СЛУХ И РЕЧЬ В СВЕТЕ СОВРЕМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.

С. Н. Ржевкин, Москва.

Учение о звуке, привлекавшее к себе в XIX веке внимание широкого круга физиков и физиологов и приведенное в законченную систему трудами Гельмгольца, Рэлея и ряда других крупных ученых, в последующие годы, вплоть до начала XX столетия, оставалось почти вне круга широких научных исследований, будучи заслонено более животрепещущими вопросами.

Если, с одной стороны, причина уменьшения интереса к акустике, вероятно, лежит в том, что основные принципы в этой области уже давно твердо установлены, и казалось, что остается лишь разрабатывать детали, то, с другой стороны, дальнейшие акустические исследования наталкивались на чрезвычайно большие экспериментальные трудности, и решение многих важных и спорных вопросов ожидало дальнейшего усовершенствования экспериментальной техники. Немаловажную роль играло и то обстоятельство, что до начала XX века акустика имела очень мало практических приложений.

В XX веке, в связи с быстрым развитием телефонных сообщений во всех странах земного шара благодаря развитию радиовещания и изобретению громкоговорителей перед акустикой стал целый ряд новых практических задач. Укажем хотя бы на изучение и расчет телефона как основного электро-акустического прибора и на детальное исследование слуха и речи как основы всех практических приложений технической акустики. Целый ряд новых интереснейших задач возник и был разрешен в связи с развитием подводной звуковой сигнализации; наконец громадное количество акустических задач выдвинули запросы военной техники.

В настоящей статье я попытаюсь дать обзор современных исследований слуха и речи, имеющих большое значение для целого ряда вопросов технической акустики.

I. Строение слухового аппарата. Пределы слышимости звука.

Главная часть слухового аппарата человека заложена в глубине правой и левой височной кости, в костном образовании, называемом лабиринтом, в котором лежат чувствительные к звуку нервные окончания. Лабиринт служит кроме того органом равновесия (полу-

кружные каналы), нервные же волокна, чувствительные к звуку, лежат в части лабиринта, называемой улиткой. Улитка представляет собой спирально-закрученную костную оболочку ($2^3/_4$ оборота), внутри которой идет непрерывный от основания до вершины проход. Проход этот имеет в длину около 31 — 33 *мм* (если его выпрямить), диаметр его у основания — 9 *мм* и у вершины — 1,8 *мм*. Он разделен по всей длине на две части (см. рис. 1), границей между которыми служит в большей части костная перегородка, спирально завитая вдоль ходов улитки (lamina spiralis) и на меньшем протяжении, гибкая перепонка — основная мембрана (membrana basilaris).

Параллельно основной мембране и очень близко от нее идет вторая мембрана — текториальная или кортиева мембрана; она начинается, так же как и основная, у костной перегородки, но распространяется лишь на незначительную часть ширины улиточного хода, не доходя до его противоположного края. Часть основной мембраны, лежащая рядом с текториальной, значительно утолщена, и в этом месте как раз разветвляются окончания слуховых нервов. Окончания клеток основной мембраны в соседстве с текториальной мембраной имеют тончайшие волоски, которые могут соприкасаться с текториальной мембраной при колебаниях.

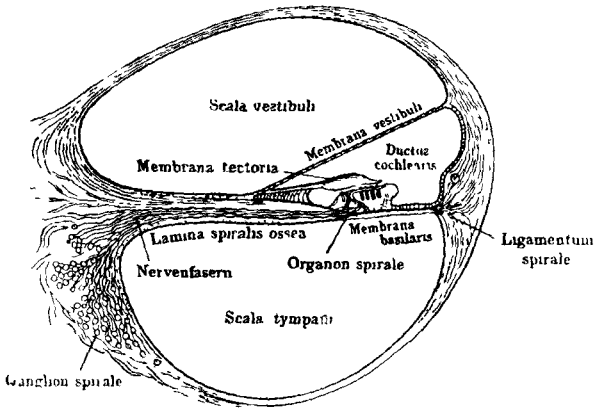

Рис. 1. Поперечный разрез хода улитки.

Основная мембрана состоит из большого числа поперечных волокон (от 13 000 до 24 000 волокон по исследованиям различных ученых), весьма упругих и слабо связанных друг с другом. Число окончаний слухового нерва доходит до 4 000. Весь улиточный ход наполнен жидкостью. Две части его, разделенные основной мембраной, соединяются у вершины улитки маленьким отверстием (геликотрема). Обе половины улиточного хода сообщаются с воздушной полостью среднего уха через затянутые перепонками отверстия: овальное окно, к перепонке которого прикреплена слуховая косточка (стремя), передающая жидкости улитки через цепь других косточек (молот и наковальня) движения барабанной перепонки, и круглое окно, ни с чем не соединенное и выходящее в воздушную полость среднего уха.

Строение уха схематически изображено на рис. 2а; канал улитки изображен выпрямленным и относительно более широким, чем в дей-

ствительности; он представлен в разрезе, вдоль всей его длины, перпендикулярно к слуховой мембране и спиральной перегородке.

Звуковые волны, проникая в слуховой канал, приводят в колебание барабанную перепонку (Б.) и через цепь сочлененных косточек (молот, наковальня, стремя) передают колебательное движение овальному окну (Ов) и через него жидкости улитки. Так как жидкость улитки почти несжимаема, то движения овального окна вызывают, через посредство жидкости, движения круглого окна (Кр.) обратные по направлению (аналогично тому, как это происходит в гидравлическом прессе). Жидкость улитки, передающая колебания, в своем движении приводит в соколебание некоторые части основной мембраны (М.осн.), что вызы-

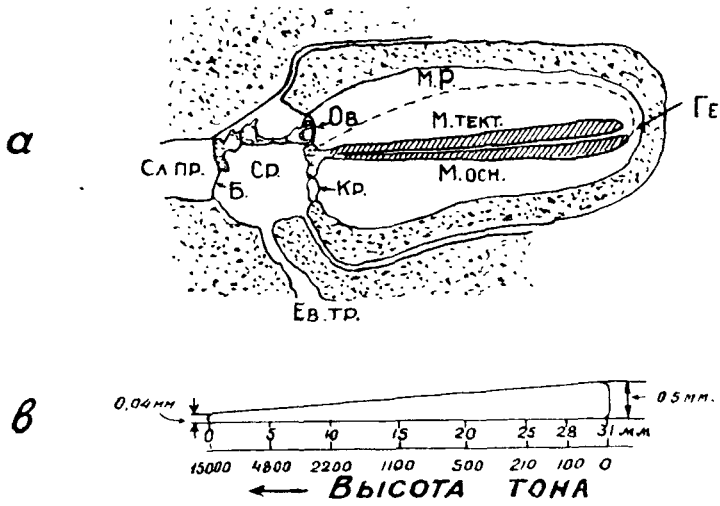

Рис. 2. *а* — Схематический чертеж улитки. *b* — Распределение тонов по длине основной мембраны.

вает прикосновения волосков слуховых клеток к текториальной мембране (М.текст.) и приводит к раздражению слуховых нервов.

Строение слуховой мембраны таково, что весьма вероятно предположить в отдельных частях ее способность к почти независимым колебаниям с определенной собственной частотой. Если овальное окно подвергается медленному вдавливанию, то жидкость двигается кругом через весь улиточный ход, через геликотрему (Ге.) движение передается в другую половину хода и затем производит выпячивание круглого окна; таким образом слуховая мембрана не участвует в движении. Так же дело происходит при медленных колебаниях с частотою менее 20 в сек.

Если овальное окно подвергается быстрым колебаниям, то движение может передаться круглому окну более коротким путем — через те волокна слуховой мембраны, которые настроены на частоту воздей-

ствующего колебания; при этом в движение придет только часть жидкости, ближайшая к основанию, часть же ее, лежащая между резонирующим волокном и вершиной улитки, останется неподвижной; таким образом более быстрые колебания приводят в движение меньшую массу жидкости и могут создать большую амплитуду колебаний слуховой мембраны в узкой области, где она резонирует на колебания данной частоты. В согласии с анатомическими исследованиями это приводит к заключению, что высокие тона воспринимаются частями мембраны, лежащими близ основания, а низкие — близ вершины улитки. Совершенно аналогично, если на пути переменного электрического тока будет лежать ряд параллельных путей, состоящих из емкости соединенной последовательно с самоиндукцией, т. е. настроенных на известный период, то ток изберет себе путь через ту цепь, период колебания которой или совпадает или вообще лежит ближе всего к его собственному периоду (резонанс), через цепи же, период которых не совпадает с его периодом, ток пойдет тем слабей, чем больше разница периодов. Вышеизложенные взгляды в принципе развиты еще Гельмгольцем и представляют основу так называемой резонансной теории слуха.

Опыт показывает [1]), что к звукам выше 15 000 кол./сек. ухо становится резко менее чувствительным и теряет способность различать высоту тона. Это говорит за то, что слуховая мембрана вряд ли содержит волокна, настроенные выше, чем на 15 000 *кол./сек.*

Эти наблюдения легко объяснить, принимая наличие слуховых волокон с настройкой не выше 15 000 колебаний. Более высокие звуки приводят эти волокна все в более и более слабые колебания по мере своего повышения, но, увеличивая силу звука, всегда можно довести амплитуду этих волокон до порога ощущения звука. В виду того, что при увеличении частоты выше 15 000 ощущение будет всегда получаться лишь благодаря возбуждению крайних волокон, изменение высоты звука не будет воспринято.

Верхний предел слышимости можно объяснить и иначе. Дело в том, что барабанная перепонка стоит под углом к слуховому проходу. При частоте тона 20 000 *кол./сек.*, т. е. длине волны около 6 *мм* на длине косо стоящей барабанной перепонки укладывается почти целая волна, и потому отдельные части ее будут испытывать противоположные воздействия, почему движение не передается слуховым косточкам. Этого взгляда придерживается П. П. Лазарев. Несомненно, что верхняя граница слуха обусловлена действием обоих указанных причин вместе. Кроме того, должна играть роль инерция жидкости лабиринта, влияние которой возрастает пропорционально квадрату частоты.

---

[1]) Lane, Phys. Rev. *19*, 492, 1922.

На основании опытов с заглушением (маскированием) одного звука другим, Вегель и Лэн [1]) выяснили на каких участках слуховой мембраны происходит восприятие звуков известной высоты. На рис. 2b показано это распределение частот по длине слуховой мембраны. Как мы видим из чертежа тон 100 кол./сек. действует почти на самые крайние части мембраны близ геликотремы. Как же связать это с тем обстоятельством, что ухо воспринимает гораздо более низкие тона 50,30 и даже до 16 *кол./сек.*? Флетчер [2]) объясняет этот факт тем, что сильные звуки вызывают ощущение субъективных обертонов, которых нет в возбуждающем колебании. Чем ниже звук, тем больше повидимому присуща уху эта способность создавать обертоны даже и при малой силе звука. Тон в 16 *кол./сек.*, вероятно, сам не может быть ощущаем ухом за неимением соответствующих волокон мембраны, но создаваемые им обертоны — 32,48 и т. д. колебаний в секунду дадут ощущение некоторого низкого звука. Из этих соображений следует, что нижайшие тона музыкальной шкалы ухо воспринимает лишь постольку, поскольку они возбуждают субъективные обертоны. Вот почему точное определение низшего предела слышимости в сущности невозможно. Понятна также и малая чувствительность уха в различении высоты низких тонов. Явление образования субъективных обертонов, равно как и комбинационных тонов, о которых речь будет далее, стоит в тесной связи с несимметричным строением барабанной перепонки. Барабанная перепонка состоит из радиальных волокон выпуклых кнаружи и имеет форму конуса, обращенного вершиной внутрь, поэтому она гораздо легче поддается силе, втягивающей ее кнаружи, чем вдавливающей внутрь. В силу такого строения, звуковые колебания, особенно имеющие большую силу, производят несимметричные перемещения барабанной перепонки внутрь и кнаружи, что и приводит, как показал теоретически еще Гельмгольц [3]), к образованию субъективных комбинационных тонов и обертонов.

Резонансная теория слуха недавно получила прекрасное подтверждение в опытах Хельда и Клейнкнехта [4]). Эти авторы производили в лабиринте морской свинки ничтожное повреждение, просверливая сверлом 0,1 *мм* отверстие с таким расчетом, чтобы не повредить слуховых нервов, а лишь ослабить натяжение слуховой мембраны путем ее разрыва. После этого у животного исчезало ощущение определенной высоты тона, что доказывалось по методу условных рефлексов. Когда повреждение заживало, ощущение тона восстанавли-

[1]) Wegel and Lane, Phys. Rev. *23*, 266, 1924, Febr.

[2]) H. Fletcher. Physical measurements of Audition. Journ. Frankl. Inst. 196, 289, 1923.

[3]) Die Lehre von den Tonempfindungen, S. 650, 1887.

