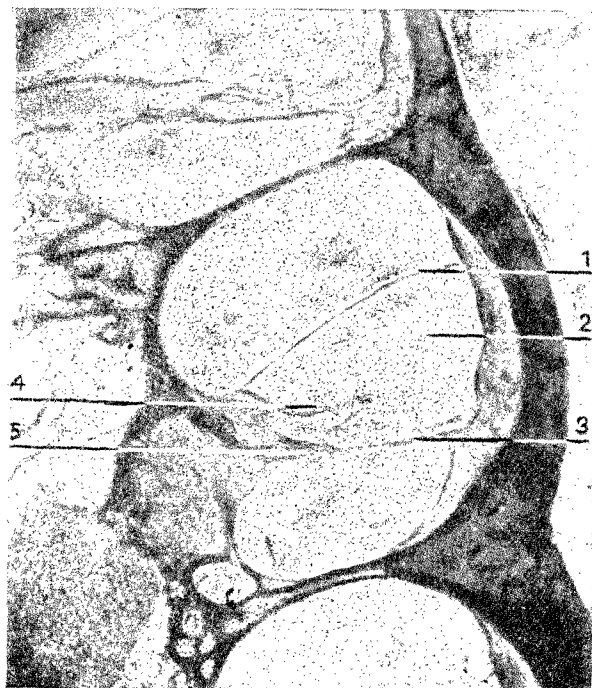


Рис. 8. Поперечный разрез канала улитки морской свинки. 1—рейснерова мембрана, 2—ductis cochlearis, 3—основная мембрана, 4—текториальная мембрана, 5—слуховой нерв.

не будет никакой существенной ошибки, если мы все три мембраны заменим одной с соответствующими механическими свойствами.

Улитка морской свинки является ценной для физиологических опытов, потому что она находится в легко доступной и сравнительно тонкостенной капсуле, которая благодаря своей внешней форме дает возможность легко ориентироваться. Поэтому Гельд и Кляйнкнехт³ смогли просверлить отмеченную на рис. 8 чертой 3 костную стенку и ослабить в этом месте напряжение основной мембраны, в результате чего слух в просверленном месте обнаружил характерные тональные провалы.

2. Различные теории слуха

Медленные колебания давления в слуховом проходе вызывают, вследствие отклонения стремени в верхней части канала улитки, поток жидкости, который проникает через геликотрему в нижнюю часть канала, в результате чего согласно закону Пуазейля вдоль основной мембраны возникает разность давлений, которая пропорциональна скорости движения жидкости и находится в одинаковой с этим движением фазе.

Так называемая телефонная теория предполагает, что эта пропорциональность и совпадение фаз действия давления вдоль всей основной мембраны имеют место не только при очень низких частотах (порядка 20 герц), но при всех частотах, так что основная мембрана уподобляется телефонной мембране, совершающей колебания в одинаковой для всей мембраны фазе. В слуховых нервах при этом, как и в телефонной трубке, возникают электрические токи, пропорциональные силе звука, которые затем в мозгу подвергаются дальнейшему анализу. В этой теории специальная форма основной мембраны остается необъясненной. Теория „звуковой картины“ (Schallbildtheorie), разработанная Эвальдом⁴, предполагает, что на основной мембране возникают колебательные узоры, имеющие для каждой отдельной частоты различную форму, на основании которой в мозгу совершается определение высоты звука.

Так как деятельность мозга мало изучена и, следовательно, из вышеприведенных теорий нельзя сделать выводов, которые могли бы быть проверены, то физиками Гельмгольцем и впоследствии Гильдмейстером⁵ была выдвинута так называемая теория одного места (Einortstheorie). Согласно этой теории частотный анализ происходит не в мозгу, но, в определенной степени, в улитке механическим путем: каждый тон возбуждает на основной мембране одну единственную узко ограниченную область, и по этому месту основной мембраны совершается определение высоты тона.

Таким образом области возбуждения отдельных тонов пространственно разделены, и следовательно, взаимное фазовое положение тонов при совместном звучании не оказывает влияния на тембр.

Так как изучение восприятия направления звука ясно показывает, что слуховые нервы передают фазы тонов, и для совсем низких частот уже анатомическое строение улитки подтверждает „телефонную“ теорию, то не следует проводить резкого противопоставления различных мнений, ибо при предпочтении теории одного места все же возможно, что при очень высоких тонах частотный анализ осуществляется исключительно через определение места на основной мембране, тогда как при очень низких тонах этому в значительной степени способствует частота нервных токов.

