

НОВАЯ ТЕОРИЯ СЛУХА

*Гарвей Флетчер**

При построении теории слуха должны быть приняты во внимание следующие опытные данные, допускающие количественную оценку: 1) пределы высоты и силы звука, воспринимаемые слуховым аппаратом, 2) минимальные изменения высоты и силы звука, замечаемые слухом, 3) субъективные тоны, 4) маскировка одного звука другим, 5) соотношение громкости с уровнем ощущения и 6) бинауральный эффект. Кроме этих данных имеется еще ряд других наблюдаемых фактов большой важности, не допускающих однако количественной оценки. Главные из них: 1) способность уха анализировать сложный звук, разлагая его на компоненты, 2) изменения высоты, громкости и тембра сложного звука при исключении некоторых из его компонентов, 3) соотношение „яркости“ и „объема“ *** с частотой и силой звука и 4) влияние сдвига фазы компонентов на качество созвучия***.

Теории слуха, предложенные для объяснения этих опытных данных, разбиваются на два класса. Одни из них могут быть названы теориями пространственных „узоров“ или „последовательностей“ (space pattern theory), другие — теориями временных „узоров“ или

* H. Fletcher, A space time pattern theory of hearing, Jour. Acoust. Soc. of Amer. I, p. 311, 1930. Доложено на собрании Американского акустического о-ва. Перевод С. Н. Ржевкина.

** Понятия, введенные психологами. См. L. T. Troland, Jour. of gen. Psychol. 2, p. 28, 1929.

*** Знакомство с указанными явлениями читатель может получить из книги С. Н. Ржевкина „Слух и речь“ и из статьи того же названия в „Успехи физич. наук“, т. VII, стр. 231, 1927.

„последовательностей“ (time pattern theory). В первых теориях принимается, что временные узоры или последовательности волнового движения воздуха преобразуются в некоторый пространственно расположенный процесс (pattern — узор) во внутреннем ухе и представление о временном „узоре“ волны (частоте) создается в мозгу благодаря тому, что возбуждается определенная область внутреннего уха, которая уже посылает нервные импульсы к мозгу. В теориях второго класса принимается, что временные узоры волны передаются непосредственно мозгу. По мнению автора оба процесса имеют место одновременно и создают полное представление о воспринимаемом звуке. Предлагаемая автором теория лучше всего может быть названа теорией слуха на основе пространственно-временных „узоров“ или „последовательностей“ (space-time pattern theory).

Когда в воздухе проходит звуковая волна, частицы воздуха колеблются взад и вперед и вызывают малые изменения давления, происходящие в известной последовательности во времени, определяемой характером звука. Если какой-нибудь малый индикатор давления, мгновенно следующий за всеми изменениями давления, будет поставлен на пути волны, то его показания в зависимости от времени будут выражаться кривыми, подобными приведенным на рис. 1. Каждая кривая характеризует „временной узор“ (time pattern) того звука, к которому она относится. Этот узор передается барабанной перепонке уха и через цепь слуховых косточек и овальное окно достигает жидкости лабиринта. При этой передаче амплитуда давления увеличивается примерно в 60 раз благодаря рычажному действию слуховых косточек, а также благодаря тому, что общая сила, действующая на барабанную перепонку, распределяется на значительно меньшую площадь овального окна*. Если бы мы знали все механические свойства системы, мы могли бы предвычислить все возможные изменения временного узора

* Это верно только, если барабанная перепонка колеблется как целое, не разбиваясь узловыми линиями.

давления, передаваемого в улитку. Для малой силы звука и для частот в средней области временная последовательность давления при этой передаче изменяется, вероятно, незначительно; компоненты, лежащие в низкой и высокой области, передаются, по видимому, с ослаблением. Таким об-

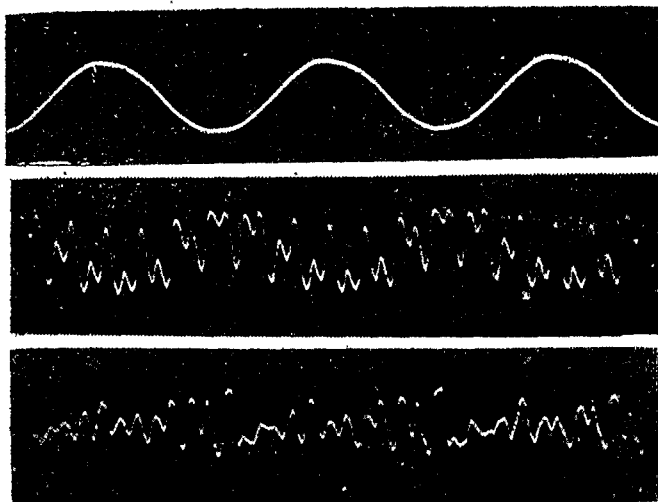


Рис. 1

разом в любом случае в жидкости улитки создается временной узор давления вблизи овального окна, по форме подобный (но не вполне точно) узору, существующему в воздухе.

Нелинейные характеристики среднего уха

Если сила звука возрастает при прочих равных условиях, то временные узоры давления в жидкости улитки изменяются не только по величине, но и по форме. Для большой силы звука движения упругих мембран среднего уха переходят за предел, где отклонение пропорционально действующей силе. Кроме того упругость мембран несимметрична при сжатии и расширении. Известно, что при этих условиях возникают другие частоты, чем те, которые имеются в первоначальном звуке. Так например при большой силе звука чистый тон с частотой f при передаче

в улитку превращается в тон, содержащий частоты $f, 2f, 3f, 4f$ и т. д. Компоненты, прибавляющиеся к звуку в процессе передачи через среднее ухо, носят название субъективных тонов; их амплитуда может быть измерена опытным путем. Подведем к уху чистый тон известного уровня силы*, в то же время подведем второй тон, различающийся по частоте от исследуемой гармоникой на 2—3 цикла. Тогда между исследуемой субъективной гармоникой и вторым тоном возникнут биения. Если подобрать силу второго тона так, чтобы биения сделались наиболее отчетливыми, тогда его сила будет служить мерой интенсивности субъективной гармоникой. На рис. 2 показана измеренная таким способом интенсивность субъективных гармоник для различных по силе возбуждающих тонов; эти кривые построены на основании измерений, сделанных Грэхэмом. Абсциссы показывают номер гармоникой (основной тон есть первая гармоника), а ординаты — уровень интенсивности субъективных тонов. Например тон, имеющий основную гармоникой на нулевом уровне (1μ в m/cm^2) будет давать субъективные гармоникой, лежащие на уровнях —1,4; —2,6; —3,7 и —4,8 бел соответственно для второй, третьей, четвертой и пятой гармоникой. Точное определение интенсивности субъективных тонов трудно, однако в пределах ошибок наблюдений и индивидуальных колебаний найдено, что приведенная на рис. 2 серия кривых характеризует возникновение субъективных гармоникой для тонов любой ча-

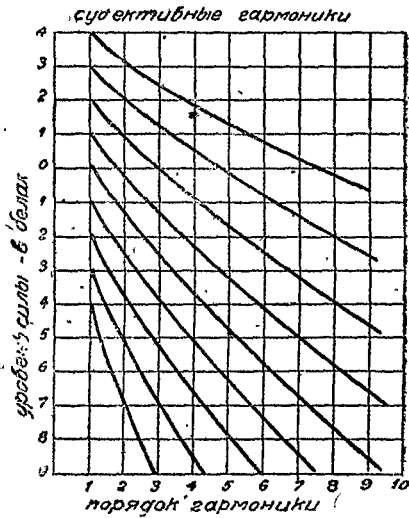


Рис. 2.

...циссы показывают номер гармоникой (основной тон есть первая гармоника), а ординаты — уровень интенсивности субъективных тонов. Например тон, имеющий основную гармоникой на нулевом уровне (1μ в m/cm^2) будет давать субъективные гармоникой, лежащие на уровнях —1,4; —2,6; —3,7 и —4,8 бел соответственно для второй, третьей, четвертой и пятой гармоникой. Точное определение интенсивности субъективных тонов трудно, однако в пределах ошибок наблюдений и индивидуальных колебаний найдено, что приведенная на рис. 2 серия кривых характеризует возникновение субъективных гармоникой для тонов любой ча-

* Уровень силы звука определяется по отношению к условно взятому нулевому уровню в 1μ в m/cm^2 и измеряется в беллах или децибеллах. 1 бел соответствует уровню силы в 10μ в m/cm^2 , 2 бела — в 100μ в m/cm^2 , 3 бела — 1000μ в m/cm^2 , 1 бел = db; db — децибел. Перев.

стоты. Такого результата следовало ожидать, так как перегрузка механизма среднего уха зависит от физической силы падающего звука, а не от его уровня ощущения*.

Далее можно ожидать, что перегрузка должна зависеть от амплитуды колебания барабанной перепонки и слуховых косточек, связанных с ней. В согласии с только что приведенными опытными данными надо предполагать, что импеданс (механический) барабанной перепонки должен иметь характер реакции упругости, а не сопротивления или массы. Недавняя работа Трөгера** показывает, что импеданс уха имеет как раз такой характер за исключением высоких частот. Важно подчеркнуть, что кривые на рис. 2 относятся к уровням силы звука, а не к уровням ощущения. Если интенсивность субъективных тонов выразить по отношению к порогу слышимости, то например для тона в — 4 октавы*** (т. е. 62,5 кол.) получатся на основании вышеприведенных наблюдений уровни ощущения 4,4; 4,6; 4,4; 3,8 и 3,0 бел. Ясно таким образом, что вторая гармоника имеет более высокий уровень ощущения, чем основной тон.