[4]) Held und Kleinknecht, Leipziger Ber. 77. 137, 1925, рефер. Phys. Ber. S 1926, 1479.

валось. Просверливание улитки ближе к основанию давало выпадение высоких тонов, ближе к вершине — выпадение низких. Такой же результат дают и многочисленные опыты атрофирования слуховой мембраны длительными звуками.

II. Порог чувствительности уха в зависимости от высоты. Тонкость слуха в оценке высоты и силы звука.

Совершенно понятно, что изучение чувствительности уха к тонам различной высоты является основой большинства расчетов технической акустики и потому не следует удивляться, что этому вопросу уделено чрезвычайно много внимания и труда многими видными учеными. Условимся называть порогом слухового восприятия ту минимальную энергию звуковых колебаний (в эргах), протекающую в одну секунду через площадку в 1 $см^2$, которая вызывает ощущение едва слышимого звука. Чувствительностью уха мы назовем тогда величину обратную порогу слышимости; так как чувствительность уха выражается большими числами и сильно меняется с высотою, то удобней брать десятичный логарифм чувствительности. Так например, если ухо имеет порог $10^{-6}\ \frac{эрг}{см^2\ сек.}$, то чувствительность выразится числом 10^6, а логарифм ее числом 6.

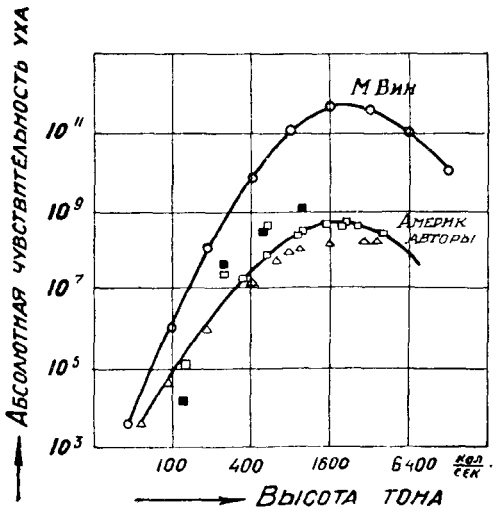

Рис. 3. Чувствительность уха по данным М. Вина и по новым данным.

Из прежних работ по определению чувствительности упомянем лишь классическую работу М. Вина [1]), впервые определившего абсолютную величину порога слышимости при изменении частоты от 50 до нескольких тысяч колебаний; данные Вина приведены на рис. 3 в логарифмическом масштабе. Из кривой можно определить, что чувствительность достигает максимума при 2300 *кол./сек.* На увеличенную чувствительность уха в области 2000—3000 колебаний указывает еще Гельмгольц, объясняя это резонансом слухового канала. Эти высокие звуки (начало 4-й октавы) действительно звучат для уха особенно резко. Любопытно отметить также тот факт, что как раз звуки высотой около 2500 *кол./сек.* применяют для подводных сигналов цейлон-

[1]) M. Wien. Pflügers Arch. *97*, 1, 1903.

ские туземцы — искатели жемчуга. Данные Вина послужили исходным пунктом для определения наивыгоднейшей высоты тона в современных установках для подводной сигнализации.

Максимум чувствительности, найденный Вином, был обнаружен также и позднейшими исследователями, что же касается абсолютной величины чувствительности, то здесь в измерениях Вина повидимому имеется серьезная ошибка. Новые исследования [1]), произведенные чрезвычайно тщательно и совершенно различными методами, и прекрасно согласующиеся друг с другом (рис. 3), дают при высоких частотах величины чувствительности в сотни раз меньшие, чем получил Вин. По данным Вина при изменении частоты от 50 до 2000 *кол./сек.* чувствительность изменяется в 100 миллионов раз; по новейшим же данным она изменяется примерно в 500000 или миллион раз, т. е. в 100—200 раз меньше.

Из методов определения порога слышимости упомянем лишь метод термофона [2]), в виду его особой убедительности. Термофон представляет собой тонкий металлический листок или проволочку, накаливаемую переменным током, что вызывает периодические расширения воздуха и порождает звук небольшой силы. Сила звука зависит от объема камеры, в которую поступают колебания. Если термофон, помещенный в камере, плотно прижать к уху или монтировать в капсюле, вставляемой в слуховой канал, то, зная объем камеры, силу тока, проходящего через термофон, и размеры накаливаемого листка, можно вычислить силу звука в ухе в абсолютных единицах даже при самых слабых звуках на пороге слышимости. При измерении же по методу Вина при помощи телефона силу звука на пороге слышимости удавалось определить лишь при помощи экстраполяции со стороны более сильных звуков, что привело к значительным ошибкам. Громадную разницу в чувствительности между высокими и низкими тонами в 10^8 раз весьма трудно объяснить с точки зрения резонансной теории, на что указал сам Вин [3]).

Он подсчитывает (исходя из затухания слуховых резонаторов, определенного Гельмгольцем), что при низких тонах (50 пер.), настолько слабых, что они еще не слышны, будут, хотя и в слабой степени, приведены в колебания волокна слуховой мембраны, соответствующие высоким тонам, причем, благодаря большой чувствительности уха в области около 2000 пер., ощущение высоких звуков возникнет раньше, чем низкий звук превзойдет порог слышимости. Но в

[1]) Wente. Phys. Rev. *19*, 666. Kranz Phys. Rev. *21*, 573, 1923; *22*, 66. 1923. Fletcher and Wegel. Phys. Rev. *19*, 555, 1922.

[2]) Arnold and Crandall. Phys. Rev. *10*, 22, 1917; Crandall. Phys. Rev. *11*, 449, 1918.

[3]) M. Wien. Festschrift für Wüllner. Ein Bedenken gegen Helmholtzschen Theorie des Hörens. S. 28, Leipzig, 1905.

действительности этого не наблюдается. Против этого рассуждения Вина можно много возразить: несомненно, например, что одинаковые по силе звуки разных высот будут с неодинаковой силой перенесены в жидкость лабиринта. Опыты Минтона [1]) показывают, что чем ниже тон, тем слабей он передается во внутреннее ухо. Вероятно также, что волокна основной мембраны на высоких тонах имеют гораздо меньшее затухание и потому очень слабо возбуждаются низкими тонами. Фишер [2]) приводит еще одно возражение: чтобы вызвать раздражение слуховых нервов, необходимо наличие относительного движения основной и кортиевой мембраны. При низких частотах обе мембраны придут в одинаковые колебания, и хотя в области высоких частот будет значительная амплитуда колебания основной мембраны, но не будет относительного движения двух мембран и не получится ощущения звука.

Для объяснения противоречий Гельмгольцевской теории слуха различные авторы делали дополнительные гипотезы. Так, Лазарев [3]) допускает существование в слуховых нервах особого звуко-чувствительного вещества, разложение которого идет значительно энергичней при высоких частотах.

Флетчер [4]) принимает, что в мозговых центрах ощущение высоты тона получается соответственно тому месту слуховой мембраны, где возникает максимальная амплитуда колебаний, независимо от того, какова амплитуда в других точках, и таким образом обходит возражения Вина. Разницу в чувствительности он объясняет тем, что механизм среднего уха передает колебания в жидкость лабиринта тем хуже, чем ниже тон. При восприятии самых низких тонов играет, кроме того, важную роль образование субъективных обертонов, причем для нижней границы слуха появление обертонов повидимому может возникнуть раньше, чем станет слышен основной тон (если он, вообще говоря, может быть воспринят как таковой).

Интересно указать, что порог чувствительности уха в области высоких тонов (2500 *кол./сек.*) составляет примерно $10^{-9}\frac{эрг}{см^2сек}$, что как раз равняется наибольшей чувствительности глаза в области зеленых лучей. Ухо и глаз являются таким образом органами одинаковой абсолютной чувствительности. Амплитуда колебаний частиц воздуха при звуке в 2500 *кол./сек.* с интенсивностью $10^{-9}\frac{эрг}{см^2сек}$ составляет менее 10^{-9} *см*, или около $^1/_{100}$ части диаметра молекулы воздуха.

Новейшие данные по определению порога слышимости собраны на графике рис. 4. Нижняя кривая дает величину порога слышимости

[1]) J. Minton. Proc. Nat. Academy of Sc. *11*, 439, 1925, № 7.
[2]) O. Fischer. Ann. d. Phys., *25*, 118, 1908.
[3]) П. Лазарев. Ионная теория возбуждения. Москва, 1918.
[4]) H. Fletcher. Jour. Frank. Inst. *196*, 289, 1923.

в эргах звуковой энергии на 1 $см^2$ в *сек.* в зависимости от высоты тона; часть кривой в области тонов от 50 *кол./сек.* и ниже проведена пунктиром, чтобы указать менее надежный характер измерений в этой области, близкой к нижнему пределу слуха.

Прежние определения верхнего предела слышимости вряд ли могут быть признаны бесспорными, как в виду того, что не было произведено измерения силы звука и не гарантирована его высота, так и в виду противоречивости данных различных авторов.

Исследования Лэна [1]), который применил генератор высокой частоты с катодной лампой и телефон как источник звука, показали, что чувствительность к тонам от 4000 до 15000 *кол./сек.* почти одинакова и близка к 10^7. Выше 15000 *кол./сек.* чувствительность сразу резко падает и при 20000 *кол./сек.* составляет только 1, т. е. на ин-

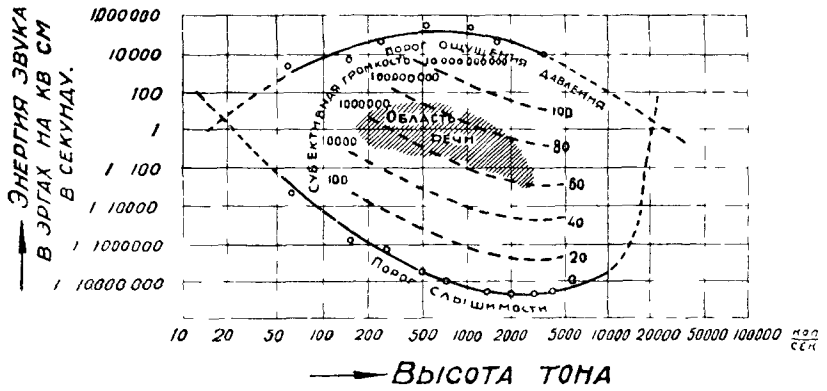

Рис. 4. Область слуховых ощущений

тервале $^1/_3$ октавы уменьшается в 10 миллионов раз (рис. 4). Определение порога слышимости при более высоких тонах оказывается невозможным, так как ранее, чем наступает ощущение звука, получается ощущение боли и давления в ухе. При более низких тонах и при большой силе звука также получается ощущение давления и боль; верхняя кривая на рис. 4 дает порог этого ощущения. Чрезвычайно интересно отметить, что амплитуда переменных звуковых давлений при ощущении боли и давления в ухе оказывается того же порядка, как и порог ощущения давления кожей, а именно около 1000 *дин/см*^{2} $\leq$ 1 *г/см*^{2}. У глухих порог слышимости, конечно, повышается, но порог ощущения давления имеет ту же величину.

В связи с результатами последних работ возникают сомнения в правильности прежних определений верхней границы слуха, оценивавших ее в 40000 *кол./сек.*

Верхняя граница слуха выше у детей, у пожилых людей она постепенно понижается в связи с общим ослаблением слуха. Часто

[1]) Lane. Phys Rev. *19*, 492, 1922.

старые люди не слышат вовсе звука стрекотания кузнечиков и сверчков или свиста выбрасываемого из котла пара. У животных верхняя граница слуха, вообще говоря, значительно выше. Это доказано И. П. Павловым по методу условных рефлексов. Верхняя и нижняя кривая на рис. 4 охватывают некоторую площадь, которая включает в себя все звуки, которые человеческое ухо воспринимает. Эту площадь естественно назвать областью слухового восприятия.

Приведенные на рис. 3 и 4 данные о чувствительности уха представляют результат статистического исследования большого числа людей. Исследования Минтона [1]) и Кранца [2]) показали, что индивидуальная чувствительность может чрезвычайно разниться от средней. Наблюдаются случаи резких минимумов или максимумов чувствительности на протяжении интервала в один музыкальный тон, т. е. при изменении частоты всего на 12%. Это явление качественно наблюдал еще Бецольд (1900).

Чувствительность сплошь и рядом изменяется при этом в сотни раз. Обнаружено, что известные заболевания уха вызывают понижение чувствительности слуха в определенной области высот. При склерозе уха, когда перепонка овального окна благодаря отложению известковых солей делается твердой и неэластичной, обычно замечается ослабление слуха на низких тонах, а также резкие провалы чувствительности (в сотни и тысячи раз) в области более высоких тонов. Болезни внутреннего уха влекут за собой вначале большей частью выпадение самых верхних тонов. Таким образом исследование остроты слуха может служить врачу как для постановки диагноза болезни, так и для определения степени глухоты.