3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТОКИ В СЛУХОВОМ НЕРВЕ

Развитие усилительной техники дало возможность непосредственно измерить токи в слуховом нерве и, таким образом, разрешить вопрос об их частотном анализе. Такой опыт был впервые произведен Вевером и Бреем⁶, которые нашли, что в тканях, окружающих свободно лежащий слуховой нерв, возникают переменные напряжения, вполне пропорциональные звуковому давлению вплоть до самых высоких частот. Повторение этого очень трудного опыта было сделано Саулом и Дэвисом⁷ и показало, что наряду с токами, наблюдаемыми Вевером и Бреем и возникающими, главным образом, в окружающих слуховой нерв тканях, имеются совершенно иного характера токи, распространяющиеся вдоль нерва. Эти токи воспроизводят возбуждающие частоты не более чем до 2 000 Hz и подобны нервным токам, свойственным другим органам чувств.

4. ЯВЛЕНИЯ, УКАЗЫВАЮЩИЕ НА СУЩЕСТВОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ЧАСТОТНОГО АНАЛИЗА В УЛИТКЕ

Наличие механического частотного анализа в улитке подтверждается следующими обстоятельствами: найденные Вевером и Бреем переменные потенциалы на вершине улитки больше при низких частотах, чем при высоких, тогда как на нижнем витке улитки, наоборот, больше при высоких частотах, чем при низких. Это указывает на то, что высокие тоны возбуждают, главным образом, близкую к стремени часть основной мембраны, тогда как низкие тоны воздействуют на часть, близкую к геликотреме.

Уже тот факт, что размеры улитки у новорожденного так же велики, как у взрослого человека, тогда как кости, окружающие улитку, вырастают больше чем вдвое, указывает на важную для слуха роль размеров и механических свойств улитки.

Если имеет место механический частотный анализ, то тогда, согласно теории одного места, при утере слуха в узкой области частот на основной мембране подвергается изменению только некоторый небольшой участок. Гроу, Гильд и Польфогг⁸ определяли зависимость порога слышимости от частоты у больных, относительно которых было установлено, что они не могут выздороветь.

После смерти этих лиц при помощи гистологического исследования определялись произошедшие в улитке изменения. На рис. 9 приведен один из большого числа исследованных случаев, где для частот, свыше 1 000 Hz, имела место тугоухость, возрастающая с частотой. На этом рисунке дана проекция улитки на плоскость, перпендикулярную ее оси; для нижнего (ближайшего к стремени) витка ширина черных полос указывает, в какой мере (в процентах) нервные окончания, кортиев орган и соответствующий участок основной мембраны еще не подвергались разрушению. Ясно видно, как по мере приближения к стремени, т. е. с возрастанием частоты и, следовательно, тугоухости, разрушение увеличивается.

Из большого числа наблюдений было установлено, что ослаблению слуха для частот 8 192, 4 096 и 2 048 Hz соответствуют разрушения улитки в указанных скобками участках.

Вышеупомянутые опыты Гельда и Клийнкнехта, в которых основная мембрана морских свинок была повреждена в определенных узко ограниченных местах, дали совершенно тождественные результаты относительно частотной зависимости потерь слуха.

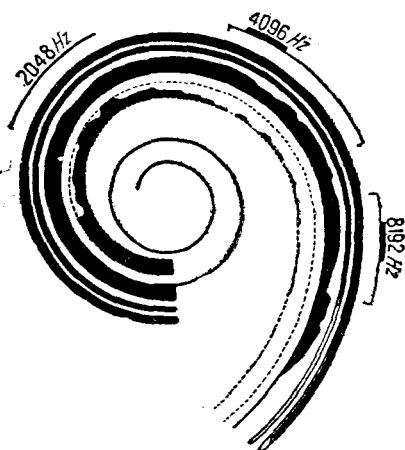


Рис. 9. Глухота для высоких частот соответствует в человеческом ухе разрушению нервных окончаний вблизи стремени.

Подтверждаются также и дальнейшие выводы теории одного места. Известно, что нерв при чрезмерно длительном и сильном раздражении утомляется. Утомление действует прежде всего и сильнее всего на нервные окончания. Так как каждый тон раздражает только одно место основной мембраны, то следует ожидать, что при предшествующем утомлении чистым тоном постоянной частоты будет обнаружено влияние утомления только для тонов, весьма близких по частоте к утомляющему тону.