На рис. 3 приведены результаты наблюдений для четырех различных уровней силы для тона в 50 колебаний в секунду. Из кривых ясно, что для двух верхних кривых уровень ощущения первых 5 обертонов выше, чем для основного тона. Следует оговориться, что данные, послужившие для составления кривых, были немногочисленны и что измерения с данным ухом дают результаты, которые часто могут значительно отклоняться от приведенных средних кривых. Благодаря указанной нелинейности передающего механизма среднего уха, отношение амплитуд давления в улитке к амплитудам давления в воздухе перед ухом будет значительно меньше для сильных звуков, чем для слабых. По мере возрастания силы звука передающая си-

* Уровень ощущения отсчитывается от порога слышимости и измеряется в белах или децибелах.

** Tröger, Phys. Zs. 31, S. 26, 1930, Jan.

*** Высота тона по предложению Флетчера измеряется в октавах, отсчитываемых вверх и вниз от тона 1000 колебаний в секунду.

стема все более и более перегружается, и следовательно отдача соответственно уменьшается. Для уровней силы ниже —6 белов давление в улитке пропорционально действующему давлению. Для более высоких уровней передача на основном тоне падает за счет возникновения обертонов. Если бы в течение колебания смещение у овального окна было бы одинаково по обе стороны от нейтрального положения, тогда возникли бы только четные гармоники. Ввиду

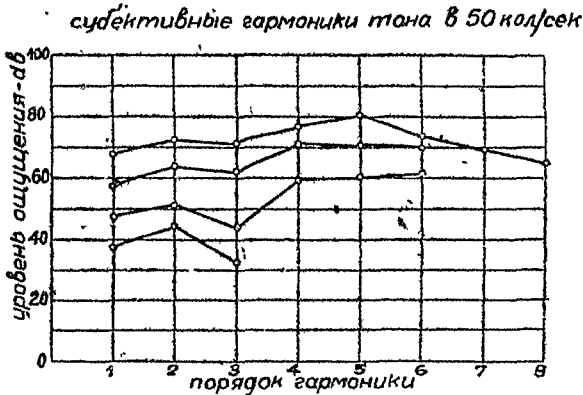


Рис. 3.

того что наблюдаются и четные и нечетные гармоники, то ясно, что колебание несимметрично и имеет место выпрямляющее действие. Таким образом механизм внутреннего уха обладает и нелинейностью и несимметричностью.

МЕХАНИКА ВНУТРЕННЕГО УХА

Для упрощения картины мы рассмотрим сначала характер движения в отсутствии субъективных гармоник. Пусть чистый тон передается через среднее ухо в жидкость улитки, прилежащую к овальному окну. Спрашивается, каково будет движение жидкости в улитке и в частности каково будет движение основной мембраны, в которой расположены нервные окончания.

С самого начала я хотел бы подчеркнуть, что удовлетворительного решения этой задачи до сих пор не дано, не

является таковым и решение предлагаемое ниже. Вегель и Лэн* в своей работе о маскировании тонов дают хорошее приближение к решению задачи на основе электрической аналогии улитки. Однако они не делают численных подсчетов благодаря ненадежности входящих в задачу постоянных. Несмотря на то, что ниже развиваемое упрощенное решение задачи может вызывать много возражений, все-таки оно, может быть, имеет значение, так как помогает лучше понять механизм действия улитки.

Согласно резонансной теории Гельмгольца, колебание, сообщаемое стремением жидкости улитки распространяется на некоторое расстояние, зависящее от высоты тона, вдоль вестибулярного хода (*scala vestibuli*), затем проходит через основную мембрану (*membrana basilaris*) и возвращается обратно по барабанному ходу (*scala tympani*) к круглому окну. Нервные окончания возбуждаются в том месте, где колебание проходит через основную мембрану, и посылают импульсы по слуховому нерву, который проводит их к мозгу.

Рассмотрим малый элемент основной мембраны длиной δx и шириною w , расположенный на расстоянии x от овального (и круглого) окна, рис. 4. Синусоидальное давление p , приложенное к овальному окну, передается через жидкость и заставляет этот элемент колебаться. Задача заключается в том, чтобы определить закон его колебаний. Если колебания звукового давления медленны, то любая поверхность равной величины вдоль основной мембраны испытывает практически одинаковую силу в данный момент времени. Следовательно силы на обе стороны рассматриваемого элемента равны и противоположны, вследствие чего элемент будет находиться в равновесии. При увеличении частоты получается избыточное давление на верхней стороне элемента, вследствие чего элемент приходит в движение. Сила F , вызванная этим избыточным давлением, будет

$$F = k_r w \delta x P \cos \omega t, \quad (1)$$

* Wegel and Lane, Phys. Rev. Feb. 1924

где P — амплитуда давления у овального окна и $\frac{\omega}{2\pi}$ — частота колебания. Коэффициент k_f вводится на основании приведенных выше соображений; он меняется от единицы при высоких частотах до нуля при очень низких.

Силы реакции, противодействующие приложенной силе, вызываются инерцией системы, трением в движущейся жидкости и упругостью основной мембраны в той области, где через нее проникают колебания. Эффективная масса обусловлена почти целиком соколеблющейся жидкостью по обе стороны от элемента мембраны. Естественно принять, что эффективная масса m определяется выражением:

$$m = k_m w \delta x \cdot x, \quad (2)$$

т. е., выражая словами, это значит, что эффективная соколеблющаяся масса жидкости пропорциональна расстоянию элемента от овального окна или, иначе говоря, пропорциональна количеству жидкости, движущейся совместно с элементом мембраны. Очевидно, что это было бы верно, если представить движение по упрощенной схеме рис. 4; здесь колонна жидкости, совершающая колебания как одно целое, имеет площадь, равную площади элемента $w\delta x$, и простирается от овального окна до элемента на расстояние x и обратно на то же расстояние до круглого окна. В данном случае, очевидно, $k_m = 2$, так как плотность жидкости равна приблизительно единице. Хотя движение не может быть так просто, как это только что предположено, все же общий характер движения, вызываемого тонами различной высоты, вероятно, подобен написанному и разнится лишь количественно. Поэтому мы будем считать, что уравнение (2) в первом приближении верно.

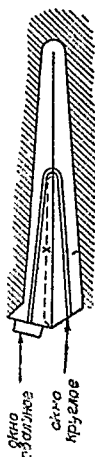


Рис. 4.

Упругость S главным образом присуща самому элементу, хотя, конечно, некоторая упругость прибавляется благодаря реакции овального и круглого окна, а также слуховых косточек. Упругость пропорциональна числу поперечных волокон мембраны, проходящих через элемент δx , пропор-

циональна натяжению мембраны T и обратно пропорциональна длине элемента w , т. е., иными словами, ширине мембраны в точке x . Таким образом:

$$S = k_s \frac{\delta x T}{w} \tag{3}$$

Хорошо известно, что такая система имеет собственную частоту, определяемую выражением:

$$\omega_0^2 = (2\pi f_0)^2 = S / m = \frac{k_s}{k_m} \frac{T}{w^2 x} \tag{4}$$

Это выражение дает связь между частотой f_0 тона, действующего на ухо, и положением x наибольшего возбуждения на основной мембране.

Рассмотрим анатомические данные в связи с выражением (4) и попробуем на основании их определить положение наибольшего возбуждения при тонах различных частот. Ширина w может быть измерена очень точно посредством микроскопических срезов. Здесь наблюдаются значительные индивидуальные отклонения; средние величины даны на рис. 5, кривая w . Мы видим что w меняется от 0,08 до 0,5 мм при изменении x от 1 до 31 мм. Анатомические исследования показывают, что натяжение T поперечных волокон убывает по мере возрастания x , но количественных данных в этом отношении нет. Мы предполагаем возможность трех различных типов зависимости T от x и приводим на рис. 5 результаты соответствующих подсчетов. В случае I принято, что натяжение T поперечных волокон постоянно по всей длине мембраны. В случае II принято, что натяжение равно-

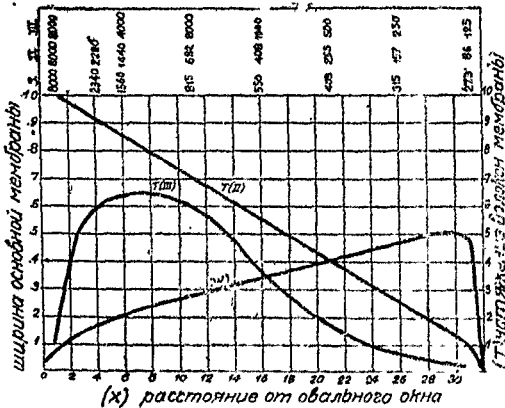


Рис. 5.

изменению x от 1 до 31 мм. Анатомические исследования показывают, что натяжение T поперечных волокон убывает по мере возрастания x , но количественных данных в этом отношении нет. Мы предполагаем возможность трех различных типов зависимости T от x и приводим на рис. 5 результаты соответствующих подсчетов. В случае I принято, что натяжение T поперечных волокон постоянно по всей длине мембраны. В случае II принято, что натяжение равно-

будения при тонах различных частот. Ширина w может быть измерена очень точно посредством микроскопических срезов. Здесь наблюдаются значительные индивидуальные отклонения; средние величины даны на рис. 5, кривая w . Мы видим что w меняется от 0,08 до 0,5 мм при

мерно спадает в отношении 10 к 1 от овального окна к геликотреме. В случае III изменение T выбрано так, чтобы получилось равномерное распределение высоты тона вдоль основной мембраны на протяжении шести октав. Отношение k_s/k_m определялось так, чтобы для резонатора при $x=1$ получилась частота 8000 кол./сек.