Объективное исследование слуха лиц определенных профессий, как-то: радиослухачей, телеграфистов, принимающих на слух (клопферистов), музыкантов, шоферов, врачей и различных слухачей в военном деле стало в настоящее время вполне осуществимой задачей и должно играть важную практическую роль. Американская фирма Вестерн Электрик К° выпускает аппараты, предназначенные для этой цели, носящие название аудиометров. Автор настоящей статьи разработал для этой же цели аппарат, который установлен в настоящее время на центральной телефонной станции в Москве.

Второй важный вопрос при изучении слуха — это вопрос о тонкости слуха, т. е. о способности различать изменения высоты, а равно и изменения силы звука. Детальное исследование Кнудсена [3]) показало, что тонкость слуха на высоких тонах от 500 до 2000 *кол./сек.* (от C^2 до C^4) оказывается почти одинаковой и равной около 0,3% или $^1/_{40}$ музыкального тона. Так например, при 1000 *кол./сек.* ухо рас-

[1]) J. Minton. Phys. Rev. *19*, 80, 1922.

[2]) Kranz, l. c.

[3]) Kern O. Knudsen. Phys. Rev. *21*, 84, 1923.

познает изменение высоты на 3 колебания. В сторону низких тонов тонкость слуха постепенно падает и при 50 *кол./сек.* достигает $1^0/_0$ или $^1/_{12}$ целого тона. Лица с особенно тонким слухом различают еще меньшие изменения высоты.

Тонкость слуха вероятно стоит в зависимости от структуры слуховой мембраны. Мембрана, волокна которой слабо связаны и могут колебаться независимо друг от друга, будет давать тонкий музыкальный слух, наоборот, грубая и неподатливая слуховая мембрана не позволит возникнуть тонким изменениям формы и будет приходить в колебание сразу в большом участке и возбуждать несколько нервных окончаний, что будет соответствовать немузыкальному слуху, неспособному различать даже звуки, разделенные большими интервалами. Упражнение делает слуховую мембрану более гибкой, ослабляя повидимому связь между ее волокнами, вследствие чего слух улучшается; здесь происходит процесс, который можно уподобить обыгрыванию скрипки.

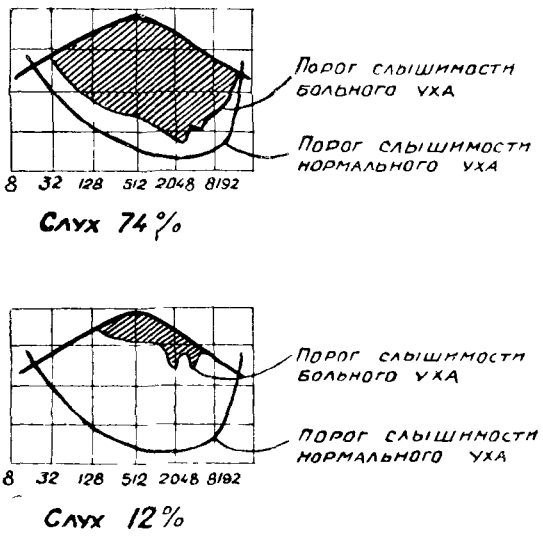

Рис. 5. Характеристика глухих ушей

Данные Кнудсена позволили подсчитать, что при средней силе звука ухо может различить около 1 500 градаций по высоте в интервале от 32 до 5 000 *кол./сек.* Тот же исследователь определил тонкость слуха в отношении оценки силы звука. Для звуков в средней части музыкальной шкалы порог ощущения изменения силы звука соответствует изменению интенсивности на 10%; при слабых звуках ухо ощущает лишь гораздо большие изменения интенсивности до 30% и более. Из этих данных можно рассчитать, что при 1 000 *кол./сек.* ухо сможет воспринять 270 градаций силы звука от порога слышимости до порога ощущения давления. Если принять в расчет способность уха воспринимать изменения и силы и высоты звука, то можно подсчитать, что в пределах всей области слухового восприятия ухо воспринимает около 300 000 различных тонов. Таким образом ухо дает огромное разнообразие в восприятии звуков.

В виду того, что в ухе имеется всего около 4 000 нервных волокон, из которых каждое способно передать лишь определенное воздействие мозгу („все или ничего"), без каких-либо градаций, — объяснение

всего разнообразия звукового восприятия, по высоте и по силе звука, представляет большие трудности.

Если ухо обладает каким-нибудь дефектом, то восприятие части тонов по высоте или по силе отпадает, часть слуховой области выпадает из восприятия и ухо воспринимает количество тонов, меньшее нормального. Определив порог чувствительности больного уха и нанеся его в виде кривой (рис. 5) на одном листе с нормальной областью слухового восприятия, мы сразу составляем себе представление, какой процент всего слуха сохранился у исследуемого уха. Этот процент сохранившегося слуха будет равен отношению площади между кривой чувствительности и кривой ощущения давления ко всей площади нормального слухового восприятия. На приведенных чертежах мы имеем характеристику двух ушей: у одного сохранилось 74% слуха, у другого только 12%.

Лица с хорошим слухом обладают (в области речи) порогом слышимости порядка 0,001 *дин/см*^{2} (величина переменного звукового давления, соответствующая интенсивности $2{,}5.10^{-8}\ \frac{эрг}{см^2 сек}$); при повышении порога слышимости до 0,1 *дин/см*^{2} мы имеем дело с легкой глухотой; сильная глухота, допускающая все же разговор, соответствует порогу в 1 *дин/см*^{2}. При пороге в 10 *дин/см*^{2} разговор может быть понят лишь при усилительных приспособлениях. Давления в 1 000 *дин/см*^{2} уже дают ощущение боли, поэтому глухота, соответствующая порогу более 100 *дин/см*^{2}, уже не может быть исправлена никакими усилителями звука.

III. Громкость звука. Восприятие созвучий.

Силой или интенсивностью звука называют количество звуковой энергии (в эргах), протекающее через площадь в 1 *см*^{2} в 1 *сек*. В свободно распространяющейся волне данной силе звука соответствует определенная величина колебаний давления (выше и ниже нормального). Связь между силой звука J в $\frac{эрг}{см^2 сек}$ и эфективной (или средней квадратичной) величиной давления P выражается следующей формулой:

$$P\ дин/см^2 = 6{,}4\sqrt{J\ \frac{эрг}{см^2 сек}}$$

и пояснена таблицей на стр. 243.

Предположим, что мы имеем ряд звуков одинаковой интенсивности и различных высот. Будут ли эти звуки одинаково громки субъективно? Ясно без долгих рассуждений, что их громкость для уха будет не одинакова. Звуки, имеющие высоту ниже 16 или выше 20 000 *кол./сек.*, совсем не будут слышимы, как бы ни велика была их энергия. Но и звуки, лежащие в пределах слышимости, при одинаковой интенсивности могут иметь совершенно различную громкость, что

Сила звука в $\frac{эрг}{см^2 сек}$	Переменное звуковое давление в $дин/см^2$
1 000 000	6400
10 000	640
100	64
1	6,4
0,01	0,64
0,0001	0,064
0,000001	0,0064

обусловлено разной чувствительностью уха в зависимости от высоты. Так например, звук с силой в 0,0001 $\frac{эрг}{см^2 сек}$ при 50 *кол./сек.* будет лежать ниже порога слышимости (см. рис. 4), а звук в 200 *кол./сек.* при той же силе будет довольно громко слышим ухом.

Мерой субъективной громкости простого тона можно считать отношение его силы к силе звука при пороге слышимости тона той же высоты.

Так как для звуков обычной громкости (речь) эти отношения выражаются весьма большими числами, то удобней брать их десятичный логарифм. Так например, тон в 1 000 000 раз более интенсивный, чем при пороге слышимости, будет иметь субъективную громкость, выражающуюся числом 6. Американские авторы выражают громкость удесятеренным логарифмом указанного отношения. По этой шкале громкость тона в 1 000 *кол./сек.* едва слышимого будет выражаться числом 0 ($\lg 1 = 0$), а громкость тона, дающего ощущение давления, числом 130. Эта шкала громкостей практически очень удобна [1]).

Опытную основу изложенного понятия о громкости дает исследование Мэккензи [2]), который нашел (при помощи особого рода фонометра, в котором к уху подводятся в быстром чередовании два разных звука), при каких отношениях интенсивностей оказываются одинаково громкими звуки разных высот. Из этой работы следует, что если чистые тоны разных высот, одинаково громкие, имеют известное отношение интенсивностей, то, будучи усилены в одно и то же число раз, они также останутся одинаково громкими для уха.

На рис. 4 пунктиром проведен ряд кривых параллельных кривой порога слышимости, на равных расстояниях друг от друга. Так как на чертеже сила звука отложена в логарифмическом масштабе, то эти кривые соответствуют звукам, в определенное число раз (в 100, 10 000,

[1]) Единица громкости в этой системе названа „Transmission Unit“ и обозначается *TU*

[2]) Mackenzie. Phys. Rev. *20,* 331, 1922.

1 000 000 и т. д.) более сильным, чем при пороге, т. е. одинаково громким субъективно. Числа громкости (направо) проставлены по американской шкале. Звуки, причиняющие ощущение давления, имеют при 50 *кол./сек.* громкость около 50 *TU*, при 1 000 *кол./сек.* это получится при громкости в 130 *TU*, т. е. при звуке в 10 биллионов раз сильнее порога слышимости. Область речи лежит в пределах от 50 до 80 *TU*; область речи на чертеже заштрихована; она занимает, как мы видим, лишь небольшую часть всей области слухового восприятия. В недавно появившийся работе [1]) Кингсбери нашел, что при увеличении силы звука громкость растет у низких тонов медленней, чем у высоких. Так если тон в 60 *кол./сек.* при пороге слышимости в 10^5 раз сильней, чем тон в 2000 *кол./сек.*, то на уровне разговорной речи, при условии одинаковой громкости, он будет всего в 10 раз сильней. Для достижения одинаковой громкости тон в 60 *кол./сек.* приходится при этом усилить в 10^4 раз, а тон в 2000 *кол./сек.* в 10^8 раз по отношению к порогу слышимости. По этим данным Кингсбери мы должны были бы на рис 4. кривые равной громкости провести так, чтобы они лежали тесней на низких тонах и расходились бы на высоких.

Данные Кингсбери и Мэккензи находятся в явном противоречии, и возможно, что данное выше простое определение громкости придется оставить и заменить более сложным.

Энергия, переносимая даже громкими звуками, по величине очень мала. Например, обычная речь соответствует излучению звуковой энергии в 125 *эр./сек.* = 12,5 *микро-ватт*; чтобы согреть таким звуком чашку чая, в комнате должны были бы говорить миллион человек в течение $1^1/_2$ часа!

При одновременном созвучании двух или нескольких тонов, слуховое восприятие оказывается совершенно различным по характеру в зависимости от отношения чисел колебаний составляющих тонов. Я не буду здесь останавливаться на общих вопросах о консонансе, диссонансе, музыкальной гармонии и построении гамм. Эти вопросы уже не новы и достаточно полно освещены наукой. Коснусь подробней лишь вопроса о возникновении комбинационных тонов.

Несомненно, что для слуха картина созвучия нескольких тонов не является просто суперпозицией ощущений отдельных тонов. Уже поверхностное наблюдение показывает, что каждое созвучие или аккорд представляют из себя более сложное сочетание, чем простая сумма тонов. При созвучании двух сильных тонов обычно ясно слышится некоторый низкий призвук или разностный тон (это открытие сделано еще в 18 веке скрипачом Тартини), число колебаний которого равно разности чисел колебаний первичных тонов, а также еще и другие призвуки, лежащие ниже, чем два созвучащих тона.

---

[1]) Kingsbury. Phys. Rev. *29*, 588, 1927, Apr.

Гельмгольц показал, что на некоторых инструментах (например, на органе и на двойной сирене) получаются еще и верхние призвуки (суммовые тоны), которых нет в первоначальных звуках; суммовые тоны довольно слабы и не играют такой роли, как разностные. Все эти добавочные призвуки носят название комбинационных тонов. В некоторых случаях образование разностных и суммовых тонов получается в самом источнике звука; так, например, происходит дело в органе или фисгармонии. Но сейчас мы интересуемся только субъективными комбинационными тонами.

Гельмгольц показал теоретически, что возникновение комбинационных тонов возможно в том случае, если какая-нибудь часть слухового аппарата обладает несимметричной упругостью, т. е. легче подается в одну, чем в другую сторону; таким свойством как раз обладает барабанная перепонка, как мы уже имели случай указать.

По теории Гельмгольца сила комбинационных тонов пропорциональна квадрату силы первичных тонов, и потому они особенно заметны при сильных первичных тонах. Комбинационные тоны первого порядка будут иметь числа колебаний:

$$2n_1;\ 2n_2;\ n_1+n_2;\ n_1-n_2,$$

где n_1 и n_2 — числа колебаний первичных тонов; комбинационные тоны второго порядка будут иметь числа колебаний:

$$3n_1;\ 3n_2;\ 2n_1+n_2;\ 2n_2+n_1;\ 2n_1-n_2;\ 2n_2-n_1;$$

таким же образом получатся и комбинационные тоны высших порядков.