Это и было доказано, причем потеря громкости при неизменном звуковом давлении больше всего для частоты утомляющего тона (уменьшение громкости при сильном утомлении эквивалентно таковому от уменьшения звукового давления в 3—5 раз), а для

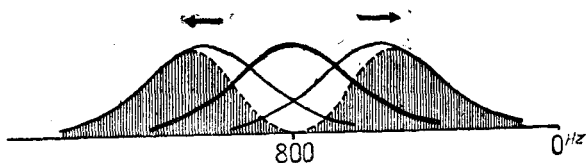


Рис. 10. Изменение высоты тона при предшествующем утомлении.

частот, несколько более высоких или более низких, постепенно уменьшается в обе стороны⁹.

Вместе с тем было замечено, что при предшествующем утомлении наступает небольшое изменение высоты тона. Как это показано на рис. 10, предшествующее утомление в узкой области (степень утомления и распределение его вдоль основной мембраны изображены толстой изогнутой линией в центре рисунка с максимумом в 800 Hz) изменяет распределение раздражения от после-

дующих тонов, близких по частоте к утомляющему тону, таким образом, что раздражение уменьшается со стороны, обращенной к утомленному месту. Поэтому место максимального возбуждения, которое и определяет ощущение высоты тона, смещается; все тоны с частотой, большей частоты утомляющего тона, повышаются, а с частотой, меньшей частоты утомляющего тона, понижаются. Явление это подтверждается на опыте.

5. Сходство между восприятием звука, распространяющегося в воздухе и непосредственно подведенного через твердое тело

Для дальнейшей разработки теории одного места важно определить отношение, существующее между обычным слуховым восприятием звука, распространяющегося в воздухе, при котором барабанная перепонка и стремя приходят в колебания относительно корпуса улитки, и слуховым восприятием так называемого телесного звука. Последнее обозначение относится к случаю, когда путем прикосновения колеблющегося тела к черепным костям, например ножки звучащего камертона, приходят в колебания (поперечные и продольные) не только стремя, но весь корпус улитки. При этом имеет место совершенно нормальное восприятие тонов. Возможно даже устройство „костного телефона“ путем приведения в колебание зубов от токов звуковой частоты через жесткую колеблющуюся систему.

Чтобы установить, отличается ли восприятие звука, идущего через воздух, коренным образом от восприятия костно-проведенного звука и идентична ли в обоих случаях форма колебаний основной мембраны, мы подводим одновременно один и тот же тон при помощи обычного телефона и при помощи костного телефона. Если бы колебания основной мембраны под действием звука, подведенного к уху каждым из этих способов, имели одинаковую форму, то путем правильного выбора амплитуд и соотношений фаз обоих телефонных токов должна была быть достигнута полная компенсация колебаний, подведенных к уху двумя различными способами, и ухо не восприняло бы никакого звука.

Так как этот опыт вполне удался, то следует считать идентичность колебаний жидкости в обоих случаях доказанной¹⁰.

Судя по анатомическому строению улитки, этого и следовало ожидать, ибо при равномерном сжатии улитки и симметричности обоих каналов улитки, как это видно на рис. 11, не наступает никакого смещения основной мембраны. Но так как верхний канал улитки нагружен барабанной перепонкой и слуховыми косточками, то симметрия нарушается. Асимметрия увеличивается еще оттого, что к верхнему каналу улитки примыкают полукружные каналы, отверстия которых расположены вблизи стремени, вследствие чего при надавливании полукружных каналов жидкость точно так же вжимается в улитку, как от движения стремени вовнутрь.

Костно-проведенный звук имеет большое значение для установления диагнозов заболеваний в области слуха. Эти заболевания подразделяются на две группы: тугоухость вследствие поражения нервов и тугоухость вследствие воспаления среднего уха. Эти две группы необходимо рассматривать отдельно, так как они требуют совершенно различного лечения. При наличии воспаления среднего уха обычно уменьшается подвижность слуховых косточек и барабанной перепонки, в результате чего увеличивается по сравнению с нормальным состоянием громкость проведенного через кость

