ГРОМКОСТЬ ЗВУКА ПО НОВЫМ ИССЛЕДОВАНИЯМ

А. В. Рабинович, Москва

Содержание: I. Суждение о громкости. II. Минимальное ощутимое изменение громкости. III. Утомляемость слуха. IV. Уровень громкости. V. Суждение об изменении громкости. VI. Громкость сложного звука. VII. Теория громкости. VIII. Громкость весьма кратких звуков. IX. Измерение громкости.

Разрешение ряда проблем звуковой техники, как то: улучшение звучания в радио и звуковом кино, проектирование концертных зал, театров и аудиторий, устранение вредного влияния шумов на человеческий организм, стоит в тесной связи с изучением громкости звука. Всюду, где приходится иметь дело со слуховым восприятием, необходимо учитывать сложную зависимость, существующую между величиной ощущения и соотвествующими физическими факторами.

Вопросу о громкости звука в специальной иностранной литературе в последнее время уделяется большое внимание. В ряде работ уточняется понимание слова „громкость" и устанавливается зависимость громкости от физических и физиологических факторов.

К сожалению, в советской литературе переводы этих работ, за очень редкими исключениями, не опубликованы. Отсутствуют также и обзорные статьи. Поэтому я считал своевременным в краткой статье изложить наиболее интересные из новых экспериментальных и теоретических работ о громкости, по мере возможности систематизируя их и критически сопоставляя.

I. Суждение о громкости

Под громкостью звука мы понимаем степень или величину слухового ощущения. Суждение о громкости носит количественный характер. Оно может проявляться: 1) как суждение о равенстве или неравенстве громкости и 2) как суждение об изменении громкости на некоторую величину.

Первый вид суждения более прост, чем второй. Слыша, например, два различных звука, мы всегда скажем, либо что один громче другого, либо что они одинаковы по громкости. Второй вид суждения заключается в установлении того, насколько (или во сколько раз) один звук громче другого. Такое суждение может быть высказано и по отношению к одному меняющемуся по силе звуку.

В обычных бытовых условиях это суждение сводится к весьма приблизительным определениям: „значительно громче", „немного громче" и т. д. Но в музыке, например, изменения громкости более или менее уточнены: там существует целый ряд градаций, имеющих специальные обозначения — очень тихо (pianissimo, pp), тихо (piano, p), умеренно громко (mezzoforte, mf), громко (forte, f), очень громко (fortissimo, ff) и др. Конечно, эти градации не имеют числового выражения, поскольку они являются терминами искусства, но количественное суждение об изменении громкости налицо.

Громкость является функцией не только силы звука, как это обычно принято считать, но также и функцией частоты: звуки одинаковой силы, но разной частоты, не являются равными по громкости. При одинаковой же частоте громкость действительно определяется только силой звука (если отвлечься от явления утомления слуха).

Зависимость громкости от частоты и силы звука носит сложный характер. Сложным является и экспериментальное определение этой зависимости, поскольку в суждении человека о громкости отсутствует числовой момент и представляется крайне трудным установить единицу измерения. В современных работах наметились три способа определения указанной зависимости.

Первый способ, который является первым и в историческом порядке, заключается в измерениях приростов силы звука, соответствующих минимальным ощутимым изменениям громкости (порог различения). Однако из таких измерений нельзя непосредственно определить зависимость громкости от силы и частоты тона; ее можно установить лишь косвенным путем, делая известное допущение о суммировании элементарных приростов ощущения (закон Вебера-Фехнера).

Второй способ заключается в сравнении громкости двух тонов различной частоты и установления равенства их громкости. Этот способ, основанный на первом виде суждения о громкости, сам по себе также не дает возможность установить полную картину зависимости громкости от частоты и силы тона, определяя лишь различие в характере нарастания громкости в зависимости от увеличения силы звука при различных частотах.

Наконец, третий способ состоит в непосредственной оценке наступившего изменения громкости. При помощи этого способа можно установить полную зависимость громкости звука и от силы и от частоты. Однако экспериментально он наиболее труден и не вполне свободен от случайностей субъективного и методического порядка. Поэтому к полученным результатам следует относиться осторожно, для контроля сопоставляя их с результатами, полученными другими способами.

II. Минимальное ощутимое изменение громкости

Первый способ уже достаточно освещен в специальной литературе. Поэтому мы лишь бегло коснемся его, поскольку это необхо-

димо в интересах дальнейшего изложения, останавливаясь, главным образом, на последних критических и экспериментальных работах по этому вопросу.

Психо-физический закон Вебера-Фехнера, общий для всех органов чувств, в том виде, который придал ему Фехнер, гласит: ощущение пропорционально логарифму раздражения. В применении к слуховым ощущениям закон этот может быть сформулирован следующим образом: громкость звука пропорциональна логарифму относительной силы звука над порогом слышимости.

$$L = K \log \frac{I}{i}, \qquad (1)$$

где L — громкость звука, I — сила звука, i — сила звука на пороге слышимости для данной частоты, K — коэфициент пропорциональности.

Поскольку в нашем понятии не существует „естественной" единицы громкости* звука, величина L может быть определена в условных единицах. Следовательно, коэфициент K является произвольной величиной. Применяя десятичные логарифмы и полагая для удобства $K = 10$, получим:

$$L = 10 \log \frac{I}{i}. \qquad (2)$$

В этой формуле L будет выражено в единицах, именуемых децибелами**.