Наиболее сильно выделяются низкие комбинационные тоны; теория показывает, что разностный тон первого порядка n_1-n_2 должен обладать большой силой, что подтверждает и опыт.

Если отношение чисел колебаний первичных тонов выразить несократимой дробью $N_1:N_2$, то легко видеть, что комбинационные тоны будут иметь относительные числа колебаний, выражающиеся рядом натуральных чисел: 1, 2, 3, 4 и т. д.; в этот ряд войдут и первичные тоны, выражаемые числами N_1 и N_2, и разностный тон N_1-N_2, и все суммовые тоны. Так, например, если звучат тоны в 1 200 и 700 *кол./сек.*, то отношение их чисел колебаний (интервал) можно выразить несократимой дробью 12:7; комбинационные тоны будут:

1, 2, 3, 4, 5, 6, **7**, 8, 9, 10, 11, **12**, 13 и т. д.

В этом ряде разностный тон $12-7=5$ будет иметь 500 *кол./сек.* Комбинационный тон 1 обычно бывает очень ясно слышен. Если звучат два тона, относительное число колебаний которых выражается числами, разнящимися на единицу, то комбинационный тон 1 будет в то же время и разностным тоном, он будет иметь увеличенную

громкость. Так как гармонические обертоны всякого звука выражаются рядом целых чисел, то ясно, что каждая пара соседних обертонов будет давать комбинационный тон 1, т. е. будет повторять основной тон. Следовательно, комбинационные тоны гармонических обертонов усиливают основной тон. Будет усилена, но в меньшей степени, путем комбинирования несоседних обертонов, как октава, так и следующие обертоны. Эти соображения объясняют многие факты, известные из телефонной практики, о чем мы еще будем иметь случай упомянуть позднее.

В случае простых интервалов многообразие комбинационных тонов сильно упрощается. Так, интервал квинты 3:2 дает только один низкий комбинационный тон 1, обладающий всегда значительной силой. Кварта 4:3 дает сильный тон 1 и более слабый 2.

В случае интервалов, выражающихся отношением больших целых чисел, картина комбинационных тонов так многообразна и сложна, что даже опытное музыкальное ухо не может в ней разобраться. Вегель и Лэн [1]) в 1922 г. предложили новый способ обнаружения и измерения силы комбинационных тонов, основанный на явлении биений. Если к созвучию двух тонов, дающему комбинационные тоны, примешать третий звук небольшой силы, который можно плавно изменять по высоте и по интенсивности (звук катодного генератора), то при неполном совпадении этого звука с каким-либо из комбинационных тонов мы услышим биения, которые будут наиболее отчетливы при равенстве интенсивностей этих двух тонов. Таким образом, перестраивая третий вспомогательный звук, по всей шкале высот можно обнаружить и измерить силу всех комбинационных тонов. Авторы исследовали таким способом созвучие 1 200 и 700 *кол./сек.*, даваемое двумя катодными генераторами, т.-е. интервал 12:7 (несколько меньший малой септимы) и нашли следующие комбинационные тоны:

1 900 ($n_1 + n_2$), 500 ($n_1 - n_2$), 2 400 ($2\,n_1$), 1 400 ($2\,n_2$), 3 600 ($3\,n_1$), 2 100 ($3\,n_2$), 3 100 ($2\,n_1 + n_2$), 1 700 ($2\,n_1 - n_2$), 2 600 ($2\,n_2 + n_1$), 200 ($2\,n_2 - n_1$), 2 400 ($4\,n_1$), 3 800 ($2\,n_1 + 2\,n_2$), 1 000 ($2\,n_1 - 2\,n_2$), 4 300 ($3\,n_1 + n_2$), 2 900 ($3\,n_1 - n_2$). 3 300 ($3\,n_2 + n_1$), 900 ($3\,n_2 - n_1$).

Исследуя вопрос о консонансе и диссонансе [2]) на звуках катодных генераторов, автор обнаружил, что явление консонанса и благозвучия аккорда гораздо тесней связано с наличием комбинационных тонов, чем это считалось ранее. Созвучие квинты с сильным разностным тоном превращается в сущности в единый звук с гармоническими обертонами 1, 2, 3 и т. д. и при известных условиях почти не может быть разложено ухом на составные части.

[1]) Wegel and Lane. Phys. Rev., *23* 266, 1924.

[2]) С. Н. Ржевкин. Изв. Физич. Института при Моск. Научн. Институт., *1*, вып. 2, 1920.

Исследуя тем же методом созвучия и комбинационные тоны, Орлов [1]) нашел, что комбинационные тоны являются основным фактором, определяющим гармонию созвучия. Орлов обнаружил, кроме того, при интервалах, бо́льших, чем октава, существование разностных тонов, лежащих внутри интервала.

В настоящее время музыкальные теоретики начинают подходить к вопросам гармонии именно с точки зрения комбинационных тонов. В последних работах Гарбузов [2]) показал, например, что понятие о мажоре и миноре вовсе не является чем-то неизменным, присущим определенным интервалам и созвучиям. Минор в чистой форме может существовать только в области низких тонов, где комбинационные тоны не слышны, в области же высоких тонов минорные созвучия неизбежно приобретают характер мажора благодаря призвуку нижних комбинационных тонов. Это обстоятельство композиторы, конечно, чувствовали бессознательно и ранее, так как большинство произведений, выражающих скорбь, написано в низких тонах.

Влияние комбинационных тонов на характер созвучия в случае более чем двух звуков в аккорде было до последнего времени очень мало изучено. Флетчер [3]) (лаборатория Вестерн Электрик К°) выяснил, что комбинационные тоны здесь играют гораздо более важную роль, чем в случае двух звуков. Изучая искажения, получающиеся при разных условиях при передаче по телефону речи, Флетчер обнаружил интереснейший факт, что исключение из состава звука основного тона и первых обертонов не вносит почти никаких изменений тембра и характера гласных, хотя, как мы увидим далее, главная часть звуковой энергии речи лежит как раз в области основного тона и первых обертонов. Это исключение отдельных гармоник производилось посредством электрических фильтров, которые позволяют пропустить через телефонную линию любую область звуковых частот и задержать остальные.

Далее Флетчер показал, что значительные искажения получаются лишь при исключении высоких обертонов начиная с 1 000 *кол. сек.* (*C*[3]) и выше. Исследуя вопрос детально, Флетчер нашел, что характер гласных не меняется благодаря субъективному восполнению исключаемых тонов за счет образования низких комбинационных тонов. Действительно, в звуке всех гласных имеется всегда область сильных высоких обертонов, гармонических с основным тоном; например, в звуке гласной *a* обычно усилены гармоники в области от 800 до 1 100 *кол. сек.*

---

[1]) И. Е. Орлов. Труды ГИМН. Сборник работ по музыкальной акустике, вып. I, стр. 31. Москва, 1925 г.

[2]) Н. А. Гарбузов. Труды ГИМН. Сборник работ по музыкальной акустике. вып. I, стр. 7. Москва, 1925 г.

[3]) H. Fletcher. Phys. Rev., *23*, 427, 1924.

и, как указывалось выше, каждая пара таких гармоник даст комбинационный тон, равный по высоте или основному или одному из низких обертонов, в результате чего получится большое усиление низких гармоник. Из этих соображений ясно, почему исключение одних низких тонов не изменяет тембра: исключенные из состава звука низкие тоны возникают вновь субъективно с громкостью лишь немного меньшею, чем в первоначальном звуке. Другое дело, когда исключаются высокие гармоники, характеризующие гласные, которые не могут быть восполнены; тогда тембр звуков сразу резко и до неузнаваемости меняется и речь становится совершенно непонятной. Примерно также обстоит дело и с передачей низких звуков музыкальных инструментов.

Флетчер показал, кроме того, на особом опыте, что, составляя комбинацию трех и более независимых звуков, числа колебаний которых относятся как ряд натуральных чисел, мы всегда получаем образование мощных комбинационных тонов с относительным числом колебаний 1, 2, 3 и т. д., из коих самый низкий тон 1 наиболее силен. В результате сочетания тонов 700, 800, 900 и 1 000 *кол./сек.* получается, например, сильный общий разностный тон 100 *кол./сек.*, а также тоны 200, 300 и т. д., и созвучие четырех тонов приобретает характер единого звука, с красивой тембральной окраской и с высотой 100 *кол./сек.* Прибавка объективного тона 100 *кол./сек.*, равного по силе высоким тонам, в тембре звука ничего не меняет.

Одиночный звук сложного тембра с гармоническими обертонами не может дать никаких новых комбинационных тонов, лежащих ниже основного. Образование унтертонов, на которых основывают свои построения многие музыкальные теоретики, является невозможным. Возбуждение данным звуком волокон слуховой мембраны соответствующих тонам в 2, 3 и т. д. раз более низким (унтертоны), причем они разбивались бы в своих колебаниях на 2, 3 и более частей, как струна при возбуждении ее обертонами, является вряд ли возможным в виду того, что волокна слуховой мебраны имеют довольно массивную структуру и вряд ли способны совершать такие резкие перегибы при колебаниях. Таким образом, и с этой точки зрения возникновение унтертонов невозможно.

Теория комбинационных тонов позволяет предвидеть один очень важный пункт, мало оттененный самим Гельмгольцем,— это возможность возникновения субъективных обертонов в том случае, когда на ухо воздействует один только простой синусоидальный тон. В симметричной мембране можно считать упругую силу пропорциональной величине отклонения из положения равновесия (закон Гука). В несимметричной мембране упругая сила не одинакова при положительных и отрицательных отклонениях равной величины. При этих условиях синусоидальное воздушное колебание с частотою n вы-

зывает в мембране колебание с рядом обертонов $2n$, $3n$, $4n$ и т. д. Наличие этих обертонов очень трудно различить ухом, так как они сливаются в ощущение единого звука. При помощи изложенного выше метода биений субъективные обертоны легко обнаруживаются. Действительно, если на фоне звучания одного сильного тона, чисто синусоидального (что легко проконтролировать записью кривой), заставить звучать другой синусоидальный тон переменной высоты, то всегда обнаружатся ясные биения, когда переменный тон в 2, 3, 4 и т. д. раза выше изучаемого. Изменяя силу переменного тона, можно добиться наиболее резких биений; при этом сила переменного тона будет равна силе субъективного обертона. Измерения [1]) показывают, что субъективные обертоны при громкости в 80 *TU* уже могут достигать силы основного тона и даже (при низких тонах) быть сильней его. Субъективные обертоны резко усиливаются с усилением первичного тона, как того и следовало ожидать теоретически. При громкостях ниже 40 *TU* (в 10 000 раз выше порога) субъективные обертоны уже не возникают. Таким образом, ощущение чистого тона возможно только при малых громкостях; сильные тоны неизбежно приобретают тембральную окраску и тем большую, чем они сильней.

Чрезвычайно интересны результаты опытов Вегеля и Лэна по вопросу о заглушении или маскировании одного тона другим. Если считать порог слышимости тонов разных высот известным, то является вопрос — изменится ли этот порог при звучании какого-нибудь тона другой высоты? Опыт показывает, что порог возрастает. Величину маскирующего действия удобно измерять поэтому приростом или сдвигом порога восприятия тона в присутствии второго маскирующего тона по сравнению с его порогом в тишине; таким образом, величина маскировки будет измеряться в единицах громкости.

Величина маскирующего действия тем больше, чем ближе лежат друг к другу по высоте маскирующий и маскируемый тон (правда, при небольшой разнице в частоте получаются биения, которые облегчают восприятие одного тона на фоне другого, в виду чего маскирующее действие уменьшается). Если изобразить маскирующее действие графически, отложив по абсциссам высоту маскируемого тона, а по ординатам увеличение порога восприятия звука на фоне маскирующего тона (в единицах громкости *TU*), то мы получим нечто вроде резонансной кривой со впадиной на вершине (см. нижние кривые всех графиков на рис. 6).

При увеличении силы звука маскирующего тона выступает совершенно иное явление: тоны, лежащие ниже маскирующего, заглушаются сравнительно очень мало, тоны, лежащие выше маскирующего, заглу-

---

[1]) Wegel and Lane. Phys. Rev., *23*, 266, 1924.

шаются, наоборот, очень сильно, даже и при большом удалении по высоте. Маскирующее действие особенно усиливается в области, близкой к обертонам маскирующего звука, что хорошо видно из кривых рис. 6 для больших громкостей при частотах маскирующего тона 800 и 1 200 *кол./сек.* Это наблюдение естественно поставить в связь с возникновением субъективных обертонов.