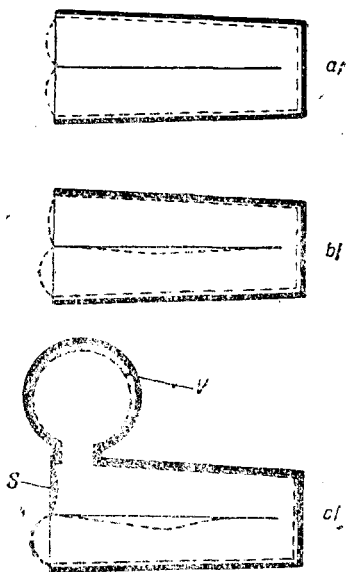


Рис. 11. Возникновение отклонения основной мембраны при сжатии улитки вследствие несимметричности обоих каналов улитки

звuka (рис. 11b), а громкость звука, воспринимаемого через воздух, уменьшается. Такое явление может иметь место в здоровом ухе, если барабанную перепонку подвергнуть постоянному одностороннему давлению величиной в 10 см вод. ст.; при этом сильно увеличивается громкость звука, подведенного через кости черепа, что вызывается фиксацией слуховых косточек вследствие сильного уменьшения подвижности барабанной перепонки, как это показывают измерения импеданса.

Если заткнуть слуховой проход пальцем, то громкость костно-проводимого звука весьма часто еще больше возрастает, так как палец и нижняя челюсть вследствие отсутствия жесткой связи с височной костью колеблются не в той фазе и не с такой амплитудой, как последняя. При этом слуховой проход сжимается и на барабанную перепонку действуют звуковые колебания, подведенные по воздуху, как это происходит при обычном слушании.

Стремя в этом случае вдавливается внутрь улитки.

Таким образом становится понятным часто применяемое во врачебной практике эмпирическое открытие Вебера, которое заключается в следующем: ножку звучащего камертона прикладывают к середине головы; при нормальном слухе в обоих ушах получается одинаково громкий звук, при болезни же среднего уха звук кажется громче как раз в пораженном ухе.

6. Исследования колебаний жидкости в ухе на модели

Так как непосредственное наблюдение колебаний жидкости в улитке человеческого уха вследствие трудностей препарирования

ния, непостоянства препаратов и спиральной формы улитки очень сложно, то для выяснения физических принципов движения жидкости уже давно делались опыты при помощи упрощенных моделей.

На рис. 12 представлены три варианта теории одного места. На рис. 12а изображена модель Вилькинсона¹¹, основная мембрана которой состоит из ряда лежащих друг около друга и переклеенных тонким пергаментным листком проволочек, собственная частота которых непрерывно убывает в направлении от стремени к гелиотреме. Такое устройство представляет собой в сущности, фрамовский язычковый частотомер: при каждой частоте колебаний стремени колеблется с максимальной амплитудой определенное место основной мембраны. Одновременно с этим в жидкости образуются четыре маленьких вихря. Эта модель ближе всего подходит для объяснения гельмгольцевской резонансной теории слуха. По этой теории место максимальных колебаний определяется только механическими свойствами мембраны, размеры же канала улитки не играют никакой роли.

Задача возможно большего приближения модельной мембраны к действительным анатомическим пропорциям была осуществлена Эвальдом¹², нанесшим на тонкую жестяную пластинку, имеющую в разрезе форму основной мембраны, раствор резины. Учитывая утончение резинового раствора, способ его нанесения и степень высыхания, можно изготовить такие мембраны, которые по всем направлениям имеют почти равномерное натяжение, а также такие, у которых поперечное натяжение значительно превосходит продольное. По краям мембраны резиновый раствор высыхает быстрее, чем в середине; поэтому средняя часть мембраны во время высыхания натягивается и часто лопаается по своей длине.

При помощи изготовленных таким образом разнообразных мембран и моделей уха, величину которых удалось в последнее время довести до действительных размеров улитки, была получена изображенная на рис. 12b форма колебаний основной мембраны¹³. Ближайшая к стремени часть мембраны колеблется в одинаковой фазе со стремнем, в то время как на более отдаленных ее частях возникают бегущие волны с большим затуханием. В месте возникновения серии волн образуются два вихря, которые при увеличении частоты приближаются к стремени. Если колебания, подведенные к стремени, несвободны от обертонов, то вышеупомянутые два вихря находятся один против другого. При удлинении канала

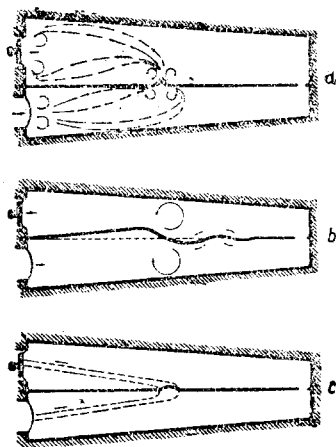


Рис. 12. Различные варианты теории одного места

улитки путем прикрепления, например, к нижней половине модели небольшого кусочка трубки с перенесением на ее конец перепонки круглого окошечка, место возникновения вихрей не изменяется.