Из анатомии улитки видно, что положение наибольшего возбуждения для высоких тонов должно лежать близ овального окна и по мере понижения тона оно должно перемещаться к геликотреме*. Мы видим из рис. 5, что необходимая область восприятия тонов может быть получена без каких-либо невероятных предположений относительно пределов изменения натяжения волокон вдоль основной мембраны. Даже если не предполагать изменения натяжения T вдоль мембраны, все же удастся получить изменение резонанса в пределах от 275 до 8000 кол./сек. Большинство авторов, затрагивавших эту проблему, принимали, что квадрат резонансной частоты обратно пропорционален длине поперечных волокон w . При наших предположениях ω_0^2 оказывается обратно пропорциональным w^2 ; это обусловлено тем, что по нашему предположению эффективная масса, обусловленная соколеблющейся жидкостью, связанной с данными элементами мембраны, убывает пропорционально уменьшению w . Иными словами, эффективная колеблющаяся колонна имеет как раз ширину w основной мембраны в точке возбуждения. Десятикратное изменение T достаточно, чтобы объяснить изменение от 86 до 8000 кол./сек. Если мы примем, что дуги Корти начинаются уже при $x=0,5$ мм и что w меняется, как было указано выше, то диапазон повышается до 16 тыс. кол./сек. Это, конечно, верно в предположении, что уравнение (4) сохраняет свою силу для малых значений x , что вряд ли возможно считать вполне правильным.

Определение минимально воспринимаемой разницы высоты тона показало**, что распределение частоты вдоль основной мембраны наиболее близко к случаю III. На этом основании

* Геликотрема — отверстие, соединяющее барабанный и вестибулярный ходы, лежащее у вершины улитки. Перев.

** Wegel and Lane, l. c.

в дальнейших выводах принимается следующее простое соотношение, связывающее высоту тона P_0 (или частоту его f_0) и положение возбуждения x (в мм) на основной мембране*.

$$P_0 = \frac{16 - x}{5}, \quad (5)$$

или

$$\lg_{10} f_0 = \frac{16 - x}{16,6} + 3; \quad (6)$$

это соотношение имеет место при изменении x от 1 до 31 мм. Согласно этой гипотезе положение максимумов резонанса распределяется вдоль основной мембраны равномерно (в логарифмической шкале) при изменении высоты возбуждающего тона от -3 до $+3$ октав (от 125 до 8000 кол./сек.). Возбуждающие тоны, имеющие высоты выше или ниже этих пределов, не создают условий резонанса в улитке. Это может быть одной из причин, почему чувствительность выше и ниже этих пределов падает.

Установив соотношение между f_0 и x , рассмотрим форму колебаний основной мембраны. Если бы мы имели дело с отдельными устойчивыми резонаторами, а не с системой взаимно связанных неустойчивых, то задача была бы гораздо проще. Но, как мы видели, дело обстоит не так. Упругость участка мембраны, отвечающего на данный тон, остается почти постоянной, но эффективная масса, соколеблющаяся с ним, а также и сопротивление r изменяются.

Продолжение колебания после того, как возбуждающая периодическая сила прекращает действовать, зависит от отношения сопротивления r к массе m , т. е. от множителя затухания, который дается (в белых в секунду) выражением

$$\Delta = 0,434 \frac{r}{m}. \quad (7)$$

Трудно осуществить точное определение Δ на основании анатомии улитки; нижеприводимые рассуждения выясняют лишь те факторы, которые влияют на затухание.

* Здесь высота тона выражена в октавах по отношению к тону 1000 кол./сек.; $\lg_{10} f$ между f и P имеет место связь: $P \lg_{10} 2 \pm 3$. Перев.

Рассмотрим жидкую трубку, длиною $2x$ и поперечным сечением $w\delta x$,двигающуюся медленно взад и вперед внутри более широкой трубки, наполненной той же жидкостью; это поясняется в сечении на рис. 6. Если поперечное сечение такой трубки мало, то сила трения пропорциональна взаимодействующей поверхности, а именно $2x \cdot 2(w + \delta x)$, умноженной на скорость; множитель пропорциональности будет равен η/d , где η —коэффициент вязкости, а d —эффективное расстояние от поверхности внутренней трубки до внешних стенок. Величина d примерно такова, как показано на рис. 6. Коэффициент затухания при условии, что δx мало по сравнению с w , будет приблизительно равен

$$\Delta = 0,868 \frac{\eta}{\delta x d} . \quad (8)$$

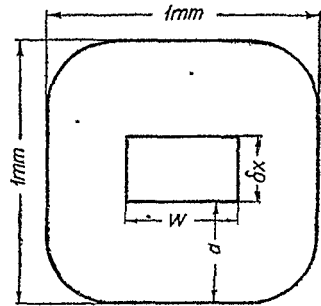


Рис. 6.

Мы видим, что Δ не зависит от длины трубки жидкости, но зависит от δx .

Если толщина δx соответствует одной дуге Корти, то $\Delta = 30$ бел в сек.; если же положить ее равной ширине w , то $\Delta = 570$ бел в секунду.

Можно было ожидать, что величина Δ для случая элемента основной мембраны, входящего в наше рассмотрение, будет лежать в этих именно пределах. Приведенное рассуждение приводит к заключению, что следует считать Δ независимым от x , т. е. одинаковым для различных точек вдоль основной мембраны.

Воспользовавшись найденными выражениями для F , m и S , мы можем найти смещение y элемента δx от положения равновесия.

Для синусоидального движения:

$$y = A \cos (\omega t - \Theta), \quad (9)$$

мы найдем для амплитуды A следующее значение:

$$A = \frac{1}{4\pi^2} \frac{k_s}{k_m} \frac{P}{x [(f_0^2 - f^2)^2 + (0,87 f \Delta)^2]^{1/2}} \quad (10)$$

и для фазового угла:

$$\operatorname{tg} \theta = 0,37 \Delta \frac{1}{f_0^2 - f^2} \quad (11)$$

Было указано, что коэффициент k_f меняется от нуля при очень низких частотах до единицы при высоких частотах и что k_m имеет значение близкое к 2. Полагая $k_f = 1$; $k_m = 2$; $\Delta = 70$ и $P = 1$ бар, мы производим вычисление A и θ для различных частот. Результат этих вычислений приводится в табл. I. Соотношение между f_0 и c принято в виде уравнения (6).

ТАБЛИЦА I

$f = 75$			$f = 125$			$f = 250$			$f = 500$		
π	$A \cdot 10^3$	θ	π	$A \cdot 10^3$	θ	π	$A \cdot 10^3$	θ	π	$A \cdot 10^3$	θ
10	0,2	0°	10	0,2	0°	10	0,2	0°	10	0,2	0°
20	2	0°	20	2	1°	20	3	2°	15	0,8	1°
25	7	2°	25	8	8°	25	30	27°	20	8	9°
30	28	7°	30	71	33°	25,8	67	62°	20,5	16	19°
31	40	11°	31	126	90°	26	75	90°	21	46	90°
						27	28	157°	21,5	17	153°
						31	8	172°	22	9	168°
									25	3	176°
									31		

$f = 1000$			$f = 2000$			$f = 4000$		
π	$A \cdot 10^3$	θ	π	$A \cdot 10^3$	θ	π	$A \cdot 10^3$	θ
10	0,3	0°	5	0,2	0°	5	0,5	1°
15	2,6	5°	10	1,0	2°	5,5	1,0	2°
15,5	5,4	10°	10,5	2,0	5°	5,8	2,3	6°
16,0	30,4	90°	11,0	22	90°	6,0	20	90°
16,5	5,8	169°	11,5	2,3	174°	6,2	2,4	173°
17,0	3,1	174°	12,0	1,1	177°	6,5	1,0	177°
20,0	0,9	178°	15,0	0,3	179°	7,0	0,7	178°
31	0,4	178°	31	0,1	179°	20	0,04	180°

Величины A даны в 10^{-3} см; эта величина соответствует порядку величины диаметра молекул. Если мы подсчитаем значения скорости или ускорения для какой-либо частоты,

то относительные амплитуды будут такие же, как и для *A*. Равным образом и кривизна мембраны будет меняться по синусоидальному закону с относительной амплитудой, мало отличающейся от приведенной в таблице для *A*. Это говорит нам, иными словами, что узоры возбуждения на мембране для тона, лишенного гармоник (объективных или субъективных), будут таковы же, как узоры амплитуды. Легко видеть, что резонансные пики гораздо острее для высоких частот, чем для низких. Этот результат согласуется с данными маскирования двух тонов, как мы увидим ниже.

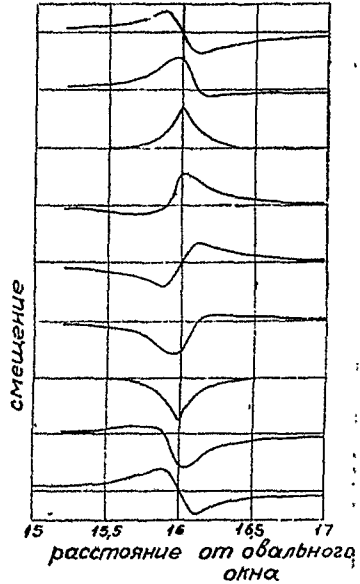


Рис. 7.

Важно отметить, что согласно сделанным допущениям, а равно и согласно другим приемлемым допущениям, которые можно сделать, та часть мембраны, которая ближе к овальному окну, будет опережать по фазе более далекие части. Таким образом, если нарисовать схематически кинематограмму формы мембраны через каждую $1/8$ периода, то мы получим ряд кривых, подобных изображенным на рис. 7; эти кривые нанесены по числам табл. 1 для случая $f = 1000$ кол./сек. Бекеша* предположил, что такое движение мембраны приводит к возникновению вихрей в жидкости над областью максимума возбуждения. При громких возбуждающих тонах он наблюдал такие вихри как в модели лабиринта, так и через отверстие лабиринта на трупе. Он считает, что причиной возбуждения нервов является постоянное давление, производимое на мембрану этим вихрем. Бекеша считает, что подобный вихрь производит движение жидкости в полукружных каналах и приводит к возбуждению органы

* Békésy, Phys. Zs., 29, S. 793, 1928.