Каждый из графиков рис. 6 показывает маскирующее действие одного из тонов: 200, 400, 800, 1 200, 2 400, 3 500 *кол./сек.* при различных громкостях (20, 40, 60, 80 и 100 *TU*) на тоны всей музыкальной шкалы от самых низких до 4 000 *кол./сек.*

Мы видим из кривых, что громкие тоны маскируют чрезвычайно сильно все вышележащие тоны и в гораздо меньшей степени тоны нижележащие. Тон в 200 *кол./сек.* маскирует почти всю музыкальную шкалу, а тон 3 500 *кол./сек.*, хотя и маскирует вышележащие звуки, но почти не влияет на порог слышимости тонов ниже 1 000 *кол./сек.*

Правильность этих заключений легко проверить на звуках оркестра: мелодия на низких тонах всегда ясно выделяется из общей массы звуков, особенно хорошо выделяются низкие звуки органа (органный пункт) и, наоборот, высокие инструменты должны дать очень большую силу звука, чтобы их было слышно на фоне низких тонов. В больших оркестрах на десятки скрипок приходится 5—6 контрабасов и тем не менее их всегда ясно слышно.

Наблюдение эффекта маскировки позволяет совершенно иным методом, чем ранее, подойти к изучению механизма восприятия звука слуховой мембраной улитки. Можно предполагать с известной степенью вероятности, как это делают Вегель и Лэн, что исследуемый тон будет слышен на фоне маскирующего тогда, когда амплитуда вызываемых им колебаний слуховой мембраны станет близка по величине с амплитудой колебаний той же мембраны, производимой маскирующим тоном. При этом предположении мы можем считать, что кривые маскировки на каждом графике рис. 6 характеризуют не что иное, как амплитуду колебаний слуховой мембраны под действием маскирующих тонов, при разной их громкости.

Рассмотрение кривых показывает, что каждый тон производит колебание мембраны в довольно широком интервале; ощущение высоты определяется, повидимому, местом максимальной амплитуды. Не надо забывать, что масштаб кривых логарифмический и что, следовательно, в линейном масштабе подъем и спадание кривых было бы гораздо резче и максимумы выделялись бы сильней.

Особенное внимание обращает на себя кривая маскировки тона 200 *кол./сек.* при громкости 80 *TU*; этот тон маскирует в области около 1 000 *кол./сек.* в 10, примерно, раз сильней, чем в области 200 *кол./сек.*; это показывает, что субъективные гармоники низких

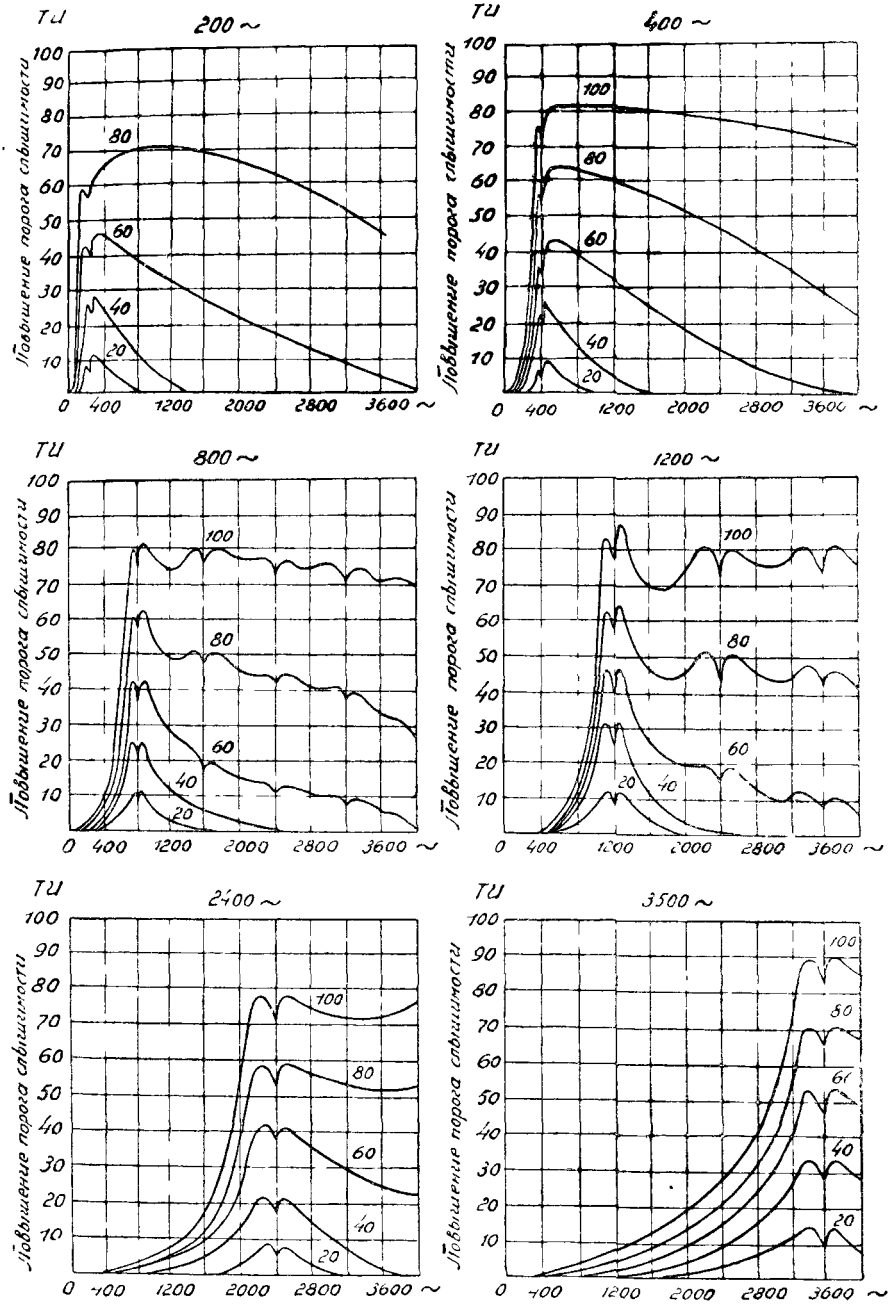

Рис. 6. Величина маскировки тонов музыкальной шкалы тонами в 200, 400, 800, 1 200, 2 400 и 3 500 *кол./сек.* и разной силы.

тонов могут быть сильней, чем сами эти тона, на что мы указывали в связи с вопросом о нижнем пределе слышимости.

Изучение кривых маскировки позволило вычислить то гипотетическое распределение восприятия частот по слуховой мембране, которое приведено на рис. 25. Кривые рис. 6 дают богатый материал для теории слуха и позволяют подойти к вопросу о тонкости слуха и о затухании волокон слуховой мебраны несколько иначе, чем это сделал Гельмгольц, изучая, при какой частоте вибрации перестают различаться трели. Дальнейшее исследование этого вопроса, вероятно, позволит подойти к точному количественному расчету слухового восприятия и возникновения комбинационных тонов.

Измерение маскирующего действия при действии маскирующего тона на противоположное ухо позволило определить, что звук, проходя через голову к другому уху, ослабляется, примерно, в 100 раз, что совпадает с измерениями, сделанными на лицах совершенно глухих на одно ухо.

Мы видели, что образование субъективных обертонов и комбинационных тонов в случае многозвучий происходит при большой силе звука в весьма сильной степени. Это влечет, конечно, к искажению тембра. При громадном увеличении интенсивности речи, как это имеет место в современных громкоговорителях, неизбежно должно получиться искажение тембра гласных и согласных, влекущее за собой непонятливость речи. Поэтому, например, испытание мощных громкоговорителей в маленькой комнате совершенно не имеет смысла — они обязательно дадут непонятную речь, тогда как на открытом воздухе будут прекрасно работать. Те же рассуждения приходится применять и для усилительных аппаратов в помощь глухим. Сильные звуки, даваемые этими аппаратами, неизбежно дадут в ухе искажения речи и уменьшат понятливость. Вот почему исправление глухоты сильной степени, хотя казалось бы и возможно технически, так как современные усилители дают почти неограниченное усиление, но практически не приводит к желаемым результатам из-за особенности механизма нашего уха.

IV. Определение слухом направления звука.

Опыт показывает, что слуховой аппарат способен с точностью до 3—4° определять направление приходящей звуковой волны. Эта способность есть следствие того, что человек обладает двумя ушами, ибо люди глухие на одно ухо определить направление звука не могут.

Исследования последних лет весьма подробно осветили этот вопрос как с теоретической, так и с опытной стороны. Для объяснения способности определять направления возможны три предположения:

1. Суждение о направлении составляется благодаря тому, что ухо, повернутое к источнику звука, получает более интенсивный звук, чем противоположное ухо. Если звуки, воспринимаемые обоими ушами, одинаково громки, то звук локализуется нами в средней плоскости, то есть кажется идущим спереди или сзади.

2. Суждение о направлении создается благодаря способности воспринимать разность фаз, образующуюся благодаря приходу звука раньше к одному уху, чем к другому.

3. Суждение о направлении составляется благодаря способности воспринимать промежуток времени между приходом звука к одному и другому уху.

Теория диффракции звука вокруг шара, развитая лордом Релеем [1]), показывает, что отношение интенсивностей звука спереди и сзади шара, размером с голову человека, вообще говоря, очень незначительно и, кроме того, быстро убывает с уменьшением длины звуковой волны. Эта причина могла бы объяснить способность восприятия направления лишь при самых низких частотах.

Стюарт [2]) показал на опыте, что разница интенсивностей, действительно, не является существенным фактором при суждении о направлении.

Если справедливо второе предположение, то при одной и той же разности фаз двух звуков должно получиться одинаковое суждение о направлении независимо от высоты звука. Предположим, что мы воспринимаем под одним и тем же углом два звука в 100 и 1 000 *кол./сек.* Так как скорость звука и расстояние между ушами по линии распространения волны являются постоянными, то для обоих звуков промежуток времени t между моментом достижения звуками двух ушей будет одинаков. Разность же фаз, равная $2\pi Nt$, будет, очевидно, для тона в 1 000 *кол./сек.* в 10 раз больше, чем для тона 100 *кол./сек.* Из этих соображений ясно, что, при правильности второй гипотезы, острота определения направления увеличивалась бы с частотой.

Опыт показывает, однако, что острота определения направления одинакова при разных частотах и равна, примерно, 3—4°; для больших животных, например слонов, есть основания считать ее выше. Таким образом более вероятным становится третье предположение.

Окончательную ясность внесли в этот вопрос опыты Хартлея, Фрея и Стюарта [3]). Обстановка опыта такова: к двум ушам подводятся два независимые звука одной силы, разность фаз коих может быть точно измерена, и определяется, в каком направлении

---

[1]) Rayleigh. Phil. Mag., *13*, 217, 1907.

[2]) Stewart. Phys. Rev., *15*, 425, 1920; обзор вопроса: Stewart. Phys. Rev., *9*, 502, 1917.

[3]) Stewart. l. c.; Hartley, Phys. Rev., *13*, 373, 1919; Hartley and Frey. Phys. Rev., *18*, 431, 1921.

локализуется „кажущийся“ источник звука в зависимости от разности фаз.

При разности фаз 0 звук всегда кажется идущим как раз спереди. При наличии разности фаз звуковое „изображение“ перемещается в сторону звука, опережающего по фазе. При разности фаз, близкой к 180°, смещение изображения наибольшее — на низких тонах (100 *кол.*) оно около 180°, при 1 000 *кол./сек.* оно падает до 40°. Таким образом, положение „кажущегося источника звука“, при данной разности фаз, зависит от высоты звуков. При увеличении разности фаз до 180° звуковое изображение быстро приближается, как бы входит в голову, перескакивает на другую сторону при переходе фазы через 180° и затем совершает симметричный путь по другую сторону до средней плоскости: при разности фаз $\varphi°$ положение „изображения“ то же, что и при $(360 - \varphi°)$ или при $(-\varphi°)$. На высоких тонах при значительных разностях фаз наблюдается не одно звуковое „изображение“, а несколько, что, возможно, стоит в связи с тем, что на расстоянии между ушами укладывается несколько звуковых волн. Выше 1 500 *кол./сек.* суждение о направлении по разности фаз становится уже затруднительным. Стюарт показал, что между разностью фаз φ звуков в ушах и углом сдвига α „изображения“ от средней плоскости, существует соотношение:

$$\frac{\varphi}{\alpha} = kN + \frac{1}{2},$$

где k — постоянная.