Математический анализ этой формы колебания жидкости был сделан Ранке¹⁴, который объяснил причины возникновения вихря.

Изображенная на нижней части рис. 12 форма колебаний была предположена Люксом¹⁵ и Роафом¹⁶, а ее математический анализ был сделан Флетчером и Кухарским¹⁷. Колебания жидкости происходят внутри столба, выделяющегося в жидкости, причем масса жидких столбов и упругость мембраны в месте колебания определяют собственную частоту резонанса. Место колебания при высоких частотах сильно приближается к стремени, вследствие чего длина жидких столбов значительно сокращается. Поэтому при покрытии нижнего окошечка жидкостью (как это может произойти при воспалении среднего уха) мы должны были бы ожидать изменения высоты тонов, так как колеблющиеся столбы жидкости удлиняются. Этого эффекта нам до сих пор не удалось доказать.

Представляют ли столбовидные колебания жидкости устойчивую форму ее движения и который из трех вариантов теории одного места подходит к принятым здесь во внимание размерам и механическим свойствам — все это будет выяснено окончательно только после общего математического анализа.

Отверстия полукружных каналов лежат очень близко от стремени, и поэтому представляется возможным принципиально изучить, совершаются ли колебания жидкости при определенной амплитуде в том и другом направлении внутри столба или же наступает некоторый вид выпрямления колебаний жидкости, связанного с вихреобразными ее потоками, так как при наличии этого явления оно должно распространиться и на полукружные каналы и вызвать нарушение равновесия. Опыт заключается в том, что к одному уху подводят одновременно два тона равной и притом весьма большой силы; частота первого тона — 1 000 Hz частота второго несколько отличается от частоты первого. Если период возникающих при этом биений больше 2 сек., то мы имеем дело с чистым слуховым ощущением. При увеличении же частоты биений у большинства испытуемых возникает отчетливо воспринимаемое нарушение равновесия, и им кажется, что голова колеблется из стороны в сторону в такт с биениями.

При частоте биений в 3 Hz явление это достигает максимальной величины, затем при дальнейшем увеличении частоты непрерывно убывает, почти исчезая при 30 Hz. Если внезапно включить тон с тремя биениями в секунду, то легко можно различить, как слуховое ощущение сразу возникает в полной мере, тогда как для достижения полной величины нарушения равновесия требуется, чтобы прошло не меньше 10 биений.

В дополнение к показаниям испытуемых могут быть также продемонстрированы связанные с нарушением равновесия рефлекторные движения глаз. Так как в нормальных условиях описанное:

явление невелико, то пришлось использовать очень большое количество испытуемых, 80% которых указали нарушение равновесия. Степень нарушения равновесия, однако, сильно изменялась во времени. Пьетро Туллио¹⁸ написал об этом явлении интересную книгу. Сильные колебания звукового давления частотой в 3 Hz и воющие тоны с той же частотой модуляций не оказывают влияния на органы равновесия.

Тогда как на модели уха на рис. 12b вблизи стремени не наблюдается, вообще говоря, никакого вихревого движения, все же не лишено вероятности, как это указал уже Генсен¹⁶, современник Гельмгольца, что в человеческом ухе подобное движение имеет место.

Отклонение стремени от нормального положения, происходящее от одностороннего действия давления на барабанную перепонку, связано с изменением степени нарушения равновесия даже и тогда, когда возникающие при этом изменения громкости тонов биений компенсируются.

7. ПРОЦЕСС ВОЗНИКНОВЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ В УХЕ

Наряду с проблемой механического частотного анализа приобретает значение и процесс возникновения колебаний в среднем ухе

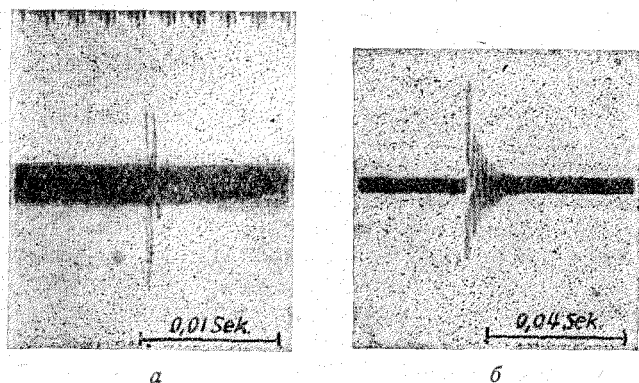


Рис. 13. Колебания барабанной перепонки и мембраны телефонной трубки.