равновесия, вследствие чего при сильных высоких звуках происходит рефлекторный наклон головы в сторону уха, воспринимающего звук. Он утверждает, что подобные наблюдения были сделаны достаточное число раз, чтобы доказать его точку зрения. Однако следует думать, что такие вихри вряд ли могут возникать, если только звук не достигает очень большой силы. Кроме того представляется трудным объяснить эффект маскировки иначе, как возбуждением нервных окончаний, вызываемым колебаниями основной мембраны, двигающейся подобно тому, как это было нами предположено.

ТАБЛИЦА II

f	Относительная обратная величина давления при пороге слышимости (чувствительность)	Относительное смещение	Относительная скорость	Относительное ускорение
75	0.004	1.22	0.09	0.007
125	0.024	4.14	0.52	0.065
250	0.125	2.47	0.62	0.17
500	0.500	1.52	0.76	0.38
1 000	1.000	1.00	1.00	1.00
2 000	1.250	0.73	1.47	2.84
4 000	1.250	0.62	2.48	9.92
8 000	0.180	0.64	5.12	40.96
12 000	0.050	0.027	0.22	1.72
		0.0036	0.043	0.52

В табл. II даны относительные значения максимального смещения, скорости и ускорения, вызываемых тонами различных частот f , дающими одну и ту же амплитуду давления P внутри улитки и приведены кроме того обратные величины амплитуды давлений воздуха, необходимой, чтобы вызвать ощущение едва слышимого тона.

Для 8 000 подсчитан второй ряд значений в предположении, что нервные окончания не идут ближе, чем $x = 1,5$ вместо $x = 1$ мм. Из таблицы видно, что для частот выше 1 000 кол./сек. данные чувствительности, вычисленные на основании порога слышимости, лучше согласуются с изменением максимальной скорости, а для тонов ниже 1000 кол./сек. с изменением максимального ускорения. Эти расчеты сде-

ланы в предположении, что P — давления у овального окна постоянны для тонов разной высоты. Как было упомянуто выше, измерения импеданца барабанной перепонки * показывают, что для постоянной силы тона в воздухе при частотах ниже 1000 кол./сек., благодаря тому, что импеданц барабанной перепонки определяется в этой области ее упругостью, получается скорее постоянная амплитуда, чем постоянная скорость барабанной перепонки. Следовательно величины P , определяющиеся скоростью барабанной перепонки в этой области частот, будут пропорциональны частоте, если считать, что не возникнут еще другие изменения в процессе передачи через внутреннее ухо. Вводя в вычисление этот новый фактор, мы убеждаемся, что относительные значения скорости в области ниже 1000 кол./сек. будут соответствовать значениям, приведенным в столбце ускорений. С этой поправкой величины скорости по всему диапазону согласуются настолько хорошо, насколько можно было ожидать для подобных расчетов с обратными величинами давления на пороге слышимости (чувствительность). Коэффициент k , становится меньше для низких частот, что приводит к уменьшению вычисляемых скоростей в низких частотах и дает еще лучшее совпадение с опытом. Из приведенных результатов вычислений можно с известной уверенностью заключить, что одинаковое возбуждение нервов в различных частях мембраны получается при одинаковых амплитудах скорости, хотя бы частоты и были различны. Вряд ли можно ожидать, что уравнения (10) и (11) дают значения, хорошо согласные с действительными пространственными узорами возбуждения, исключая областей поблизости от максимума резонанса.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ УЗОРОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ ИЗ ДАННЫХ МАСКИРОВКИ.

Пространственные узоры возбуждения вдоль всей длины основной мембраны можно определить из наблюдений маскирования тонов. На рис. 8 и 9 приведены результаты

* Tröger, l. c. S. 34.

определения маскировки для моего левого уха (по методу Вегеля и Лэна * для возбуждающих тонов 75, 125, 250, 500 и 1000 кол./сек. Уровень силы звука для всех этих тонов был одинаковый — 20 db, т. е. 0,01 μ в т/см². Соответственно этому уровни ощущения оказались равными 27, 40, 54, 65 и 72 db. Вертикальные сплошные линии представляют уровень ощущения основного тона и субъективных

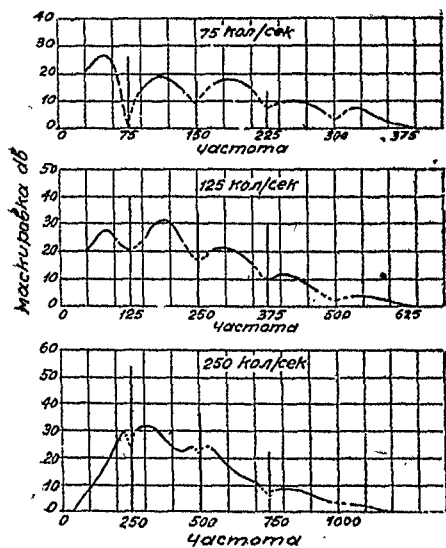


Рис. 8.

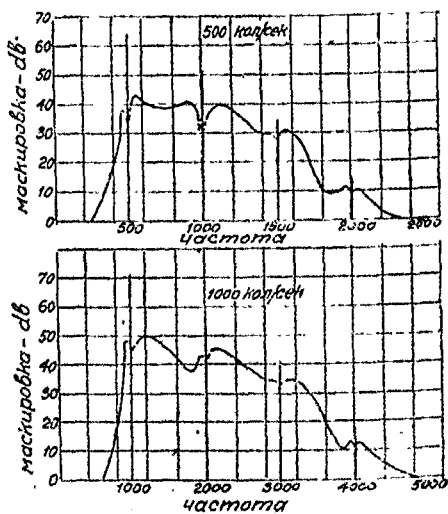


Рис. 9.

гармоник, определяемых по методу „наилучших биений“. Ординаты кривых выражают степень маскировки, т. е. число децибелов, на которое повышается порог слышимости при наличии исследуемого тона. Интересно отметить, что при данных условиях каждый из 5 вышеуказанных тонов возбуждает одинаковое число слышимых субъективных гармоник, причем они лежат примерно на тех же уровнях силы звука. Например уровни силы звука второй гармоники будут 42, 41, 49, 34 и 42 db ниже нулевого уровня. Третья гармоника лежит соответственно на 56, 52, 67, 60 и 53 db, четвертая на 67, 75, 82, 85 и 86 db ниже нулевого уровня.

Для тона в 75 кол./сек. и для более низких тонов субъек-

* Wegel and Lane, Phys. Rev., 19, p. 492, 1922.

тивные гармоники можно слышать до предела слышимости тона. Так например, если на ухо действуют тоны 50 и 103 кол./сек. одновременно, тогда для силы звука тона в 50 кол., при которой он будет лежать еще только на пороге слышимости, можно уже найти подходящую силу звука для тона в 103 кол., при которой будет слышно 3 биения в секунду. Это обстоятельство делает затруднительным применение данных маскировки для определения формы колебаний основной мембраны для чистых низких тонов, так как уже на пороге слышимости возникают сильные субъективные гармоники.

Если воспользоваться уравнением (10), дающим связь

между f и x , то можно найти кривые уровня возбуждения из рассмотрения кривых маскировки. Уровень возбуждения для основного тона и гармоник дан на кривых рис. 8 и 9. Для промежуточных точек, где приходится базироваться только на данных маскировки, определение менее надежно. Если принять, что маскируемый тон едва слышим, когда он лежит на том же уровне ниже маскируемого, как в случае равенства высот тонов, тогда можно применить данные определения минимальной воспринимаемой разницы в силе звука. Эти данные показывают, что если маскирующий тон лежит на уровне большем 40 db, то маскируемый тон лежит всегда примерно на уровне 20 db ниже маскирующего, т. е. составляет по силе примерно 0,01 или 1% от силы маскирующего тона. По мере понижения маскирующего тона ниже уровня 40 db разница между уровнями маскирующего и маскируемого тонов уменьшается от 20 db до нуля. Таким способом построены кривые на рис. 10.

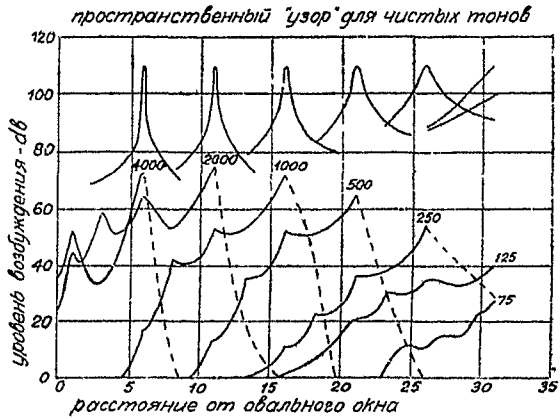


Рис. 10.

Правая часть кривой для каждого тона дана пунктиром, чтобы ход кривых был виден более отчетливо. Кривые наверху рисунка, проведенные тонкими линиями, вычислены по данным табл. I, причем амплитуды выражены в децибелах, а все максимальные значения помещены на общем уровне. Ясно видно, что на протяжении 3—4 мм по длине

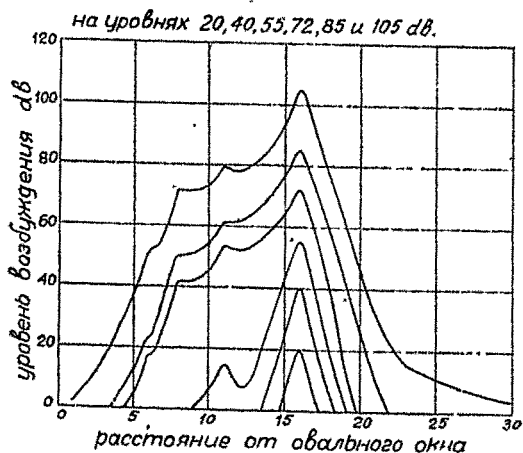


Рис. 11.

основной мембраны эти кривые имеют одинаковую форму с кривыми маскировки. В сторону больших частот кривые маскировки спадают более круто, чем резонансные кривые. Мы видим таким образом, что при воздействии на ухо указанных тонов на основной мембране возникает пространственное распределение или

узор возбуждения, соответствующий синусоидальному временному узору давления в воздухе.