При больших частотах это отношение оказывается практически прямой пропорциональностью, так как первый член гораздо больше, чем $^1/_2$. Так как в первом приближении можно считать, что при разности фаз φ получится некоторая разность времен прибытия одинаковых фаз к двум ушам:

$$\Delta t = \frac{\varphi}{2\pi N},$$

то написанная выше зависимость для высоких частот может быть приближенно выражена следующим образом:

$$\frac{\alpha}{\Delta t} = \frac{2\pi}{k} = \text{const}.$$

Таким образом, из опытов Стюарта приближенно следует, что угол сдвига звукового „изображения“ пропорционален разности времен прихода одинаковых фаз звуковой волны к двум ушам. Величина $2\pi/k$ оказывается равной ок. 1 570, то есть:

$$\alpha = 1\,570\,\Delta t,$$

причем α измеряется в дуговой мере. Этот вывод говорит за правильность третьей гипотезы.

Считая, что человек оценивает отклонение звука от средней плоскости на 3°, мы найдем, что это соответствует восприятию промежутка времени около 0,00003 *сек.* Горнбостель и Вертгеймер [1]), наблюдая короткие звуковые импульсы, доказали, что суждение о направлении зависит именно от разности времен прихода звука к двум ушам. Минимальную воспринимаемую разность времен они определили как раз в 0,00003 *сек.* При разнице времен в 0,0006 *сек.* получается уже ощущение звука, приходящего под углом в 90°.

Совокупность всех опытных данных говорит, таким образом, за правильность третьего из высказанных предположений.

Установленные в этой области закономерности позволили осуществить ряд практических приложений, воспользовавшись способностью человека определять направление звука. Если увеличить звуковую базу и подводить звук к ушам от двух рупоров, отстоящих на большое расстояние (одинаковое от обоих ушей), то минимальный ощутимый промежуток времени 0,00003 *сек.* мы получим уже не при 3° отклонения от средней линии, а при гораздо меньшем угле. Приборы, построенные на этом принципе — акустические пеленгаторы — позволяют определить направление с точностью до $^1/_2$° и меньше. Эти приборы находят себе применение в военном деле.

Чувствительность в оценке направления всего больше в средней плоскости. Этим обстоятельством можно воспользоваться для оценки небольшого изменения разности фаз, вводимого прохождением звука через определенную среду (например газ), свойства которой желательно изучить; компенсировав создавшуюся разность фаз, заставляя второй звук пройти известный путь в воздухе, и приводя, таким образом, звук снова в среднюю плоскость, можно легко сравнить скорость звука в воздухе и в исследуемом веществе [2]).

V. Изучение голосового аппарата человека с акустической точки зрения.

Я не считаю нужным в объеме этой статьи останавливаться на описании строения голосового аппарата, даже так кратко, как сделал это в отношении слухового. Строение голосового аппарата анатомически значительно проще и гораздо лучше исследовано благодаря возможности изучения в момент его функционирования у живых людей посредством ларингоскопии и рентгеновских снимков. Недавно

---

[1]) Hornbostel und Wertheimer. Sitzber. d. Preuss. Akad. d. Wiss., 20. 1920.

[2]) W. Kunze. Phys. ZS., Dec. 1921.

вышла в русском переводе книга Музехольда: „Акустика и механика голосового аппарата", в которой можно найти подробное изложение вопросов анатомии и физиологии голоса. В дальнейшем я коснусь, главным образом, физических явлений при голосообразовании и вопроса объективного анализа звука речи.

Голосовой аппарат состоит из трех главных частей: 1) легких с системой вдыхательных и выдыхательных мышц, 2) гортани с голосовыми связками или „губами" по терминологии Музехольда и 3) системы воздушных полостей, играющих роль резонаторов и излучателей звука.

Как физический инструмент голосовой аппарат совершенно основательно сравнивают с язычковой органной трубой. Из трех частей его наименее подобны язычку органной трубы, конечно, связки, но в принципе роль их та же самая. Связки во время голосообразования представляют собою два стоящие параллельно и прижатые друг к другу мускульных валика, степень натяжения коих определяет высоту издаваемого тона. Голос может изменяться по высоте в пределах более двух октав, но на-ряду с нормальным — грудным голосом — человек может издавать особые звуки, более высокие — это так называемый фальцет или фистула. На механизме голосообразования (фонации) при грудном голосе и фальцете я остановлюсь несколько подробней в виду большого интереса этого вопроса, подробно освещенного лишь в последнее время Музехольдом при помощи ларингоскопической фотографии, причем в соединении со стробоскопом ему удалось проследить отдельные фазы раскрытия голосовой щели.

Натяжение голосовых связок может происходить или благодаря сокращению мускульных волокон, составляющих самые связки, — это так называемое внутреннее натяжение, — или посредством воздействия других мышц гортани, растягивающих связки пассивно, — это внешнее натяжение. Характер функционирования связок в этих двух случаях совершенно иной. На моментальных фотографиях голосовой щели при грудном голосе связки представляются подобными двум толстым напряженным мускульным валикам похожим на губы, плотно сжатые друг с другом; это соответствует сокращению и „внутреннему" натяжению связок. При фонации раскрытие голосовой щели происходит лишь на очень короткий момент в течение малой части периода, и за это время через нее проходит сильный прорыв воздуха. Периодическое следование таких толчков дает звук богатый обертонами, с металлическим оттенком. При этом звуке передняя грудная стенка дает сильное дрожание (fremitus pectoralis), ощутимое рукой, почему этому типу голоса и дано название грудного регистра.

При фальцете связки представляются плоскими и сильно растянутыми и между ними в середине образуется просвет как между двумя туго растянутыми резиновыми полосками. Края связок утоньшены

и повидимому не имеют такой упругости как при грудном звуке; при фонации колеблются, отодвигаясь вверх и в бока, главным образом края связок, полного закрытия голосовой щели не получается даже и в момент фазы наибольшего сближения связок. Полного прерывания тока воздуха таким образом не получается, происходит только ослабление и усиление его. Фальцетный голос вследствие этого не богат обертонами, он звучит очень мягко, не обладает металлическим оттенком (высокие обертоны) и не имеет силы. Дрожания грудной стенки также не получается.

Исследования Дэйтона Миллера в Америке, законченные к 1914 г. и описанные в его чрезвычайно интересной книге: „Наука о музыкальных звуках“ [1]), представляют солидный шаг вперед в деле изучения звука голоса. Для записи звука Миллер применяет прибор,

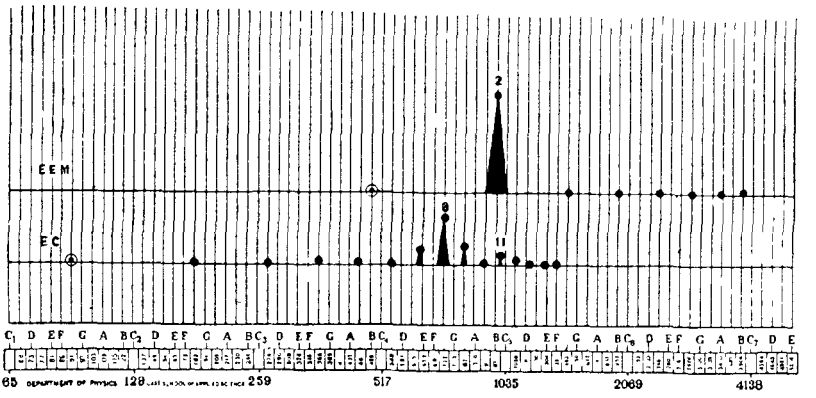

Рис. 7. „Спектры“ голоса сопрано и баса на гласной *a*.

названный им „фонодейк“, состоящий из тонкой стеклянной мембраны с рупором, которая передает свои колебания маленькому зеркальцу, вращающемуся на оси. Прибор очень чувствителен и отмечает звуки до 10 000 *кол./сек.*; в принципе этот прибор не нов, но чрезвычайно хорошо сконструирован.

Для градуировки прибора на силу звука Миллер применяет набор закрытых органных труб от 129 до 4 138 *кол./сек.* одинаковой громкости на слух. Такая градуировка оказалась чрезвычайно кропотливым и трудным делом и заняла по расчету автора в общем $3^1/_2$ года ежедневной 8-часовой работы одного исследователя. Однако в результате этой работы получилась возможность учесть искажения, вносимые различными рупорами и мембранами, и вычислить относительную силу гармонических обертонов различных звуков. Применяя трубы одинаковой громкости (субъективной), Миллер, конечно, упростил задачу, но, не учтя уменьшения чувствительности уха в области низких тонов,

[1]) Dayton C. Miller. The Science of Musical Sounds. New York, 1922.

ввел значительную ошибку. Следует думать, что все анализы Миллера дают в десятки раз преуменьшенную силу звука низких тонов; ошибка становится тем меньше, чем выше тоны.

Все свои анализы Миллер представил в очень удобной графической форме, которая поздней получила название „звуковых спектров". Рис. 7 представляет, например, „спектр" гласной *а* (как в английском слове father), пропетой сопрано на высоте 488 *кол./сек.* и басом на высоте 91 *кол. сек.*; по оси абсцисс отложены в логарифмическом масштабе высоты тонов, а по оси ординат — интенсивность отдельных гармоник в виде пирамидок. Из спектра гласной *а* у баса видно, что 2, 8, 9 и 11 гармоники сравнительно сильны, особенно выделяется 8 гармоника — 732 *кол./сек.* Интенсивность основного тона и всех гармоник до 6 по данному анализу так мала, что на чертеже отмечена быть не может. Для сопрано особенно сильна 2 гармоника 977 *кол./сек.* Как мы увидим далее, данные Миллера в отношении силы низких гармоник ошибочны.

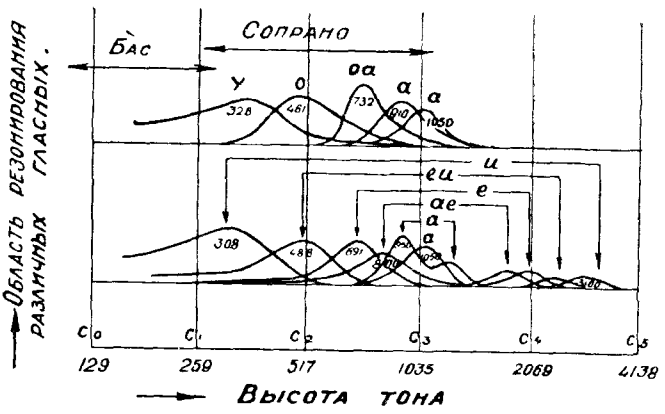

Рис. 8. Положение формант различных гласных.

На рис. 8 изображен общий результат анализа различных гласных, вытекающий из работы Миллера, гласные *а*, *оа* (среднее между *а* и *о*), *о* и *у*, на какой бы высоте они ни произносились, всегда имеют одну определенную область усиления обертонов; для *а* она самая высокая, около 1000 *кол./сек.* (c^3), для *у* — самая низкая — около 300 *кол./сек.* Каждая из гласных *ае*, *е*, *еи*, *и* имеет две характеристические области — одну низкую и одну высокую; для *и*, например, они лежат около 300 и 3000 *кол./сек.* Наличие характеристических областей гласных находится в непосредственной зависимости от формы и объема верхних резонансных полостей, что было твердо установлено Гельмгольцем еще в шестидесятых годах прошлого столетия.

Звук, образуемый вибрацией голосовых связок, равно как и вибрацией язычка органной трубы, совершенно видоизменяется наличием резонансных полостей. Резонансные полости глотки, носоглотки и рта играют прежде всего роль усилителей тех обертонов звука связок, которые лежат близко от собственного тона полости. В виду того, что стенки этих полостей мягки, резонанс их не ограничивается узкой

областью тонов; отступление от тона полости на большую терцию (на 25%) дает уменьшение резонирования всего на половину. В результате такая резонансная полость усиливает обертоны голоса на протяжении почти целой октавы. На примере рис. 7 мы видели, что усиленными оказываются 7, 8, 9 и 11 обертоны. Таким образом ясно, что тембр звука голоса будет существенным образом зависеть от настройки резонаторных полостей, главным образом полости рта и глотки. Полость рта является, кроме того, резонатором с большим отверстием во внешнее пространство и потому является *излучателем звука* или, применяя термин из радио-телеграфии, *звуковой антенной*.

Полость носоглотки, как лежащая сбоку, может являться своего рода звуковым фильтром[1]): она может определенные тоны поглощать и не выпускать во-вне; особенно важна эта роль носоглотки в пении для придания звуку голоса известной окраски.

Форма полости глотки и рта при произнесении различных гласных приведена на рис. 9.

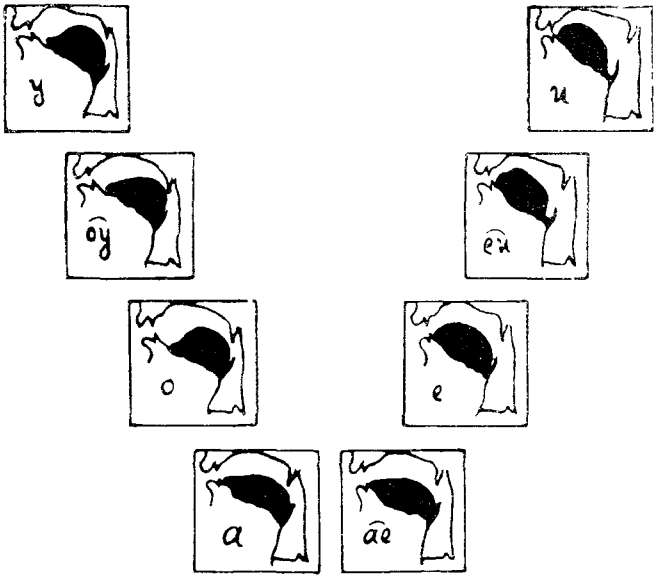

Рис. 9. Форма полости рта при различных гласных.