Как уже было сказано выше, эксперименты, на основании которых был выведен закон Вебера-Фехнера, состояли в определении минимальных различимых приростов ощущения. При этом было установлено, что отношение прироста силы звука ΔI, необходимого для получения указанного прироста ощущения, к исходной силе звука I есть величина постоянная при всякой исходной силе звука:

$$\Delta L = \frac{\Delta I}{I} = \text{const}. \qquad (3)$$

На основании этой диференциальной зависимости Фехнер получил зависимость величины ощущения от раздражения путем интегрирования уравнения (3), что и приводит к указанному выше закону (1).

Закон Вебера-Фехнера был проверен для слуха Риссом[1] и Кнудсеном[2]. Эти два исследователя, пользуясь различной методикой, получили несколько различные результаты. В одном, однако, результаты безусловно сходятся: величина $\frac{\Delta I}{I}$ не является постоянной и зависит от исходной силы звука I, а именно: с увеличением силы

---

* Для примера укажем, что такой естественной единицей высоты звука является октава.

** Единица бел и $^1/_{10}$ ее часть — децибел — введены в 1928 г. по инициативе американской школы физиков и техников, работающих в лабораториях Белла.

звука $\frac{\Delta I}{I}$ уменьшается до известного предела и лишь выше этого предела становится постоянным.

На рис. 1 и 2 приведены кривые, полученные указанными исследователями. По оси ординат на обоих рисунках отложен минимальный ощутимый относительный прирост силы звука $\frac{\Delta I}{I}$, по оси абсцисс на рис. 2 — сила звука над порогом слышимости в децибелах (уровень ощущения), на рис. 1 — частота исследуемого тона.

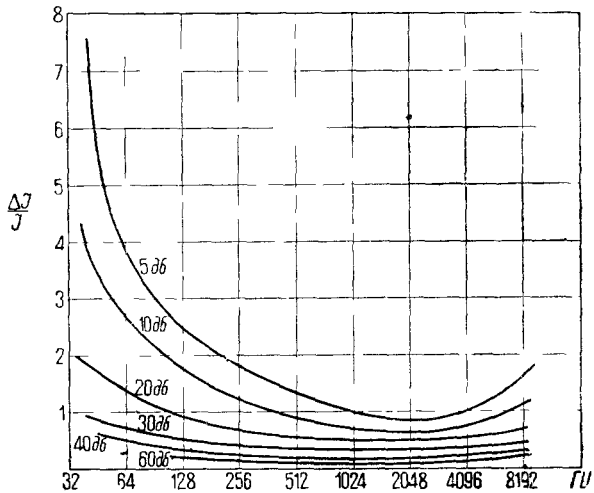

Рис. 1.

Кривые рис. 1 соответствуют уровням ощущения 5, 10, 20, 30, 40 и 60 децибел.

Лазарев[3] дает поправку к закону Вебера-Фехнера, основанную на предложенной им ионной теории возбуждения и подтвержденную экспериментальным материалом:

$$\Delta L = \frac{\Delta I}{I + \beta} = \text{const}, \qquad (4)$$

где β — небольшая величина, характеризующая собственный звук улитки, обусловленный тепловым раздражением. Легко показать, что отношение $\frac{\Delta I}{I}$ уменьшается при увеличении I, стремясь при больших значениях I к постоянному пределу. Вблизи же порога отношение $\frac{\Delta I}{I}$ возрастает. Наблюденное явление Бекеши[4] объясняет следующим образом.

Некоторое раздражение, возбуждая ряд нервных клеток, вызывает определенное ощущение. Более сильное раздражение вводит в действие новые нервные клетки, и только тогда, когда введена в действие

хотя бы одна новая нервная клетка, увеличивается громкость. Для возбуждения одной нервной клетки всегда требуется один и тот же относительный прирост раздражения.

Однако не всегда человек может различить прибавление одной возбужденной нервной клетки: очень часто, под влиянием субъективных колебаний громкости или под влиянием посторонних мешающих обстоятельств, впечатление изменения громкости наступает только тогда, когда вошла в действие целая группа (две, три, четыре) клеток. Это обычно бывает при слабых звуках.

Таким образом порог различения не есть неизменная физиологически обусловленная величина и может быть уменьшен путем

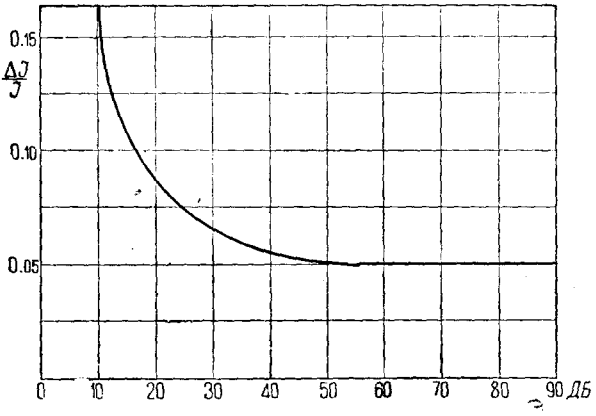

Рис. 2.

упражнения или напряжения внимания. Пределом порога различения является минимальный относительный прирост силы, необходимый для возбуждения одной нервной клетки; порог различения не может быть меньше этой величины.