Подобным же образом для любого звука, действующего на ухо, на основной мембране улитки получается некоторый пространственный узор возбуждения, соответствующий временному узору звукового давления в воздухе. Этот пространственный узор возбуждения на основной мембране передается мозгу по нервному „кабелю“, содержащему около 3 тыс. отдельных нервных волокон. Пространственный узор возбуждения зависит как от характера звука (высоты и тембра), так и от силы его воздействия на ухо. Это последнее обстоятельство ясно выступает из рассмотрения рис. 11, который показывает узоры возбуждения для тона 1000 кол./сек. при различных силах звука; сила звука основного тона характеризуется максимумом каждой кривой, который дает уровень возбуждения данного тона

по отношению порога слышимости. Эти кривые получены из наблюдений маскировки и по методу „наилучших биений“, описанному выше.

МЕХАНИЗМ НЕРВНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Прежде чем рассмотреть, каким образом узор возбуждения на основной мембране связан с громкостью, рассмотрим детальнее механизм возбуждения нервов. „Слуховой нерв“* по своему строению очень напоминает телефонный кабель. Он содержит около 3 000 нервных волокон, каждое из которых состоит из „осевого цилиндра“, окруженного жировым веществом — миелином. Ось цилиндра имеет диаметр около 0,001 см и составляет всего около 9% диаметра волокна. Таким образом нервные волокна построены чрезвычайно сходно с изолированными жилами телефонного кабеля. Эта аналогия в структуре побудила некоторых физиологов к заключению, что все нервные импульсы имеют электрическое происхождение и что их передача подобна электрической передаче по телефонному кабелю. Однако эта теория оказалась несостоятельной.

Большинство первоначальных опытов в отношении нервной проводимости было сделано с двигательными нервами, и взгляд на механизм нервной проводимости, приводимый здесь, базируется на многочисленных исследованиях такого рода. Однако недавняя работа Эдриана** показала, что действие чувствительных нервов по существу таково же. Нервный импульс может быть возбужден тепловым, химическим, электрическим или механическим стимулом; он может быть возбужден также рефлекторно. Детрагиваясь до нерва раскаленной докрасна проволокой, смазывая его кислотой или делая укол, мы во всех случаях вызываем возникновение нервного импульса. В физиологических лабораториях для возбуждения обычно пользуются индук-

* Нижеприводимый абзац включен для большей ясности из книги Г. Флетчера „Речь и слух“ (Speech and Hearing, p. 125—128). Перев.

** Adrian, The Basis of Sensation, 1928.

ционной катушкой с прерывателем. Для возбуждения импульса сила воздействия и скорость его изменения должны превосходить некоторый минимум. Оказалось, что нервный импульс, распространяющийся по нерву, совершенно непохож на электрический ток, идущий по проводу. Отдельное нервное волокно или совершенно не проводит нервного импульса, или же посылает возбуждение с полной силой. Другими словами, в нервном волокне сила импульса будет или наибольшая возможная, или возбуждения вовсе не будет, причем характер возбуждения роли не играет. Минимальная величина раздражающего воздействия различна для различных волокон, составляющих нерв.

Физиологи часто уподобляют процесс нервной проводимости горению пороховой трубки (в снаряде). Скорость распространения процесса горения вдоль такой трубки и количество тепла, выделяющегося во время горения, совершенно не зависят от того, каким путем трубка зажжена на конце. С этой точки зрения с очевидностью следует, что громкость звука непосредственно связана с числом возбужденных нервных волокон и числом посылаемых в единицу времени импульсов, так как ясно, что каждое волокно несет всегда лишь свой максимальный импульс. Кроме того следует считать, что минимальная возбуждающая сила звука для различных волокон должна различаться на значительную величину.

Правильность этой точки зрения прекрасно подтверждается опытами Портера и Гарта*. Нервы, вызывающие сокращение мышц, возбуждались электрическим импульсом. Сила возбуждающего тока постепенно возрастала. Последовательные сокращения мускула возрастали при этом не постепенно, но определенными ступенями, как это видно на рис. 12. Высота линий на рисунке показывает величины последовательных мышечных сокращений. Если слуховые нервы действуют подобным же образом, то по мере постепенного возрастания силы тона от предела слыши-

* E. L. Porter and V. W. Hart, Amer. Jour. of Physiol, Oct. 1923.

мости до больших громкостей, возбуждение, достигающее мозга, должно возрастать определенными ступенями, причем порог слышимости будет определяться возбуждением первого нервного волокна. Когда все нервные волокна возбуждены и число посылаемых каждым волокном импульсов достигает наибольшей возможной величины, то дальнейшее возрастание громкости невозможно.

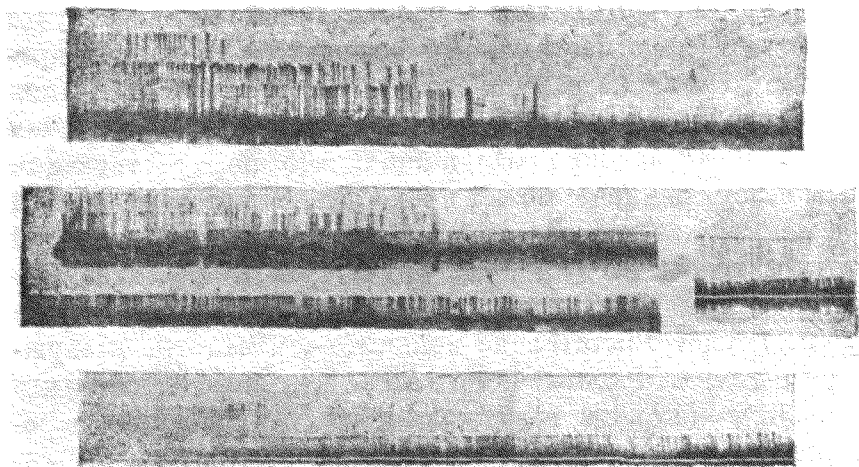


Рис. 12.

После прохождения импульса по нерву наступает так называемый „рефракторный“ период, в течение которого нерв неспособен ни возбуждаться, ни проводить возбуждение. Затем следует „относительный рефракторный“ период, в течение которого возбудимость, проводимость и скорость распространения импульса постепенно возвращаются от нуля к нормальной величине. Прежде чем возвратиться к нормальному состоянию, нерв становится „сверхнормальным“, т. е. более чувствительным, лучше проводящим и с большей скоростью распространения. Это сверхнормальное состояние постепенно прекращается, и нерв приходит в нормальное состояние. Только в течение относительного рефракторного периода нерв может посылать импульсы, уменьшенные по силе. Длительность рефракторного периода измерена многими наблюдателями, и, хотя имеются довольно

широкие расхождения, лучшие измерения настоящего времени оценивают его примерно в 0,001 сек., длительность же относительного рефракторного периода — примерно в 0,003 сек. Согласно этим данным ясно, что максимальное число импульсов возбуждения, которое может пройти по отдельному нервному волокну, не может превышать 1000 в секунду. Периодические возбуждения с частотой большей, чем 300 в секунду, уже не будут проводиться так, как нормальные импульсы, так как каждый последующий импульс будет приходиться на относительный рефракторный период предыдущего. Согласно работе Эдриэна нервные окончания имеют больший относительный рефракторный период, чем само нервное волокно. Он нашел, что по чувствующим нервам возбуждение не может проходить с частотой большей 150 в секунду. Следовательно, если чистый тон, имеющий частоту 2 или 3 тыс. кол. возбуждает ухо, то вероятно, что число нервных импульсов, посылаемых к мозгу в течение секунды, будет значительно меньше, чем частота возбуждающего звука. Работа Эдриэна показала также, что при увеличении силы возбуждающего стимула число нервных „разрядов“ возрастает.

Некоторые из нервных окончаний очень чувствительны, тогда как другие очень нечувствительны; прочие имеют степень чувствительности, лежащую посредине между этими пределами. Мы будем называть уровнем возбуждения данной точки основной мембраны отношение скорости движения в данной точке к скорости движения, необходимой для возбуждения наиболее чувствительных нервных волокон в группе нервов, расположенных на протяжении 1 мм по длине мембраны; уровень возбуждения мы будем выражать в логарифмических единицах, т. е. в белах или децибелах. Мы предположим, что распределение рubeжных величин для нервных окончаний в ухе будет подчинено такому же закону, как и для глаза. Пусть Z будет доля волокон, имеющих порог возбуждения, лежащий ниже некоторого уровня β ; тогда

$$\beta - \beta_0 = \log \frac{Z^2}{1-Z} \quad (12)$$

Постоянная β_0 есть величина (со знаком минус) правой части уравнения на пороге возбуждения; β_0 зависит от величины Z при пороге возбуждения. Как показал Гехт *, этот закон справедлив для нервных окончаний глаза.

По мере того как уровень возбуждения повышается над порогом данного нервного окончания, посылка нервных импульсов учащается. Рассмотрим этот процесс. Мы предположим, что в процессе возбуждения нерва имеются две противоположные фазы. Первая фаза, которую мы назовем активной, зависит от силы движения мембраны; за время этой фазы создается некоторое вещество или энергия, которая действует каталитически и вызывает нервный импульс. Вторая фаза, которую мы назовем реактивной, заключается в обратном процессе, который разрушает или уничтожает результат активного процесса. Назовем то, что создается в результате активного процесса, „возбудителем“ **; это может быть энергия движения данного элемента нервного окончания или вещество, возникающее в результате химического процесса, или же некоторое электрическое накопление. Активный процесс создает „возбудитель“ со скоростью, зависящей от силы возбуждения; реактивный процесс разрушает „возбудитель“ со скоростью, пропорциональной наличному его количеству. Если возбудитель есть энергия колебания, тогда силы трения представляют реактивный процесс. Назовем количество возбудителя через q . В первом приближении примем, что скорость возникновения q пропорциональна энергии движения ***, а скорость его разрушения пропорциональна q . Формулируя это математически, получаем дифференциальное уравнение:

$$\frac{dq}{dt} = av^2 - bq, \quad (18)$$

* H e c h t, Proc. of Michelson Mtg. of Opt. Soc. of Amer, Nov., 1928.