Изложенная теория образования гласных принадлежит Гельмгольцу[2]). Физиолог Германн[3]) смотрит на дело несколько иначе: он предполагает, что каждый воздушный толчок, создаваемый связками, возбуждает колебания ротового резонатора с присущей ему частотой, и затем эти колебания быстро затухают, пока не будут вновь возбуждены следующим воздушным толчком. Таким образом, кривая гласной должна состоять из чередования серий затухающих колебаний, имеющих высоту, определяемую собственным периодом резонатора, и следующих друг за друга с частотою колебаний связок. Согласно взгляду Германна, тон возбуждаемого таким образом резонатора может и не быть гармоническим обер-

[1]) Теория и практика звуковых фильтров разработана Стюартом. Stewart Phys. Rev., XX. p. 529. 1922.

[2]) H. Helmholtz. Die Lehre von d. Tonempfindungen.

[3]) L. Hermann. Phonophotographische Untersuchungen, Pfl. Arch., 1745 и 347, 1890.

тоном тона связок. Для звука каждой гласной характерны лишь ритмические чередования тона определенной высоты для данной гласной. Германн называет собственный тон резонаторной полости формантой гласной.

Из кривых записи звука гласных, снятых самим Германном, и в последние годы,— усовершенствованными методами, о которых речь будет ниже,— Миллером, Тренделенбургом и др., видно, что отдельные серии затухающих колебаний действительно следуют друг за другом, причем следуют через точно одинаковые промежутки времени (период основного тона связок) и абсолютно тожественны друг с другом. Никогда на записях гласных не получается периодов неподобных один другому. Это уже служит несомненным признаком того, что в составе звука гласной не существует негармонических обертонов, хотя резонаторная полость, может быть, и колеблется со своим периодом, негармоническим к основному тону.

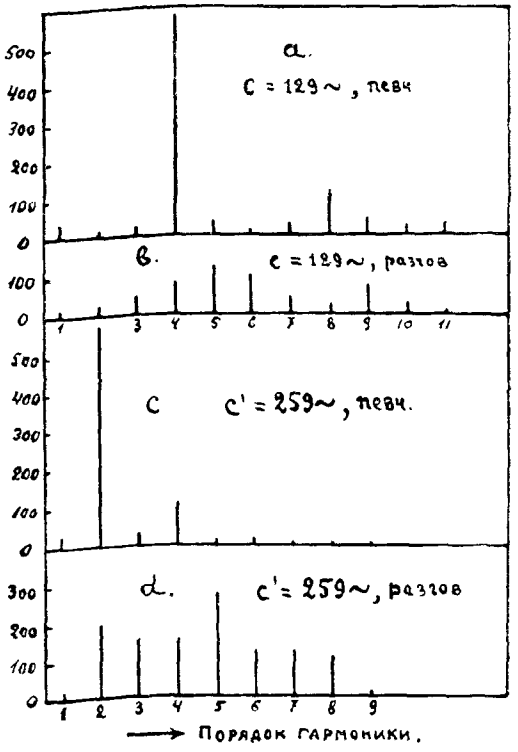

Рис. 10. Спектры гласной *a* при певческом и разговорном языке голоса.

Если мы вспомним, что в результате наложения двух соседних гармонических обертонов всегда получится кривая биений с частотой биений, равной частоте основного тона, и если примем во внимание, что пульсации более сложной формы всегда могут быть составлены в результате сложения большего числа гармоник, и, если примем во внимание тожественность отдельных периодов, то мы придем к заключению, что взгляд Германна и взгляд Гельмгольца в сущности тожественны. Говорить ли о звучании пульсирующей с частотой основного тона форманты (Германн) или о сочетании ряда гармоник, которые в сумме дают той же формы кривую (Гельмгольц),— математически безразлично. Точно также кривая биений тона определенной высоты тожественна с кривой, полученной от сложения двух назатухающих тонов, близких по высоте.

Термин „форманта", введенный Германном, быстро привился в науке, но применяется он обычно не как обозначение определен-

ного тона, характерного для данной гласной, а как характеристическая область резонанса, в которой усиливается ряд гармоник звука, даваемого связками.

В результате подробного исследования звука голоса, произведенного мною совместно с В. С. Казанским при помощи „звукового осциллографа" Казанского [1]), удалось получить некоторые новые данные о составе звука певческого голоса. Первая несомненно отмеченная особенность певческого звука — это чрезвычайная резкость резонирования обертонов в известной области. На рис. 10 *a* и *b* даны спектры гласной *a* для певческого и разговорного голоса на высоте 129 *кол./сек.*; на рис. 10 *c* и *d* даны аналогичные спектры гласной *a* на высоте 259 *кол./сек.* Резкость резонирования можно, может быть, объяснить увеличением твердости стенок резонаторных полостей (глотка, зев, рот). Интересно отметить, что для певческого звука почти для всех гласных наблюдается обычно резкое усиление одного определенного обертона; для $c = 259$ *кол./сек.* это будет, например, второй

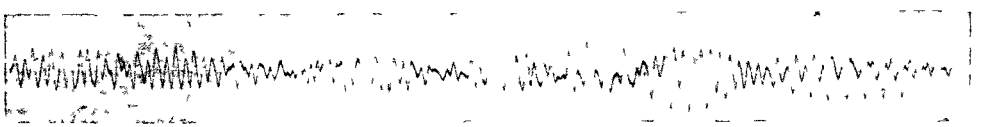

Рис. 11. Запись голоса арт. Воробьева на тоне *e'*—325 *кол./сек.*

обертон — 517. Таким образом становится понятным, почему хорошо выработанные голоса имеют сходный „певческий" тембр на всех гласных.

Вторая характерная особенность певческого звука — это чрезвычайная изменчивость кривой, наличие целого ряда быстрых и неправильных пульсаций. Без этих пульсаций голос приобретает безжизненный характер. Рис. 11 дает кривую звука голоса для высокой ноты (*e'*—325 *кол./сек.*) баритона. На записях певческого голоса встречаются очень часто кривые непериодического характера, или, верней сказать, постепенно видоизменяющиеся периодические кривые, что говорит уже о несомненном наличии негармонических обертонов. Наконец, отмечается наличие для гласных *a* и *o* двух низких резонансных областей, а не одной, как это было принято считать до сих пор. На ряде других, менее интересных данных о певческом голосе я здесь не буду останавливаться.

VI. Анализ речи.

В настоящее время мы имеем целый ряд важнейших исследований по вопросу анализа речи, передачи ее по проводам и радио и воспроизведения с большой громкостью. Не имея возможности коснуться

[1]) В. С. Казанский. Журн. Прикл. Физики, *4*, вып. *3*. 1927.

в объеме этой статьи из двух последних вопросов, как более специальных, я остановлюсь только на первом, а именно на анализе речи.

Американский физик Венте [1]) нашел совершенный способ восприятия звука и превращения его в электрическую форму без искажений. Прибор, им сконструированный, представляет собою конденсатор, состоящий из неподвижного массивного цилиндрического электрода, диаметром 5 *см*, и из туго натянутой тончайшей стальной мембраны, лежащей от него на расстоянии нескольких сотых миллиметра и электрически от него изолированной. Если такой „конденсаторный микрофон" включить в цепь батареи, то при колебаниях мембраны заряд конденсатора будет меняться, и эти колебания заряда могут быть усилены в любой степени посредством катодных усилителей и записаны любым методом, например осциллографом или струнным гальванометром.

Мембрана конденсаторного микрофона Венте имела очень высокий собственный период — до 12 000 *кол./сек.*, который еще повышается благодаря трению в воздушной прослойке между мембраной и задним электродом, до 17 000 *кол./сек.* В области звуков речи и музыки такая мембрана не имеет резонансных свойств и позволяет без искажения воспринять звуки от 25 до 8 000 *кол./сек.* Стальная мембрана с успехом может быть заменена тонкой шелковой, на которую наклеивается алюминиевая фольга в несколько микронов толщиной [2]).

Исходным пунктом для изучения речи как физического феномена послужили исследования чувствительности слуха, которые позволили установить, в связи с анализом звука речи, распределение (среднее статистическое) энергии речи по частотам и относительную громкость речи по отношению к порогу слышимости. Сводка результатов этих работ сделана на рис. 4, где область речи представляет собой заштрихованную часть всей области слухового восприятия.

Выяснение среднего распределения энергии речи по частотам было чрезвычайно существенным для телефонной практики, чтобы решить вопрос о важности тех или других частот при передаче речи. Для решения этой задачи перед конденсаторным микрофоном произносился ряд слогов, состоящих из гласных и согласных в той пропорции, как они встречаются в действительной речи; получающиеся электрические колебания звуковой частоты усиливались, регистрировались и после анализа представлялись в форме звуковых спектров. Суммарный результат исследования распределения энергии в „спектре" речи, произведенный Крэндаллом и Мэккензи [3]) изображен на рис. 12, кривая *A*. Эта кривая относится к среднему человеческому голосу;

[1]) Wente. Phys. Rev. *10*, 39, 1917; *11*, 450, 1918.

[2]) Rigger. Wiss. Veröffentl. aus d. Siemens Konz. 1923.

[3]) Crandall and Mackenzie. Phys. Rev. *10*, 74, 1917; *19*, 221, 1922.

она имеет резкий максимум в области 150 *кол./сек.* В спектре женской речи максимум лежит на 200 *кол./сек.*, в спектре мужской — на 100 *кол./сек.* Так как главную составную часть речи представляют гласные, то распределение энергии речи можно построить на основании анализов Миллера. Таким способом получается кривая *B* с резким максимумом в области 700 *кол./сек.*; несоответствие этих кривых объясняется тем, что во всех анализах Миллера энергия низких частот недооценена.

Из приведенных данных казалось бы естественным сделать вывод, что для совершенства передачи речи по телефону надо заботиться главным образом о том, чтобы без ослабления передалась область низких частот от 100 до 200 *кол./сек.* и с этим расчетом строить пе-

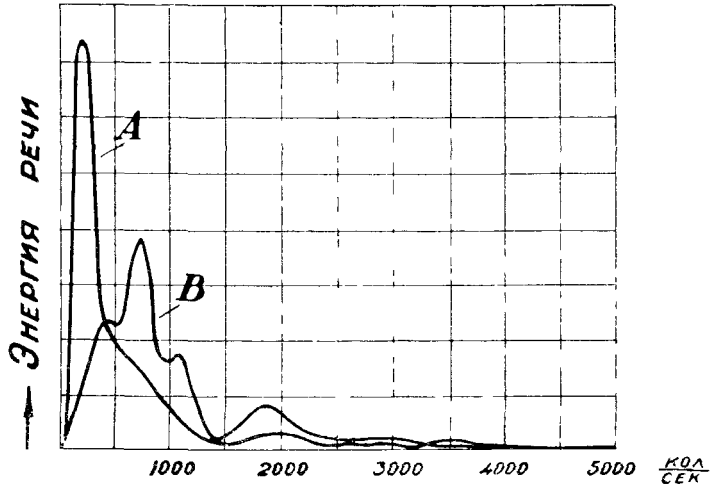

Рис. 12. Распределение энергии в спектре разговорной речи, *A* — по Крэндаллу и Мокензи, *B* — по данным Миллера.

редающие и воспринимающие приборы. Однако опыт показал, что дело обстоит совершенно иначе.

В лаборатории Вестерн Электрик К° была исследована разборчивость передачи речи при условии поглощения определенной области частот при помощи электрических фильтров. Опыт дал изумительный результат: оказалось, что при исключении всех частот до 500 *кол./сек.* разборчивость или артикуляция речи [1]) падает всего на 5% по отношению к нормальной; исключение всех частот до 1 000 *кол./сек.*, причем поглощается 82% всей энергии речи, уменьшает разборчивость всего на 15%. Поглощение области частот выше 1 000 *кол./сек.* сразу влечет резкое уменьшение разбор-

[1]) Артикуляция есть процент правильно понятых при передаче по телефону слов по отношению к общему количеству слов.

чивости. Интересно отметить, что тембр речи, когда в ней исключены низкие частоты, становится режущим, с „металлическими“ оттенками. При исключении всех высоких частот, тембр приобретает глухой, „темный“ характер. Исключение всех частот выше 1 000 *кол./сек.*, несущих только 18% энергии, уменьшает разборчивость до 40% нормальной.