Громкость звука определяется числом возбужденных нервных клеток. Поэтому невозможно вывести закон изменения громкости, интегрируя наблюденные пороги различения, так как они не всегда соответствуют подлинному $\frac{\Delta I}{I}$, необходимому для возбуждения одной клетки. В этом, очевидно, было слабое место построения Фехнера, установившего путем интегрирования логарифмическую зависимость между силой и громкостью звука (см. выше).

Возвращаясь к результатам работ Кнудсена и Рисса, отметим, что у Кнудсена не наблюдается зависимости порога различения от частоты, у Рисса же такая зависимость налицо. Однако, как это мы увидим в дальнейшем, частотная зависимость, установленная Риссом, как раз противоположна той, которая получается при сравнении громкости звуков различной частоты (работы Кингсбери и др.).

Бекеши[3] подверг критике работы Кнудсена и Рисса и из собственных опытов установил отсутствие зависимости от частоты порога различения силы звука. Однако Бекеши не считает, что полученный результат противоречит наблюденному факту зависимости громкости от частоты: он считает, что весьма малые изменения могут быть независимы от частоты, тогда как сравнительно крупные изменения зависят от частоты. Причину этого, по мнению Бекеши, следует искать в нелинейных искажениях, вносимых самим ухом.

На рис. 3 приведены экспериментальные данные, полученные Бекеши. Он производил измерения только на двух уровнях: в 20 децибел (верхняя линия) и в 40 децибел (нижняя линия).

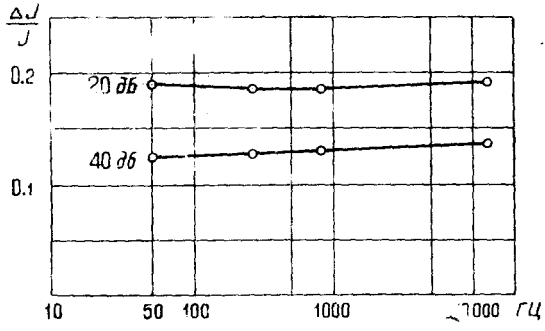

Рис. 3.

Данные Бекеши подтверждают данные Кнудсена и Рисса в том отношении, что для слабых звуков порог различения больше, чем для сильных. Объяснение этого явления было уже приведено выше.

Таким образом в результате ряда работ по определению прироста силы звука, соответствующего минимальному ощутимому приросту громкости, можно считать установленным следующее: 1) относительный прирост силы $\frac{\Delta I}{I}$ имеет наибольшее значение при самых слабых звуках (у порога слышимости), затем с увеличением силы звука уменьшается, а начиная с уровня 40—45 децибел остается неизменным; 2) относительный прирост при данном уровне над порогом одинаков для всех частот (противоположные результаты дает только работа Рисса); 3) интегрирование приростов не приводит к зависимости громкости от силы звука.

Хотя закон Вебера-Фехнера в его обычной формулировке, повидимому, неприменим к слуховым ощущениям, но замена силы звука ее логарифмом получила широкое распространение в тех случаях когда речь идет о восприятии звука. Это объясняется, во-первых, тем, что логарифмическая шкала значительно больше соответствует нашему суждению о громкости, нежели линейная, и, во-вторых, тем что обращение с логарифмами проще и нагляднее, чем с длин-

ными цифрами в огромном диапазоне порядка 10^{14}, выражающими силу звука.

Выражение силы звука в логарифмических единицах — децибелах (см стр. 647) — носит название уровня силы *.

III. Утомляемость слуха

Прежде чем перейти ко второму способу определения зависимости громкости от силы звука, надо коснуться вопроса об утомляемости слуха.

Явление состоит в том, что ощущение громкости звука находится в зависимости от предыдущего звукового раздражения. При воздействии громкого звука слуховой аппарат утомляется (адопти-

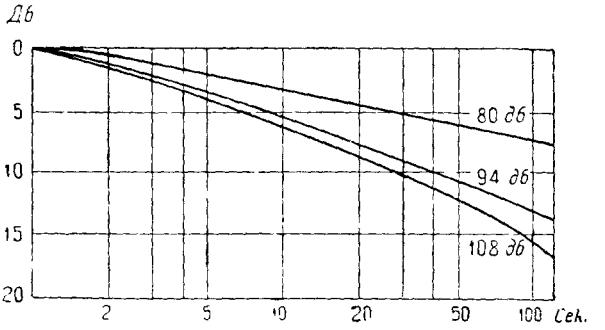

Рис. 4.

руется), и все воспринимаемые вновь звуки кажутся более тихими, чем в том случае, если бы предшествующего утомления не было.

Мы употребили выражение: „звуки кажутся более тихими". Но, по существу, поскольку громкость не может быть определена объективно, следует просто сказать, что громкость звуков при предшествующем утомлении уменьшается. Иными словами, громкость является функцией не только силы и частоты, но также и состояния слухового аппарата к моменту определения громкости. Поэтому когда мы говорим о зависимости громкости от силы и частоты, то всегда следует подразумевать, что речь идет о громкости для неутомленного уха.

Адоптация слуха была изучена Лазаревым [7] и наблюдаемые факты были объяснены с точки зрения ионной теории возбуждения.