и улитке. О затухании колебательной системы, например струны музыкального инструмента, лучше всего судить по тому, как быстро затухают колебания системы, приведенной в колебание щипком. На телефонной мембране этого можно достигнуть (по предложению Селла²⁰) внезапным прерыванием проходящего в телефонной трубке постоянного тока и записыванием возникающих при этом колебаний, например при помощи микрофона. Кривая затухания для современного почтового телефона дана на рис. 13.

Барабанную перепонку также удается привести в колебание щипком, хотя это не так просто сделать. Колебательный процесс дан слева на рис. 13, причем собственная частота среднего уха оказалась около 1300 Hz²¹. Как мы видим, телефонная техника в этом отношении еще может развиваться, так как время затухания колебаний телефонной мембраны слишком велико.

Если проследить за колебаниями жидкости, возникающими на модели уха при однократном и свободном от колебаний смещении стремени наружу (рис. 14), то видно, что основная мембрана вблизи стремени движется вместе с ним, а более отдаленная часть остается в полном покое. Через короткое время часть мембраны вблизи стремени аperiодично приходит в состояние покоя, в то время как бегущая волна (изображена на рис. 14 толстым пунктиром) приближается к геликотреме, чтобы приблизительно через $\frac{1}{20}$ сек. совершенно выравняться у последней. Частицы угольной

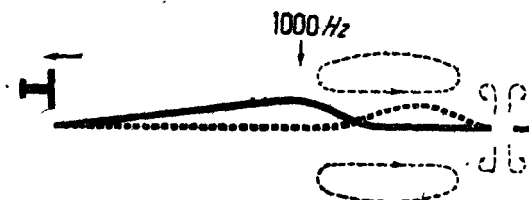


Рис. 14. Бегущие волны на основной мембране.

пыли, находящиеся на мембране, отодвигаются при каждом отхождении стремени на определенное расстояние по направлению к геликотреме, независимо от направления этого отхождения.

Теперь надо доказать существование такой бегущей волны в человеческом ухе и определить скорость распространения этой волны. Известно, что явление восприятия направления звука (бинауральный эффект) связано с возможностью улавливания двумя ушами очень малых разниц во времени; если короткий звуковой импульс (щелчок) одновременно подведен к обоим ушам, то создается впечатление, что он дошел от некоего источника звука, находящегося в средней по отношению к голове плоскости; в случае же, когда звуковой импульс доходит до одного уха на 0,0001 сек. раньше, чем до другого, то направление, в котором находится кажущийся источник звука, уже ощутимо меняется.

Если на барабанную перепонку воздействует весьма короткий звуковой импульс, то стремя совершает быстро затухающую серию колебаний (рис. 15a). При этом на участке основной мембраны, близком к стремени, нарастание и спадание возбуждения протекают по кривой, изображенной на рис. 15b. Если же возникает бегущая волна с конечной скоростью распространения, то процесс нарастания и спадания звуковой энергии на всей основной мембране очень сильно растягивается. Таким образом имеется разница во времени между максимумом возбуждения на всей основной мем-

бране (рис. 15с) и максимумом возбуждения в том случае, когда возбуждается только участок мембраны в непосредственной близости к стремени. Последнего можно достигнуть путем воздействия на ухо сильного низкого тона, который согласно теории одного места особенно сильно возбудит основную мембрану вблизи геликотремы. При достаточной силе низкого тона он перекроет на этом участке основной мембраны слабый короткий импульс, как это было установлено Вегелем и Леном²² по отношению к длительным тонам.

Разница во времени, о которой говорилось выше, может быть продемонстрирована на эксперименте смещения кажущегося источника звука при одновременном подведении к обоим ушам короткого звукового импульса и воздействии сильного низкого тона на одно ухо.