** Автор применяет термин „запал“ — discharger.

*** Это предположение произвольно, оно приводит к заключению, что в мозгу возникают пульсации двойной частоты. Можно сделать другие предположения, чтобы получить в результате пульсации основной частоты и ее гармоники. ††

где a и b — постоянные, не зависящие от x и t , а v — скорость мембраны в том пункте, где расположено данное нервное окончание.

Для случая периодической силы, производимой чистым тоном:

$$v = V \cos \omega t. \quad (14)$$

Подставляя это выражение в уравнение (13) и интегрируя его при условиях:

$$q = 0 \text{ при } t = 0,$$

находим:

$$q = \frac{aV^2}{2b} (1 - e^{-bt}) - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\omega}{b}\right)^2}} [\cos(2\omega t - \theta) - e^{-bt} \cos \theta] \quad (15)$$

где $\operatorname{tg} \theta = \frac{2\omega}{b}$. Если b мало по сравнению с ω , то

$$q = \frac{aV^2}{2b} \left((1 - e^{-bt}) - \frac{b}{2\omega} \sin 2\omega t \right). \quad (16)$$

Итак мы видим, что количество возбудителя в данный момент пропорционально энергии колебания, обратно пропорционально b и прямо пропорционально количеству в скобках, которое является функцией времени. Этот процесс продолжается, пока не будет достигнута величина порога возбуждения для данного нервного окончания, и тогда начинается новый процесс возбуждения нерва. В то время когда идет этот второй процесс, равновесие нарушается, и накопление „возбудителя“ прекращается. Этот период остановки первого процесса есть время реакции (рефракторный период) нервного окончания. После периода реакции активный процесс начинается вновь. При больших силах звука число импульсов в секунду будет зависеть главным образом от длительности периода реакции, тогда как при малой силе звука оно определяется главным образом временем накопления „возбудителя“.

Для иллюстрации уравнения (16) оно представлено графически на рис. 13 для частот 125 и 500 кол./сек., при-

чем принято $b = 125$. Данное нервное волокно может получить количество q , необходимое для возбуждения или за короткое время t при большой скорости V , или за длинное время t при малой скорости V . Следовательно для данной величины V чувствительные волокна требуют для возбуждения лишь короткого времени t , нечувствительные же волокна — более долгого времени. Из чертежа мы видим, что

для тона 125 кол./сек. q возрастает почти в 10 раз за время от 0,01 до 0,003 сек., тогда как за время от 0,003 до 0,005 сек. оно почти не меняется. Очевидно, что число импульсов, исходящих от возбужденного пучка нервных волокон за время первого

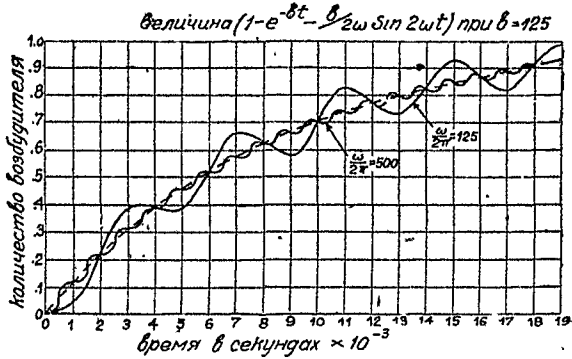


Рис. 13.

периода, будет гораздо больше, чем за время второго. Следовательно „бомбардировка“ мозга нервными импульсами будет иметь максимумы интенсивности, разделенные интервалами, равными полупериоду колебания возбуждающего звука. Иными словами, временные узоры колебаний, происходящих в среде, передающей звуковые волны, будут передаваться также и мозгу. Нам кажется правильным поэтому считать, что существует некоторого рода соотношение между частотой нервных импульсов, достигающих мозга, и временным узором возбуждающей ухо волны. По мере увеличения частоты тона временной узор в нервной волне становится менее отчетливым, так как отношение $\frac{b}{2\omega}$ становится меньше. Как видно из рисунка, для 500 кол./сек. пульсации становятся гораздо меньше. Отклонения от экспоненциальной кривой для тона в 5000 кол./сек. были бы еще в 10 раз меньше, чем для тона 5000 кол./сек.

Для больших величин скорости V нервы будут „разря-

каться“ через очень короткий промежуток времени, для малых величин V „разряд“ будет происходить через более долгое время или не произойдет вовсе. Пусть V_1 будет величина скорости для уровня возбуждения β такого, что q соответствует порогу раздражения для некоторого нервного волокна, возбуждаемого достаточно долго, так что e^{-bt} становится мало по сравнению с единицей и выражение в скобках в уравнении (16) достигает своего максимального значения $\left(1 + \frac{b}{2\omega}\right)$. Пусть, далее, V_2 другая скорость, большая чем V_1 , соответствующая уровню α , которая дает такое же количество q за время t . Тогда:

$$V_1^2 \left(1 + \frac{b}{2\omega}\right) = V_2^2 \left(1 - e^{-bt} - \frac{b}{2\omega} \sin 2\omega t\right); \quad (17)$$

$$\alpha - \beta = \log \frac{1 + \frac{b}{2\omega}}{1 - e^{-bt} - \frac{b}{2\omega} \sin \omega t} \quad (18)$$

Величина t в последнем выражении есть время, необходимое, чтобы вызвать „разряд“ нервного окончания при уровне возбуждения, лежащем на $\alpha - \beta$ белов выше порога раздражения. Как указывалось выше, время реакции τ есть то время, которое необходимо для процесса „разряда“ и восстановления нерва, после чего он снова готов к возбуждению. Следовательно $t + \tau$ будет промежуток времени, через который процесс в нерве будет вновь повторяться. В конце каждого цикла фаза возбуждающего колебания будет, вообще говоря, отлична от фазы в начале. Однако в среднем мы можем пренебречь влиянием члена $\frac{b}{2\omega} \sin \omega t$ при определении числа „разрядов“ в секунду на каком-либо уровне возбуждения по той причине, что этот член вызывает лишь небольшие колебания около величины периода, получающейся при пренебрежении этим членом. Определяемое таким образом число разрядов в секунду будет годиться при всех частотах и зависит только от уровня возбуждения. При таком понимании среднее число разрядов, посылаемых в секунду

нервным окончанием, возбуждаемым на уровне $(\alpha - \beta)$ белов выше своего порога, будет определяться выражением:

$$r = \frac{1}{t + \tau} \quad (19)$$

Доля рубежных величин возбуждения, лежащих между уровнями β и $\beta + d\beta$, будет равна $\frac{dZ}{d\beta} d\beta$. Следовательно, если n — число нервных волокон на 1 мм, то число нервных разрядов в секунду, исходящих от элемента длины dx основной мембраны, будет выражаться следующим образом:

$$n dx \int_0^{\alpha} r \frac{dZ}{d\beta} d\beta \quad (20)$$

Для удобства обозначим число разрядов одного нервного волокна через

$$S_{(\alpha)} = \int_0^{\alpha} r \frac{dZ}{d\beta} d\beta \quad (21)$$

Величина $\frac{dZ}{d\beta}$ может быть подставлена из уравнения (12), а величина r — из (18) и (19). Общее число нервных разрядов в секунду R , посылаемых к мозгу со всех возбужденных данным тоном частей мембраны, будет:

$$R = \int_0^{\alpha} n S_{(\alpha)} dx \quad (22)$$

Величина этого интеграла не может быть вычислена аналитически, но ее можно найти графическим методом. Чтобы найти величину $S_{(\alpha)}$, мы изменяем переменную β на Z , тогда

$$S_{(\alpha)} = \int_{Z_0}^{\alpha} r \cdot dZ \quad (23)$$

где Z_0 есть доля общего число волокон, приходящая в возбуждение на пороге раздражения. Полагая $\tau = 0,002$ сек.,

$b = 125$ и $Z_0 = 10^{-4}$, мы можем подсчитать величины $S_{(a)}$ при различных уровнях возбуждения a ; результаты вычисления приведены на рис. 14; каждая следующая кривая нанесена в 10 раз более мелком масштабе. Если $S_{(a)}$ умножить на число нервных окончаний при уровне возбуждения a , то мы получим общее число разрядов в секунду с этих нервных окончаний. На 1 мм длины основной мембраны приходится около 1000 палочек Корти. Следовательно согласно кривой на пороге, т. е. на нулевом уровне возбуждения, мы получим $1000 \cdot 10^{-2} = 10$ разрядов в секунду с 1 мм длины и $1000 \cdot 5 \cdot 10^2 = 500\,000$ разрядов в секунду при возбуждении с наибольшей возможной силой на уровне 110 db.

СРАВНЕНИЕ ТЕОРИИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ УЗОРОВ С ОПЫТНЫМИ ИССЛЕДОВАНИЯМИ СЛУХА

Мы видим, что изменение чувствительности слуха в зависимости от частоты удается удовлетворительно объяснить

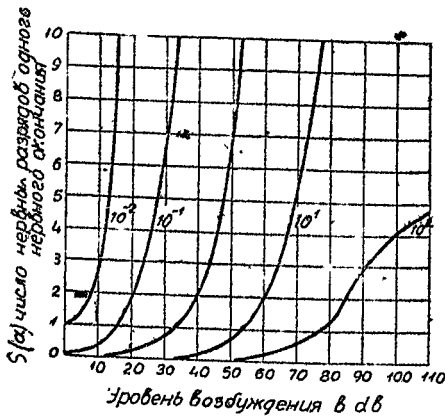


Рис. 14.