В последнее время этот вопрос был подробно исследован Бекеши [8]. На рис. 4 приведена полученная им зависимость степени

* Приводим точное определение, предложенное Флетчером и принятое в 1933 г. комиссией по акустическим измерениям и терминологии Американской ассоциации стандартов. Уровень силы звука есть число децибел над некоторым условным уровнем, определяемым эффктивным давлением $P = 0{,}000204$ бара при 20° С и атмосферном давлении в 76 *см*. Этот уровень соответствует порогу слышимости синусоидального тона в 1000 герц.

утомления от времени действия утомляющего тона (800 герц) при звуках различной силы.

Опыт был произведен следующим образом: утомляющий тон частотою в 800 герц посредством наушного телефона подавался на одно ухо. Сейчас же после прекращения тона на другое ухо подавался тон сравнения — краткий звуковой импульс (0,2 сек.). Испытуемый давал показание, равна ли громкость импульса громкости утомляющего тона. Опыт повторялся с изменением силы тона сравнения до тех пор, пока испытуемый не давал положительного ответа на вопрос о равенстве громкостей. На рис. 4 по оси абсцисс отложено время действия утомляющего тона, а по оси ординат — разница между уровнями силы утомляющего тона и тона

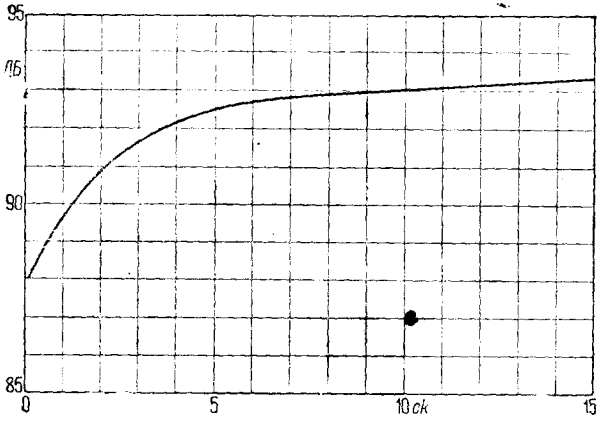

Рис. 5.

сравнения. Из чертежа ясно, что сила тона сравнения падает с увеличением времени утомления, а это значит, что уменьшается громкость самого утомляющего тона, сила которого остается неизменной. Верхняя кривая получена для утомляющего тона, имеющего уровень ощущения * 80, средняя — 94 и нижняя — 108 децибел (2, 10 и 50 бар). Таким образом мы видим, что с увеличением силы звука степень утомления непрерывно увеличивается.

После прекращения действия утомляющего тона ухо не сразу, а лишь постепенно возвращается в нормальное состояние. Как видно из рис. 5, где по оси абсцисс отложено время, прошедшее после прекращения длившегося 2 мин. тона в 800 герц, уровнем ощущения в 94 децибел, а по оси ординат — воспринимаемая громкость, выраженная через уровень ощущения тона сравнения, действие утомления можно считать (для данных условий) почти прекратившимся по прошествии 7—8 сек.

*. Уровнем ощущения называется выраженное в децибелах отношение силы данного звука к силе над порогом слышимости для той же частоты, т. е. уровень силы над порогом слышимости. Для тона в 1000 герц уровень ощущения совпадает с уровнем силы.

Действие утомления (адоптации) сильно сказывается при внезапном изменении силы длящегося звука. Воспринимаемое изменение громкости при этом значительно больше, чем это обусловливается разницей уровней силы звука до изменения и после изменения, т. е. чем в том случае, если сравнивать два звука, отделенных

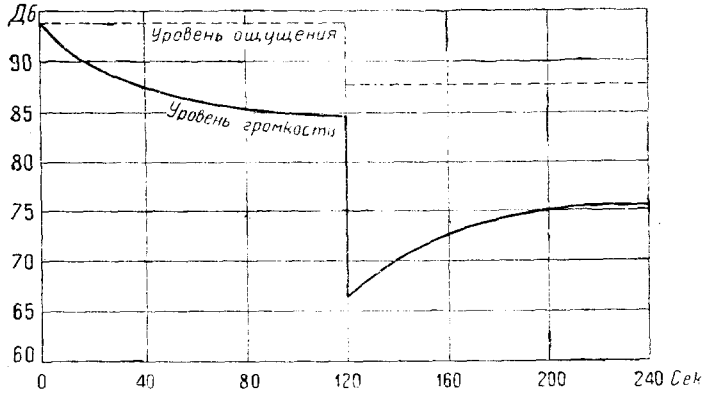

Рис. 6.

паузой. Подобный „эффект контраста" ясно виден на рис. 6 и 7 *.

По оси ординат отложен уровень ощущения утомляющего тона (пунктирная линия) и тона сравнения (сплошная линия)**. По прошествии 120 сек. от начала действия утомляющего тона (94 де-

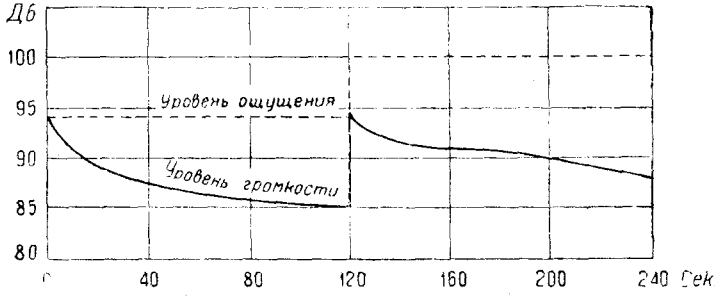

Рис. 7.