8. Нелинейные искажения в ухе

Относительно нелинейных искажений в ухе может считаться установленным, что они не нервного происхождения, так как остаются без изменения при утомлении уха. Нелинейные искажения представляют собой поэтому чисто физическое явление, и можно надеяться, что с течением времени удастся при их посредстве сделать вполне объективным путем заключения относительно движения жидкости в улитке, так как величина возникающих в ухе обертонов и комбинационных тонов очень хорошо поддается измерению. Для этой цели применяется метод вспомогательных, дающих биения тонов. Он заключается в следующем: к уху одновременно с исследуемым тоном подводят вспомогательный тон, частота которого только на несколько герц отличается от частоты измеряемого обертона или комбинационного тона; возникающие при этом биения достигают максимума тогда, когда амплитуды вспомогательного и измеряемого тонов равны.

На рис. 16 для основного тона в 200 Нз и 10 дин/см² звукового давления изображен полученный указанным способом амплитудный спектр обертонов²³. Как видно на рисунке, первый обертон составляет по амплитуде больше трети основного тона, так что нелинейные искажения уха должны во всяком случае рассматриваться как очень характерное явление механизма улитки.

Прежде существовала точка зрения, что нелинейные искажения вызываются, главным образом, конической формой барабанной перепонки. Если поэтому барабанную перепонку подвергнуть дей-

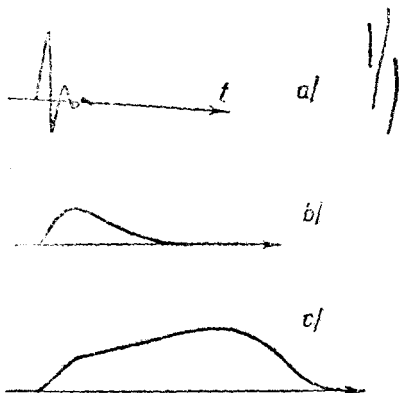


Рис. 15. К наблюдению за скоростью распространения бегущих волн, возникающих под действием короткого звукового импульса

ствием сильных вполне синусоидальных колебаний воздушного давления, то в этом случае она должна излучать возникающие обертоны и комбинационные тоны не только во внутрь,

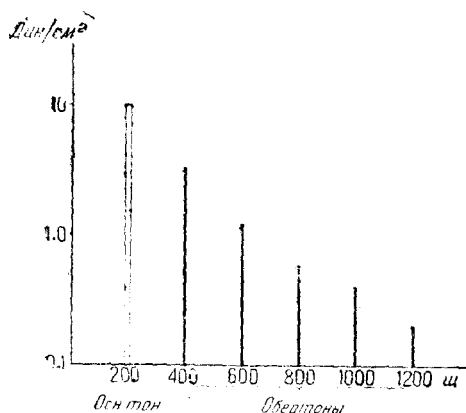


Рис. 16. Возникающие в ухе обертоны при основном тоне в 200 Hz и 10 дин/см² звукового давления

возникают, вероятно, у основания стремени либо вследствие нелинейности упругих сил в тканях, связывающих основание стремени с височной костью, либо вследствие возникающих вихрей (рис. 12а), дающих механическое выпрямление, которое Вэцман²⁴ считает необходимым условием для возникновения комбинационных тонов. Можно продемонстрировать на эксперименте роль стремени, прикладывая к барабанной перепонке одностороннее воздушное давление и выводя, таким образом, стремя из его нормального положения. На рис. 17 приведены кривые изменения во времени громкости двух основных тонов 2 000 и 2 260 Hz, соответствующего им первого разностного тона (260 Hz) и нормального тона в 260 Hz при уменьшении

тоны и комбинационные тоны не только во внутрь, но и наружу, в слуховой проход. Опыт, однако, показал, что это излучение наружу в десять раз меньше, чем следовало бы ожидать, так что причину нелинейных искажений следует, главным образом, искать в движении стремени и в улитке. Эта точка зрения подтверждается еще тем, что при отсутствии барабанной перепонки не наблюдается резко заметного уменьшения искажений.

Комбинационные тоны

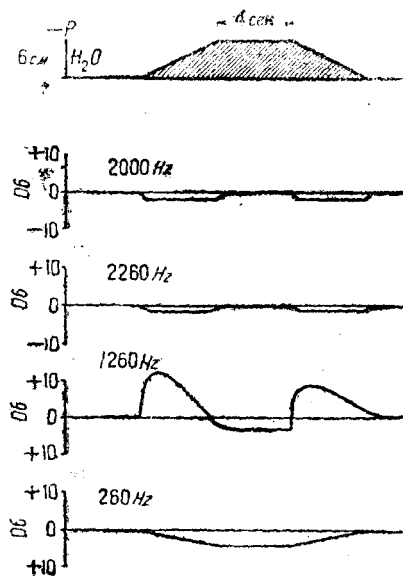


Рис. 17. Изменения громкости основного тона, разностного тона и обычного тона, тождественного по частоте с разностным тоном, при изменении звукового давления в слуховом проходе

воздушного давления в наружном слуховом проходе. Как видно из рисунка, увеличение громкости разностного тона во время отклонения слуховых косточек очень велико, тогда как нормальный тон той же чистоты дает относительно небольшое изменение громкости.