Из этих опытов легко подсчитать относительную важность различных частот для разборчивости речи; из кривой на рис. 13 [1]) мы видим, что наиболее важна область частот по соседству 1 000 *кол./сек.* и что вообще высокие частоты важнее, чем низкие. Здесь приходится с удивлением вспомнить, что резонанс большинства железных телефонных мембран лежит как раз близко от 1 000 *кол./сек.* Эмпирический подбор толщины и диаметра очевидно привел как раз к наилучшим для ясности передачи размерам мембран.

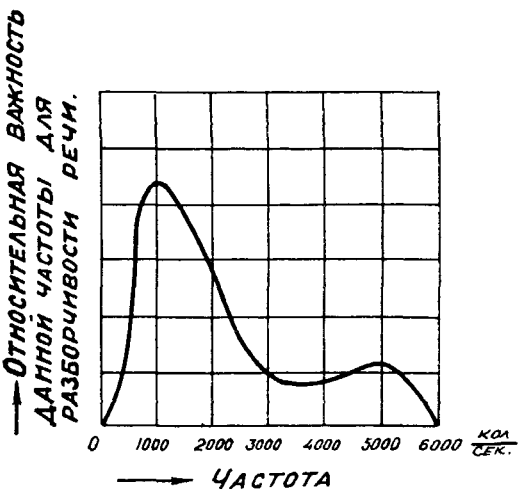

Рис. 13. Относительная важность различных частот для разборчивости речи.

Указанные наблюдения касаются только разборчивости речи. Если подходить к передаче музыки или пения, то мы встанем перед совершенно иными особенностями тембра, связанными с красотой и полнотой звука, и здесь задача конструирования воспринимающих и воспроизводящих аппаратов становится перед новыми трудностями, пока еще не преодоленными. Укажу, как пример, что известный у нас громкоговоритель треста слабых токов с бумажной мембраной — так называемый „диффузер“, при исследовании в акустической лаборатории Гос. экспер. электротехнич. института показал прекрасную артикуляцию, но для передачи музыки и пения он очень мало пригоден из-за неприятного „бумажного“ тембра, производящего антихудожественное впечатление.

Причину незначительности искажений тембра при исключении низких частот выяснил в своих исследованиях, уже упомянутых выше, Флетчер. Дело в том, что механизм уха обладает способностью комбинировать низкие тона в результате созвучания нескольких высоких обертонов. Как результат этого свойства уха и является способность уха восстанавливать субъективно исключенные низкие тона в результате сочетания верхних гармоник.

[1]) Кривая взята из статьи R. J o n e s'a „The Nature of Language“ A. J. E E. Apr. 1924.

Исследование звука усовершенствованными методами привело к обнаружению некоторых новых особенностей гласных, ранее неизвестных, а также и к выяснению природы согласных, ранее вообще мало известной. Тренделенбург [1]) выработал весьма чувствительный способ записи звука без искажений при помощи осциллографа и конденсаторного микрофона. В результате своей работы он обнаружил, что гласные *а*, *о* и *у* всегда обладают кроме низкой форманты еще характеристическими призвуками в высокой области выше 3000 *кол./сек.* Эти призвуки характерны не для гласной, а для индивидуального тембра голоса; особенно сильны эти призвуки в гласной *а*. Прежние методы записи были повидимому недостаточно чувствительны в области высоких тонов, чтобы обнаружить эти особенности. Тренделенбургом определены также вновь области формант всех гласных, при чем он нашел полное согласие с прежними работами; с данными Миллера имеется расхождение в области определения интенсивности низких частот, что и следовало ожидать по указанным уже нами причинам. Низкие частоты в звуке гласных имеют значительную интенсивность; интересно отметить, что голос обученного певца дает более сильные основной тон и вторую гармонику (октаву), но менее резко выраженный характер гласной, что вполне сходится с исследованиями моими и Казанского.

Штумпф [2]), исследуя тембр гласных на слух, также обнаружил высокие характеристические призвуки в тех же областях, как и Тренделенбург.

Совершенно новый метод записи звука предложил известный физиолог Эйнтховен [3]). Этот метод повидимому совершенно свободен от искажений и позволяет записать самые высокие звуки до 15000 *кол./сек.*, но не обладает большой чувствительностью. Тончайшая кварцевая нить менее 1 μ диаметром подвешивается в слабо натянутом состоянии в устье рупора; она настолько легка, что свободно увлекается самыми быстрыми колебаниями воздуха. Колебания нити наблюдаются также, как и в струнном гальванометре Эйнтховена, через микроскоп при сильном освещении и фотографируются на подвижной ленте. На полученных снимках звука гласных *у* и *а* отмечается присутствие высоких обертонов в области выше 2000 *кол./сек.*, открытых Тренделенбургом.

Чрезвычайно полный анализ звуков речи произведен Крэндаллом [4]) в лаборатории Вестерн-Электрик. Им снято несколько сотен звуков гласных и согласных при помощи высокопериодного осциллографа, и все записи подвергнуты анализу и представлены в виде спектров.

---

[1]) F. Trendelenburg. Wiss. Veröff. aus d. Siemens Konzern, *3*, 43, 1924.

[2]) C. Stumpf. Beitr. z. Anat. u Physiol. d. Ohres, d. Nase u. d. Halses, *17*, 151, 1921.

[3]) Einthoven. Pfl. Arch. *117*, 461.

[4]) I. Crandall. Bell. Techn. Journ. *3*, 232, 1924; *4*, 586, 1925; *6*, 100, 1927.

Важнейший результат этой работы заключается в том, что для всех гласных найдено по 2 резонансных области (форманты). Сводка средних данных Крэндалла для различных гласных (в английском произношении) приведены на рис. 14. Прежние исследователи, начиная с Гельмгольца и кончая Миллером, находили для гласных *y*, *o*, и *a* только по одной области резонанса.

Подсчет, произведенный Крэндаллом, показывает, что наличие двух областей резонанса можно объяснить наличием двух резонирующих полостей: задней — полость глотки и передней — полость рта, разделенных сужением, образуемым корнем языка и мягким нёбом. Результат подсчета колебаний такой связанной системы двух резонаторов очень хорошо совпадает с опытным материалом для всех гласных.

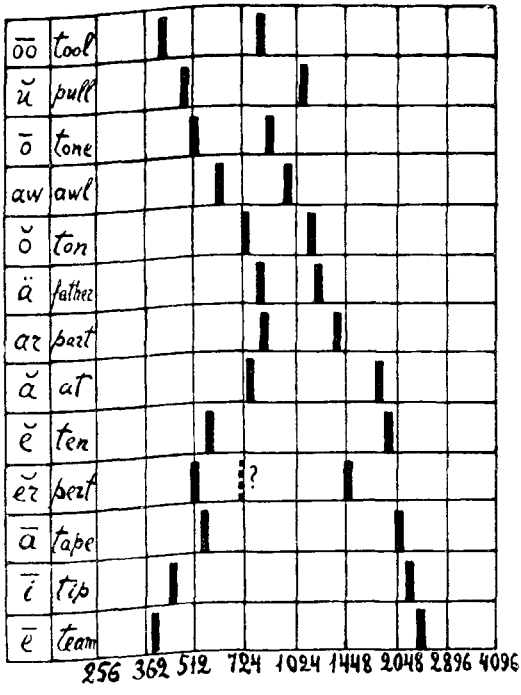

Рис. 14. Положение формант различных гласных по Крэндаллу.

Ричард Пэджет [1]) в 1923 г. весьма совершенно воспроизвел при помощи двойных резонаторов и искусственной гортани звук большинства гласных. Все это говорит повидимому за правильность теории двойного резонанса и окончательно выясняет вопрос о происхождении различных гласных.

Кончая обзор методов анализа звука гласных, необходимо отметить малую чувствительность метода записи кривых в области частот выше 3000. Это обусловлено как инерцией записывающих приспособлений, так и трудностью точного разложения полученной кривой. Полученные кривые необходимо разлагать в ряд Фурье для получения звукового спектра. Процедура гармонического анализа, даже и при пользовании анализаторами, очень сложна и требует массу времени, что особенно надо иметь в виду, принимая во внимание, что анализу приходится подвергать десятки и сотни кривых.

Я предложил [2]) в 1923 г. конструкцию аппарата, который позволяет произвести снятие звуковых спектров совершенно автоматически.

[1]) R. Paget. Proc. Roy. Soc. (A) *102*, 752, 1923; *106*, 150, 1924.

[2]) С. Н. Ржевкин. Звуковой анализатор, основанный на принципе электрического резонанса. Изв. ГЭЭИ, 1926.

Идея прибора аналогична методу звукоанализатора Гельмгольца, основанному на обнаружении звука гармоник посредством резонанса, но с заменой акустических резонаторов, настроенных на разные частоты, одним электрическим резонансным контуром с плавной перестройкой в широком диапазоне. Этот аппарат, который можно назвать акустическим волномером, позволяет свести время полного снятия звукового спектра до нескольких секунд. Чувствительность этого метода в области высоких частот гораздо больше, чем метода записи кривых.

Нам остается коснуться еще только анализа звука согласных. Запись кривых при помощи конденсаторного микрофона позволила Тренделенбургу[1]) разрешить и эту более сложную задачу. Полученные кривые показывают ясно выраженный период, соответствующий тону голосовых связок, лежащему в основе этих согласных, но кроме того содержат колебания высокого периода, явно негармонические с основным тоном, так как в пределах каждого периода картина мелких колебаний на кривой представляется совершенно иной. Оказывается возможно произнести согласные *л*, *м* и *н* так, что они дадут совершенно периодическую кривую, но тогда характер согласной значительно изменяется: *л*, *м* и *н* можно назвать „полугласными“.

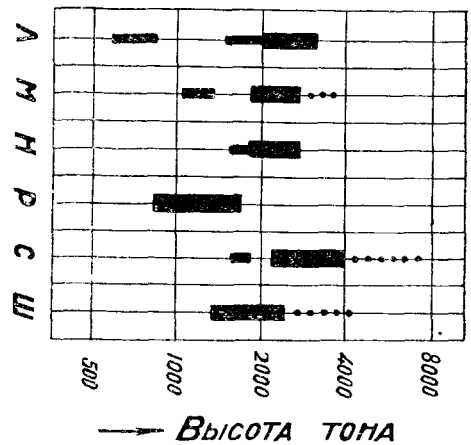

Рис. 15. Характеристические области согласных *Л, М, Н, Р, Ч, Ш* по Штумпфу.

Таким образом можно считать, что согласные представляют собой смесь нескольких звуков, негармонических друг с другом.

Откуда же может появиться другой звук кроме звука связок? В случае согласных *л*, *м* и *н* на этот вопрос сравнительно легко ответить. Воздух, выходящий через голосовую щель и приводящий в колебание связки, далее выходит не через широкое отверстие рта, как в случае гласных, а через более или менее узкое отверстие (в случае *л* — между языком и зубами, в случае *м* — через нос, в случае *н* — через сжатые зубы) и потому может привести в колебание, путем вдувания, полости, через которые проходит. Таким образом резонаторные полости участвуют в звукообразовании, с одной стороны усиливая те или другие гармоники основного тона связок, а с другой — они приходят

[1]) F. Trendelenburg. Wiss. Veröff. aus d. Siemens Konzern. *4*, 1, 1925.

в самостоятельные колебания и дают звуки, негармонические с тоном связок.

Германн представлял себе таким именно образом возникновение гласных, но в кривых записей гласных каждый период подобен другому, а следовательно в них нет негармонических обертонов. Для проверки теории Германна, Тренделенбург снял звук гласной *а* с несоразмерно большой утечкой воздуха и обнаружил в кривой некоторую неодинаковость отдельных периодов, т. е. присутствие негармонических обертонов. Таким образом возбуждение независимых, и потому в некоторых случаях негармонических, колебаний воздушных резонаторов возможно и в случае гласных, при условии плохого использования воздушного потока для возбуждения звука связок.

Рис. 15 представляет таблицу Штумпфа[1]), в которой показано положение областей характеристического резонанса (формант) некоторых согласных. Данные Тренделенбурга в общем согласуются с этой таблицей, но кроме того он находит в этих согласных еще и более высокие призвуки, чем удалось Штумпфу открыть на слух. В результате многочисленных записей и анализов установлено, что для совершенной передачи речи необходимо отсутствие искажений в области от 50 до 5000 *кол./сек.* Наиболее важна в этом отношении область от 1000 до 3000 *кол./сек.*, искажение которой делает речь совершенно неразборчивой. В записях звука согласной *р* характерны биения звука частотой от 20 до 40 в секунду. Согласная *ш* имеет высокий характеристический призвук в области около 4000 *кол./сек.*; согласная *с* имеет призвуки еще более высокие, до 5500 *кол./сек.*, а по некоторым исследованиям даже до 8000 *кол./сек.*

---

[1]) C. Stumpf, l. c