цибел, 800 герц) его амплитуда на рис. 6 уменьшается, а на рис. 7 увеличивается вдвое, т. е. уровень ощущения изменяется на 6 децибел. Наблюдаемое же изменение громкости (сплошная линия) соответствует значительно большему изменению уровня ощущения, особенно при уменьшении амплитуды.

* Рис. 6 и 7 составлены мною в несколько измененном виде, по сравнению с соответствующими рисунками Бекеши.

** Надписи на самих рисунках сделаны с применением терминов, объясненных в примечании на стр. 654.

Эффект контраста необходимо учитывать при выработке методики изучения громкости звука (см. стр. 661).

IV. Уровень громкости

Различная чувствительность уха к звукам различной частоты определяется кривой порога слышимости. Из этой кривой становится понятным, что при одинаковом уровне силы звуки не являются равногромкими. Однако на основании закона Вебера-Фехнера можно предположить, что звуки будут равногромкими при одинаковом уровне силы над порогом (т. е. при одинаковом уровне ощущения). Опыты Кингсбери доказали неосновательность такого пред-

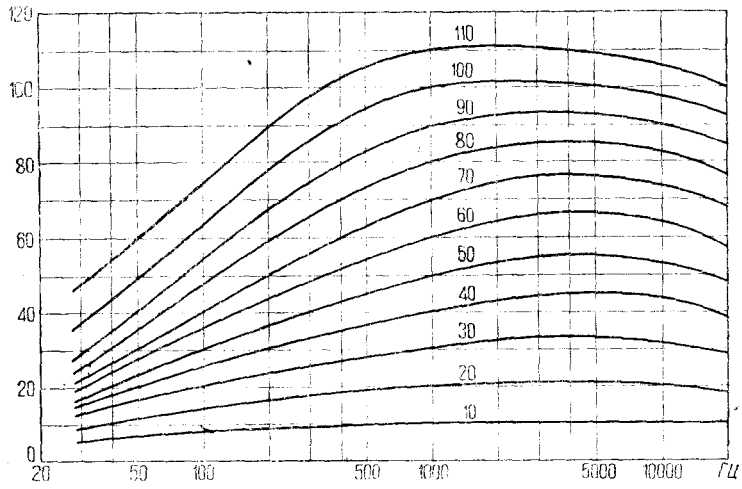

Рис. 8.

положения. Установленные Кингсбери [9] кривые равной громкости были проверены в недавнее время Флетчером и Мансоном [10]. Расхождения в результатах обоих исследований сравнительно невелики. Приводим (рис. 8) кривые Флетчера и Мансона, как основанные на более солидном экспериментальном материале.

По оси ординат отложен уровень ощущения звуков различных частот, равногромких по отношению к другим звукам на той же кривой. Принято приравнивать громкость звуков различных частот к громкости тона в 1000 герц. Таким образом можно сравнивать громкости каких-либо звуков, выразив каждый из них через уровень ощущения тона в 1000 герц. Выражение громкости какого-либо звука через уровень ощущения равногромкого тона в 1000 герц обозначается термином уровень громкости *.

* По определению Американской ассоциации стандартов уровень громкости какого-либо звука есть уровень силы равногромкого тона в 1000 герц. Как было сказано выше, для тона в 1000 герц уровень ощущения и уровень силы совпадают.

Уровень громкости определяет величину громкости, но не дает представления о характере изменения самой величины. Шкала децибел является функциональной, а не натуральной шкалой громкости *.

На нашем рисунке кривые равной громкости проведены через каждые 10 децибел, т. е. на уровнях громкости в 10, 20, 30 и т. д. децибел. Эти кривые теснее сходятся в области низких частот, идут почти параллельно и на наибольших расстояниях в области средних частот (от 1000 до 3000 герц) и снова несколько сходятся в области высоких частот. Отсюда можно заключить, что громкость звуков низких и крайних высоких частот при увеличении уровня ощущения нарастает быстрее, чем громкость звуков средних частот. Это наглядно представлено на рис. 9a и 9b, взятых из того же экспериментального исследования Флетчера и Мансона. По оси абсцисс отложен уровень силы, а по оси ординат — уровень громкости тонов различной частоты. Частота взята в качестве параметра и указана на самих рисунках.

Яновский [11] на основании экспериментальных кривых Кингсбери, а также на материале собственных наблюдений, дал формулу для приближенного вычисления уровня громкости по заданной частоте и эффективному давлению. Приводим эту формулу:

$$L = C \log \frac{P}{P_0},$$

где L — уровень громкости, P — эффективное давление, P_0 — эффективное давление, соответствующее порогу слышимости и, следовательно, являющееся функцией частоты, C — постоянная, являющаяся функцией частоты.

$$C = 19{,}9 + 10\,(3{,}1 - \lg F)^2,$$

$$\lg P_0 = (3{,}361 - \lg F)^2 - 3{,}63.$$

Кривые, построенные по указанной формуле, достаточно близки к наблюденным кривым равной громкости.

V. Суждение об изменении громкости

Оба указанных выше способа изучения громкости звука — способ определения минимальных ощутимых изменений и способ сравнения — дают, как уже было сказано, только косвенные указания на зависимость громкости звука от его силы и частоты.

Установление зависимости, т. е. установление натуральной шкалы громкости возможно, очевидно, лишь на основе непосредственной оценки испытуемыми.