В нашей короткой, не претендующей на полноту статье была сделана попытка осветить современные научные теории в этой области. Удастся ли добиться окончательных точных результатов, это будет зависеть от возможности произвести математический анализ движения жидкости в двойном канале с упругими стенками.

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА ПО СЛУХУ

1. H. v. Helmholtz, Die Lehre von der Tonempfindungen; G. Wilkinson a. A. A. Gray, The Mechanism of Cochlea, 1924; T. Wrightson, The analytical mechanism of the internal ear, 1918; H. Fletcher, Speech and Hearing, 1929; Journ. Acoust. Soc. 1, 311, 1930; E. Waetzmann, Resonanztheorie des Hörens, Müller-Pouillet's Lehrb. d. Physik, Akust. Band, стр. 141, 1929; Bethe-Bergmann, Handb. d. Physiologie, XI, 1926; E. Meyer, Geiger, Schel, Handb. d. Hals- usw. Heilkunde, VI, Gehörorgan I; E. M. v. Hornbostel, Neue Beiträge zur physiologischen Hörtheorie, Jahresb. d. Physik u. exp. Pharmakologie, IX, стр. 753, 1928; I. Tröger, Die Schallaufnahme durch das äussere Ohr, Phys. Z. 31, 26, 1930; R. T. Beatty, Hearing in man and animals, 1932.
2. O. Frank, Sitzungber. d. Münchener Akad. d. Wiss. 1923, стр. 71.
3. H. Held u. F. Kleinknecht, Pflügers Archiv. 216, 1, 1927.
4. J. R. Ewald, Pflüg. Arch. 124, 29, 1908.
5. M. Gildemeister, Kongresseber. Basel. Z. Hals- usw. Heilkunde, 27, 305, 1930.
6. E. G. Weber a. C. W. Bray, Proc. Nat. Ac. Sci. 16, 344, 1930.
7. L. J. Saul u. H. Davis, Arch. of Neur. 28, 1104, 1932.
8. J. Growe, R. Guild u. M. Polvogt, Bulletin of the John Hopkins Hospit, LIV, № 5, 315, 1934.
9. G. v. Békésy, Phys. Z. 30, 115, 1929.
10. G. v. Békésy, Ann. d. Phys. 5, 13, 111, 1932; A. Rejtö, Verhandl. d. deutsch. otolog. Ges. 29 Versaml., стр. 265, 1914; H. Herzog, Z. Hals- usw. Heilkunde 27, 402, 1930.
11. G. Wilkinson a. A. A. Gray, The Mechanism of the Cochlea, 1934.
12. J. R. Ewald, Pflüg. Arch. 93, 485, 1903; 124, 29, 1908.
13. G. v. Békésy, Phys. Z. 29, 793, 1928.
14. O. F. Ranke, Die Gleichrichterresonanztheorie, Habilitationsschrift, Heidelberg, 1931; Berendes, Z. Hals- usw. Heilkunde 36, 388, 1934.
15. F. Lux, Resonanztheorie des Hörens, Phys. Z. 18, 225, 249, 1917.
16. H. E. Roaf, Phil. Mag. 43, 349, 1922.
17. H. Fletcher, J. Acous. Soc. Am. 1, 311, 1930; W. Kucharski, Phys. Z. 31, 264, 1930.
18. Pietro Tullio, Das Ohr, 1929.
19. V. Hensen, Ergebnisse d. Physiol. 1, 2, 873, 1891.
20. H. Selli, Z. tech. Phys. 8, 226, 1927.
21. G. v. Békésy, Phys. Z. 34, 577, 1933.
22. R. L. Wegel u. C. E. Lane, Phys. Rev. 23, 266, 1924.
23. H. Fletcher, J. Acous. Soc. Am. 1, 313, 1930; Ann. d. Phys. 5, 809, 1934.
24. E. Waetzman, Ton, Klang und sekundäre Klangerscheinungen, A. Bethe-Bergmann, Hand. d. norm. u. path. Physiol. 2, Rezeptions- Organe 1, 579, 1926.