изменениями амплитуды скорости основной мембраны, причем весь орган улитки рассматривается как чистомеханическая система.

Нет сомнений, что громкость тесно связана с общим числом нервных разрядов, достигающих мозга. Из рис. 14 мы видим, что возможный диапазон громкости, воспринимаемый 1 мм основной мембраны, колеблющейся при различных

амплитудах, составляет 110 или 120 db. Если мы учтем действие всей длины (31 мм) основной мембраны, то общее возможное число импульсов будет еще в 30 раз больше, что эквивалентно увеличению воспринимаемой громкости в области сильных звуков еще на 20—30 db. Таким образом наблюдаемый на опыте диапазон громкости 140 db может

быть вполне объяснен предполагаемым механизмом нервного возбуждения. При постепенном возрастании громкости от порога слышимости в начале возбуждается очень небольшой участок мембраны; этот участок постепенно увеличивается, затем начинают возбуждаться новые участки, соответствующие субъективным гармоникам, и наконец при больших громкостях приходят в возбуждение нервные окончания по всей длине мембраны. Если бы основная мембрана колебалась одинаковым образом при всех тонах, подобно например мембране конденсаторного микрофона. Венте, то громкость для всех тонов при данном уровне ощущения (выше порога) была бы одинакова. Однако наблюдения показывают, что громкость низких тонов возрастает значительно быстрее, чем высоких *. Эта разница в громкости для тонов разной высоты на одном и том же уровне ощущения легко объясняется разницей в форме (узоре) колебания мембраны.

Функция, вычисленная выше, основана на предположении, что по мере возрастания силы возбуждения частота нервных разрядов возрастает и достигает в конце концов предела 500 разрядов в секунду. Опыты на нервах показали, что при непрерывном возбуждении нерв утомляется, после чего максимальное число проходящих импульсов значительно сокращается. Следовательно, если тон данной высоты некоторое время возбуждает ухо, то непосредственно после этого громкость тонов в той же области частот должна уменьшиться. Этот эффект недавно был исследован Бекешчи **, который показал, что после сильного утомления громкость может уменьшаться на величину до 30 *db* (в 1000 раз).

Подобным же образом после сильного утомления значительно возрастает порог слышимости. Измерения в нашей лаборатории, которые скоро будут опубликованы, показывают, что для низких тонов получается сдвиг порога до 25 *db*, причем некоторый сдвиг остается еще через 2 мин. после прекращения возбуждающего тона. Соотношение, выве-

* H. Fletcher, *Speech and Hearing*, p. 225—231, New-York, 1929.

** *Phys. Zs.* 30, S. 115, 1929.

денное выше, приложимо, очевидно, лишь к неутомленным нервам. Наблюдения показывают, что изменения достигают наибольшей величины в области, лежащей близ утомляющего тона, и спадают до нуля для далеко отстоящих тонов. Это дает дополнительное доказательство того факта, что простой тон возбуждает лишь некоторые области по длине основной мембраны.

Мы видели, что благодаря возникновению большого числа субъективных гармоник и благодаря тому, что резонансные пики становятся менее острыми, область сильного возбуждения для низких тонов гораздо шире, чем для высоких, если те и другие лежат на общем уровне ощущения выше порога слышимости. По этой причине низкие тоны посылают в мозг гораздо большее количество импульсов и поэтому воспринимаются как более громкие.

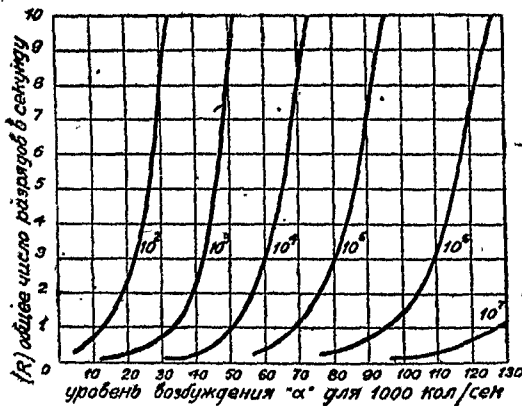


Рис. 15.

Величины R по уравнению (22) подсчитаны для 7 тонов, указанных на рис. 10, причем принято $n=1000$ на 1 мм. Результаты вычисления приведены в третьем столбце табл. 3. Подобным же образом величины R для тона 1000 кол./сек. вычислены для различных уровней на основании кривых рис. 11; результаты приведены на рис. 15.

Громкостью данного звука мы называем * уровень ощущения тона 1000 кол./сек., установленной на одинаковую громкость с исследуемым звуком. Следовательно значения громкости каждого из тонов, приведенных в столбце табл. III, можно получить, сравнивая величины R с величинами R для тона 1000 кол./сек. и отмечая соответствующий уровень

* Speech and Hearing, p. 226.

ТАБЛИЦА III

Частота	Уровень ощущения	R	Вычислен- ная громкость	Наблюденная громкость			
				<i>I'</i>	<i>Ror</i>	<i>Re</i>	<i>G</i>
75	27 db	1,000	33	36	50	40	33
125	40	10,000	50	50	57		
250	54	40,000	61	60	62		
500	65	100,000	69	72	66		
2000	75	250,000	77	79	76		
4000	73	140,000	71	70			

ощущения по рис. 15. Таким образом получены цифры четвертого столбца табл. III. Так как все данные построения кривых были получены из исследования моего левого уха, измерения громкости были сделаны для этого же уха. Уровень силы тона 1000 кол./сек. устанавливался на одинаковую громкость с каждым из 6 тонов, звучащих при одинаковом уровне силы 20 db. Наблюдатель слушал 2 тона по очереди, так что влияние утомления исключалось. Результаты наблюдения приведены в пятом столбце табл. III. Так как эти данные несколько отличны от результатов измерений Кингсбери, то я думал, что на мои измерения повлияло знание ожидаемого результата, и потому просил сделать подобные же измерения другого наблюдателя, незнакомого с данным вопросом; его результаты приведены в шестом столбце. Ввиду того, что для тона 75 кол./сек. получалось слишком большая разница, то для этого тона были сделаны наблюдения еще двумя лицами (столбцы седьмой и восьмой). Согласие между вычислением и наблюдением в пределах ошибок наблюдения может считаться хорошим, хотя для двух нижних тонов наблюдаемые величины оказываются несколько больше вычисленных. Возможно, что феномен, называемый „объемом“ тона, оказывает на наблюдателя влияние в сторону более высокой оценки громкости на низких тонах. „Объем“ может быть одним из элементов входящих в суждение о громкости.

денное выше, приложимо, очевидно, лишь к неутомленным нервам. Наблюдения показывают, что изменения достигают наибольшей величины в области, лежащей близ утомляющего тона, и спадают до нуля для далеко отстоящих тонов. Это дает дополнительное доказательство того факта, что простой тон возбуждает лишь некоторые области по длине основной мембраны.

Мы видели, что благодаря возникновению большого числа субъективных гармоник и благодаря тому, что резонансные пики становятся менее острыми, область сильного возбуждения для низких тонов гораздо шире, чем для высоких, если те и другие лежат на общем уровне ощущения выше порога слышимости. По этой причине низкие тоны посылают в мозг гораздо большее количество импульсов и потому воспринимаются как более громкие.

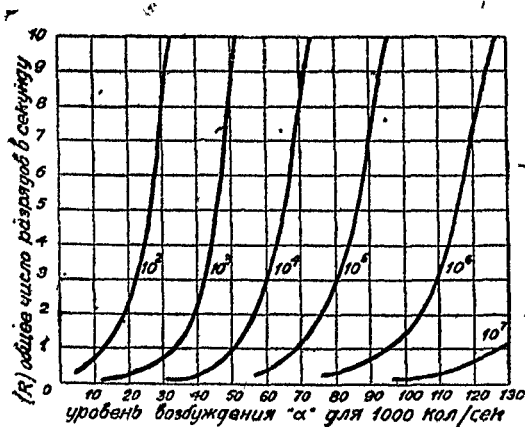


Рис. 15.

Величины R по уравнению (22) подсчитаны для 7 тонов, указанных на рис. 10, причем принято $n = 1000$ на 1 мм. Результаты вычисления приведены в третьем столбце табл. 3. Подобным же образом величины R для тона 1000 кол./сек. вычислены для различных уровней на основании кривых рис. 11; результаты приведены на рис. 15.

Громкостью данного звука мы называем* уровень ощущения тона 1000 кол./сек., установленного на одинаковую громкость с исследуемым звуком. Следовательно значения громкости каждого из тонов, приведенных в столбце табл. III, можно получить, сравнивая величины R с величинами R для тона 1000 кол./сек. и отмечая соответствующий уровень

* Speech and Hearing, p. 226.

ТАБЛИЦА III

Частота	Уровень ощущения	R	Вычисленная громкость	Наблюденная громкость			
				I'	Ror	Re	G
75	27 db	1,000	33	36	50	40	33
125	40	10,000	50	50	57		
250	54	40,000	61	60	62		
500	65	100,000	69	72	66		
2000	75	250,000	77	79	76		
4000	73	140,000	71	70			

ощущения по рис. 15. Таким образом получены цифры четвертого столбца табл. III. Так как все данные построения кривых были получены из исследования моего левого уха, измерения громкости были сделаны для этого же уха. Уровень силы тона 1000 кол./сек. устанавливался на одинаковую громкость с каждым из 6 тонов, звучащих при одинаковом уровне силы 20 db. Наблюдатель слушал 2 тона по очереди, так что влияние утомления исключалось. Результаты наблюдения приведены в пятом столбце табл. III. Так как эти данные несколько отличны от результатов измерений Кингсбери, то я думал, что на мои измерения повлияло знание ожидаемого результата, и потому просил сделать подобные же измерения другого наблюдателя, незнакомого с данным вопросом; его результаты приведены в шестом столбце. Ввиду того, что для тона 75 кол./сек. получалось слишком большая разница, то для этого тона были сделаны наблюдения еще двумя лицами (столбцы седьмой и восьмой). Согласие между вычислением и наблюдением в пределах ошибок наблюдения может считаться хорошим, хотя для двух нижних тонов наблюдаемые величины оказываются несколько больше вычисленных. Возможно, что феномен, называемый „объемом“ тона, оказывает на наблюдателя влияние в сторону более высокой оценки громкости на низких тонах. „Объем“ может быть одним из элементов входящих в суждение о громкости.