Мысль о том, что человек в состоянии численно оценивать громкости, кажется на первый взгляд абсурдной. Однако ряд работ доказал полную возможность этого.

---

* Подобно тому, как, например, барометрическое давление является функциональной шкалой высоты над уровнем моря.

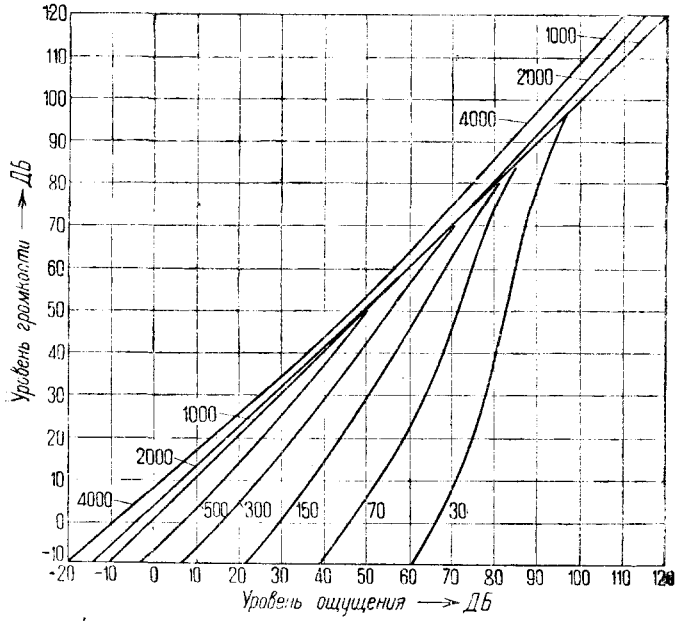
Уровень громкости → Дб
Уровень ощущения → Дб
1000
2000
4000
500
300
150
70
30

Рис. 9a.

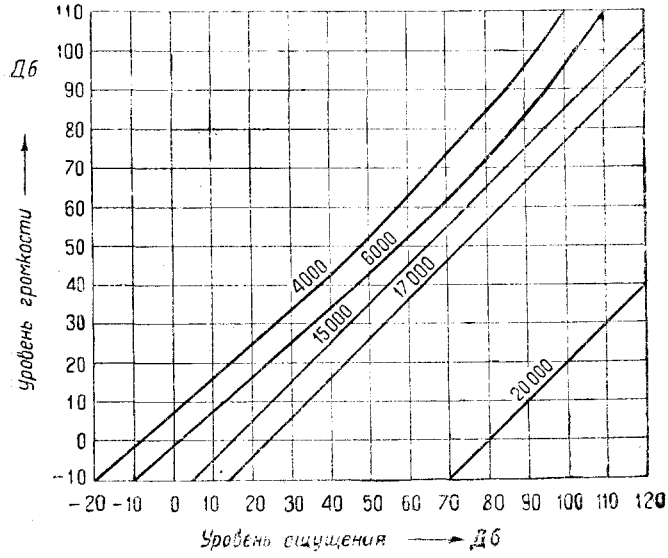
Дб
Уровень громкости →
Уровень ощущения → Дб
4000
6000
15000
17000
20000

Рис. 9b.

Впервые * поставили вопрос в такой плоскости Гэм и Паркинсон [12]. Авторы, давая испытуемому последовательно два звука той же частоты, но разной громкости, требовали определить в процентах громкость второго звука по отношению к первому. Однако такое задание оказалось слишком сложным для испытуемых, и авторы перешли к оценке легче воспринимаемых заданий, а именно: требовалось определить увеличение или уменьшение громкости вдвое, втрое и впятеро. При этом исходный звук сравнивался последовательно с 8—9 звуками различной громкости, среди которых испытуемому предоставлялось выбрать тот звук, громкость которого ближе всего подходила к заданному соотношению. Однако, и такую методику сравнения следует признать несколько сложной.

Лэйрд, Тейлор и Вилле [13] поступили проще. Они давали испытуемому исходный звук и затем после паузы сравниваемый, причем громкость последнего изменялась по указаниям испытуемого до тех пор, пока не устанавливалось правильное, с точки зрения испытуемого, соотношение по громкости. Авторы этой работы брали увеличение громкости в два раза и уменьшение ее в отношении $^3/_4$, $^1/_2$ и $^1/_4$.

Таким же, примерно, образом были проведены эксперименты и авторами третьей работы — Гейгером и Файрстоном [14], за тем исключением, что испытуемым было представлено самим подбирать громкость сравниваемого звука. Остроумное приспособление исключало при этом возможность какого-либо предвзятого подхода со стороны испытуемых. Гейгер и Файрстон заставляли испытуемых оценивать увеличение и уменьшение громкости в 2, 4, 10 и 100 раз. Результаты, полученные авторами указанных трех работ, хотя и разнятся между собою, но в основном схожи, и это позволяет сделать обобщающие заключения, имеющие практический и научный интерес.

Гэм и Паркинсон вывели на основании своих опытов следующее.

1. Человеку свойственно суждение об изменении громкости в некоторое число раз, но не свойственно суждение о громкости, как о величине, которую можно складывать или вычитать.

2. Громкость есть функция уровня силы звука, выражаемая приближенной формулой:

$$y = e^{0,076x},$$

где y — громкость звука, выраженная в условных единицах, и x — уровень ощущения. Эта зависимость изображена на рис. 10**.

3. Невозможно установить связь между суждением об изменении громкости и частотою, так как наблюденные отклонения лежат в пределах ошибок опыта.

---

* Указанная работа задержалась в редакции ж-ла Американского акустического общества и была напечатана после работы Лэйрда, Тейлора и Вилле.

** Гэм и Паркинсон вывели эту зависимость для уровней значительно выше порога слышимости. Поэтому нулевая точка по оси абсцисс рис. 10 соответствует не порогу слышимости, а произвольному уровню не ниже 35 децибел.

Лэйрд, Тейлор и Вилле не придали своим наблюдениям такую законченную форму, как авторы первой упомянутой статьи. Поэтому мне пришлось для сравнения с другими работами, на основе полученных ими данных, вывести приближенную кривую, которая вместе с выведенной таким же образом кривой по данным Гейгера и Файрстона, приведена на рис. 11 и 12.

Лэйрду, Тейлору и Вилле также не удалось обнаружить зависимости между изменением громкости и частотой, хотя они и проделали тщательные опыты с частотами в 64, 256, 1024 и 4096 герц. В этом отношении отличается работа Гейгера и Файрстона. Они взяли только две, но

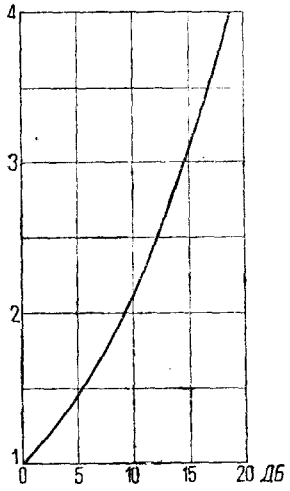

Рис. 10.

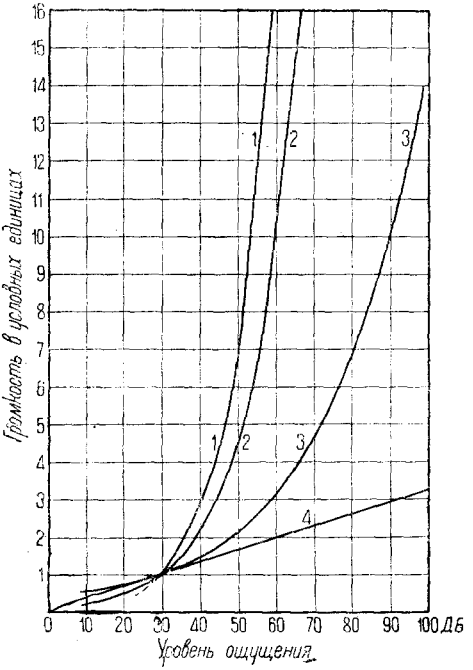

Рис. 11.

достаточно различных частоты — 1000 и 60 герц, чтобы таким образом проверить выведенную Кингсбери зависимость между частотою и скоростью нарастания громкости. Полученные ими результаты в общем* подтверждают эту зависимость: громкость тона в 60 герц возрастает быстрее, чем громкость тона в 1000 герц при одинаковом приросте силы звука. О значении этого наблюдения скажем ниже.

Переходя к сравнительному графику (рис. 11), мы видим, что все экспериментальные кривые отклоняются в одну и ту же сторону от закона Вебера-Фехнера. Кривые Гэма-Паркинсона (2) и Гейгера-Файрстона (1) почти совпадают между собой, кривая Лэйрда-Тейлора

* Для более точного сопоставления нет достаточного количества экспериментального материала.

Вилле (3) проходит несколько ниже. Во всяком случае можно сказать, что громкость нарастает значительно быстрее, чем это следует по закону Вебера-Фехнера (4).

Если громкость изобразить в логарифмическом маштабе (рис. 12), то кривые Гэма-Паркинсона и Лэйрда-Тейлора-Вилле обратятся в прямые.

В меньшей степени выровняется и первая кривая. Можно с известным приближением считать поэтому, что между логарифмом громкости и логарифмом силы звука существует в известном участке линейная зависимость.

В дальнейшем при разборе теории Флетчера и Мансона мы приведем аналитическое выражение этой зависимости.

Как мы уже говорили выше, только Гейгер и Файрстон установили зависимость изменения громкости от частоты при одном и том же изменении силы звука. Следует ли из этого, что данные остальных двух работ противоречат наблюденному сближению кривых равной громкости в области низких частот?

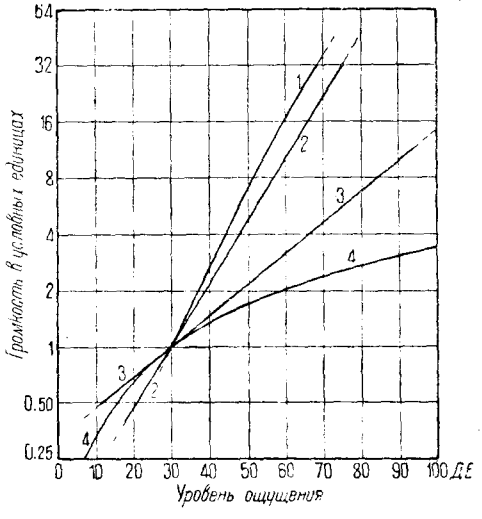

Рис. 12.