Рассмотрим теперь, как согласуются с нашей теорией наблюдения чувствительности слуха к изменениям высоты и силы тонов. Эти два эффекта тесно связаны, так как и в том и в другом случаях дело идет о замечаемом небольшом изменении формы колебания основной мембраны, по крайней мере при высоких тонах. Сперва рассмотрим чувствительность к изменению высоты тона.

Так как резонансные пики острее для высоких тонов, то следует ожидать, что здесь должна ощущаться меньшая разница в высоте тона, что согласно с опытными данными. Можно ожидать также, что при большей силе тона чувствительность к различению высоты станет больше, так как при этих условиях многочисленные пики для гармоник помогают сравнению. Это также согласно с опытными данными. Наименьшее изменение высоты тона, которое может быть обнаружено, составляет около 0,25 сантиоктавы ($\frac{\Delta f}{f} = 1,0017$), что соответствует сдвигу резонансного пика приблизительно на 0,01 мм; на этом протяжении расположено около 10 нервных окончаний. Таким образом наблюдаемый эффект не находится в противоречии с анатомическими данными.

Наименьшее изменение уровня силы, заметное для уха, составляет около 0,25 db. Это соответствует изменению R примерно на 5%. Есть все основания считать, что эта величина должна меняться как при изменении уровня силы, так и высоты тона, так как в сущности изменение R связано с всяким изменением пространственного узора на основной мембране. Если сравниваются 2 тона одной и той частоты, то, вероятно, разницу силы звука нам позволяет обнаружить как раз изменение пространственного узора. Если изменение формы пространственного узора является главной причиной для восприятия малых изменений силы звука, то ясно, что чувствительность к изменению силы звука будет находиться в зависимости от тех же факторов, как и чувствительность к изменению высоты тона. Эта точка зрения согласуется с опытными данными относительно чувствительности к изменению силы звука. Она согласуется также с известным из

опыта фактом, что сравнение громкостей тонов разных частот очень затруднительно. Действительно в этом случае приходится сравнивать относительные величины B_1^* .

БИНАУРАЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ

На рис. 16 дана схема прохождения слуховых нервов к мозгу. Круги представляют собой те места, где некоторые нервные волокна оканчиваются и как бы переключаются в другие волокна. Такие места встречаются вдоль длины нервных путей в нескольких местах. Некоторые волокна проходят не прерываясь от улитки до слухового центра в мозгу, тогда как другие прерываются 3 или 4 раза в промежуточных центрах. Нервы, идущие от каждого уха, в двух пунктах перекрещиваются, переходя с правой стороны на левую. Большинство нервных волокон, идущих

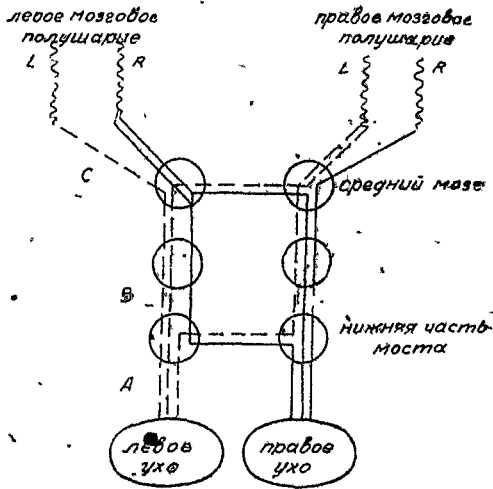


Рис. 16.

Уже по выходе в свет работы Флетчера появилась чрезвычайно важная экспериментальная работа Вевера и Брея (E. G. Wever and S. W. Grei, Journ. of Gener. Psychol., XIII, p. 373, 1930), в которой можно видеть доказательство правильности теории Флетчера. Вевер и Брей сделали следующий опыт. Был перерезан слуховой нерв кошки между улиткой и мозгом и ко внешней части нерва был приложен электрод, который был присоединен к проводу, от усилителя; другой провод от усилителя был приложен к коже животного. Оказалось, что при этих условиях телефон, соединенный с усилителем, воспроизводил все звуки, падающие на ухо кошки; передавалась отчетливо даже речь, и таким образом ухо являлось своеобразным микрофоном, превращающим звуковые колебания в электрические. После смерти животного передача прекращалась. Этот опыт ясно показывает, что слуховые нервы несут импульсы, сохраняющие временную периодичность (узор) того звука, который падает на ухо.

Прим. перев.

от левого уха, проходят, отчасти разными путями, к правой стороне мозга; меньшая часть проходит к левой стороне мозга; обратные соотношения имеют место для правого уха. Таким образом при восприятии звука левым ухом как в правом так и в левом мозговом полушарии получаются 2 подобных друг другу возбужденных участка. Эти участки обозначены буквой *L*. Подобным же образом восприятие звука правым ухом вызывает возникновение двух возбужденных участков, обозначенных буквой *R*. Если нервные пути перерезать в точке *A*, то левое ухо становится абсолютно глухим. Если же нервы перерезать в точке *B* или *C*, то произойдет лишь некоторое ослабление слуха с обеих сторон. Известны случаи опухоли мозга, когда больному приходилось оперативным путем удалять часть мозга, содержащую слуховой центр, и соседние области в одной половине мозга. По выздоровлении половина тела оставалась парализованной, но испытание слуха показывало, что оба уха имеют почти такую же чувствительность, как и до операции.

Хотя некоторые из нервных волокон от обоих ушей в части их пути идут близко друг от друга и оканчиваются близко друг от друга на периферии мозга, между ними замечается лишь очень слабое взаимодействие. Опыт показывает, что тон, действующий на одно ухо, производит лишь очень малый маскирующий эффект на восприятие звука другим ухом. Вегель и Лэн показали, что маскирующий тон в противоположном ухе должен быть в 10^6 раз или на 60 db сильнее, чтобы произвести такое же маскирующее действие, как при воздействии на то же ухо.

Равным образом „объективные“ бинауральные биения не наблюдаются, пока сила звука в одном ухе не превзойдет силу в другом по крайней мере на 60 db. „Объективные“ биения отличаются от „субъективных“ следующими признаками: их легко могут слышать все наблюдатели, и получить их можно на всех слышимых частотах, тогда как „субъективные“ биения могут слышать лишь 80% наблюдателей и только при частотах меньших 1000 кол./сек. „Объективные“ бинауральные биения, несомненно, возни-

кают лишь благодаря проникновению более сильного звука в улитку противоположного уха посредством костной проводимости. Интенсивный тон производит такой эффект, как будто он был ослаблен и введен непосредственно в то же ухо, как и другой тон.

Возбуждаемые двумя ушами участки мозговой коры лежат в тесном контакте друг с другом, так что может быть сделано их сравнение по силе и по времени возбуждения. Выше мы показали, что моменты максимального нервного возбуждения находятся в соответствии с моментами максимальных смещений в воздушной волне. Таким образом разность фаз звука, получающаяся в двух ушах, проявляется как разность во времени максимумов возбуждения R и L участков мозговой коры в обоих полушариях. При суждении о направлении источника звука имеет влияние как разность сил звука, так и разность фаз. В процессе умственного развития мы научаемся ассоциировать направление звука с некоторой разницей в интенсивности возбуждения R и L участков и с разностью времен их максимального возбуждения. Мы видели, что согласно развитой теории отчетливость временного узора в возбуждении нервных центров должна уменьшаться по мере увеличения частоты, что согласуется с тем фактором, что локализация направления для звуков, имеющих частоту более 1000 кол./сек., становится очень трудной.

Выводы

Обобщая, мы можем сказать, что высота тона определяется как положением максимума резонанса на основной мембране, так и временными „узорами“, доходящими до мозга. Первое, вероятно, более важно для высоких тонов, второе — для низких тонов. Громкость зависит от числа нервных импульсов в секунду, достигающих мозга, и возможно также отчасти от размера возбужденного участка. То, что психологи называют „объемом“, без сомнения связано с длиной возбужденного участка основной мембраны. Эта величина передается мозгу и образует определенного размера участок возбужденной мозговой коры. Размер этого

участка и определяет наше ощущение „объема“ тона. Низкие и сложного состава тоны имеют поэтому больший объем, тогда как высокие тоны — малый.

Понятие „яркость“, введенное психологами, может быть поставлено в связь с остротой резонансных пиков на основной мембране, как это предполагает Троланд *. Высокие тоны дают ощущение яркости (brightness), низкие — ощущение тупости или тусклости (dullness), что, как показывает рис. 10, может соответствовать большей или меньшей остроте пиков резонанса.

Временные узоры воздушного колебания превращаются в пространственный узор на основной мембране. Нервные окончания возбуждаются таким образом, что эти пространственные узоры передаются в мозг и вызывают две подобных друг другу возбужденные области, одна в правом, другая в левом полушарии мозга. Между временной последовательностью колебаний воздушной волны и последовательностью максимальных возбуждений в мозговой коре существует определенная связь. Таким образом при слушании звука двумя ушами в каждом полушарии мозга образуются два возбужденных участка, в каждом из которых имеется известная периодичность возбуждений с некоторым сдвигом фазы друг относительно друга. Восприятие соотношения между временными пульсациями в двух соседних участках коры, возбужденных правым и левым ухом, объясняет все особенности так называемого бинаурального эффекта.

* L. T. Troland. J. of Gen. Psychol., 2, p. 28, 1929.