Для выяснения этого вопроса интересно ознакомиться с работой Рисса[15], который сопоставил данные Гэма-Паркинсона и Лэйрда-Тейлора-Вилле с собственными наблюдениями минимального ощутимого прироста громкости (см. стр. 648). Суммируя относительные приросты $\left(\frac{\Delta I}{I}\right)$, величина которых меняется при изменении силы звука, и предполагая, что для одной и той же частоты громкость пропорциональна количеству относительных приростов (или, по терминологии Рисса, различимых ступеней) над порогом слышимости, Рисс вывел зависимость громкости от силы звука, приведенную на рис. 13 *.

Подобно Гэму-Паркинсону и Лэйрду-Тейлору-Вилле, Рисс находит, что увеличение или уменьшение громкости при изменении силы звука происходит по одинаковому закону при всех частотах. Однако между указанными двумя работами и работой Рисса существует принципиальная разница. Зависимость, выведенная Гэ-

* Кривая построена мною на основе данных Рисса.

мом и Паркинсоном, как и зависимость, выведенная Лэйрдом-Тейлором и Вилле, выражаются в логарифмическом масштабе громкости прямой линией, — это значит, что при данном изменении

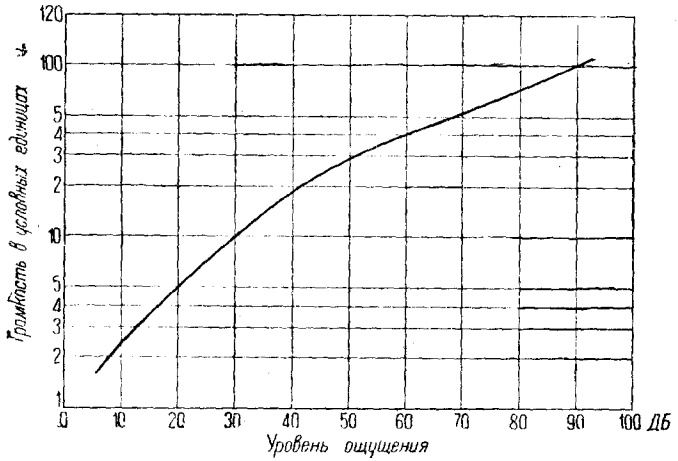

Рис. 13.

уровня силы звука громкость изменится в одинаковое число раз, каков бы ни был исходный уровень ощущения. Зависимость же, выведенная Риссом, выражается кривой, наклон которой уменьшается по мере возрастания уровня ощущения. Следовательно, по данным Рисса громкость тихих звуков растет быстрее, чем звуков громких при одинаковом увеличении уровня ощущения.

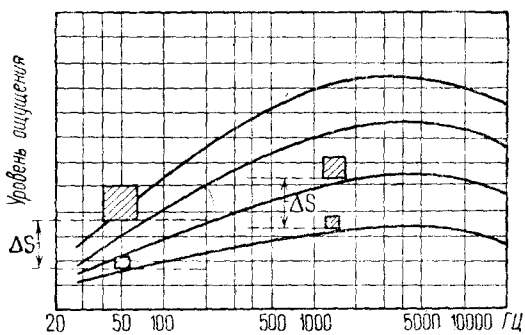

Рис. 14.

Совершенно понятно, что установление линейности зависимости между логарифмом громкости и уровнем ощущения, одинаковой для всех частот, противоречит различию скорости нарастания громкости высоких и низких звуков. Установление же зависимости нелинейной, хотя и одинаковой для всех частот, как раз означает неодинаковую скорость нарастания громкости звуков различной частоты, так как звуки равногромкие имеют разный уровень ощущения. Схематический рис. 14 поясняет сказанное.

Площади квадратиков символизируют величину громкости. Два равногромких звука при одном и том же приросте уровня ощуще-

ния S изменились по громкости в различной степени: больше возросла громкость низкого звука. Произошло это вследствие того, что низкий звук, равногромкий высокому, имел меньший уровень ощущения, а согласно кривой Рисса на меньшем уровне ощущения громкость при одном и том же приросте уровня ощущения возрастает быстрее.

Концепция Рисса, которую мы частично только что рассмотрели, взятая в целом, отличается некоторой сложностью и не может претендовать на удовлетворительное объяснение вопроса изменения громкости. Рисс считает, что его результаты сходятся с опытными данными Лэйрда, Тейлора и Вилле. Однако совпадение более или менее удовлетворительно лишь при оценке изменения громкости вдвое.

Причины расхождения между результатами трех работ, изучающих непосредственное суждение о громкости звука, следует искать в различии методики экспериментов, главным образом в той части, которая связана с утомляемостью уха. При утомлении появляется эффект контраста, который заключается в том, что суждение об изменении громкости становится *преувеличенным* по сравнению с суждением неутомленного уха. Таким образом суждение, например, об увеличении громкости вдвое при длительном исходном звуке или отсутствии достаточной паузы между исходными и сравниваемым звуками наступает при меньшем приросте силы звука, чем в том случае, если бы были обеспечены условия сравнения без утомления — краткий исходный звук и соответствующая пауза.

Если еще принять во внимание, что при одинаковом утомлении эффект контраста значительней при уменьшении силы звука (рис. 6 и 7), чем при ее увеличении, то можно легко понять, что отсутствие учета утомляемости уха при выработке методики эксперимента должно повлечь за собою, как это показано в работе Ржевкина и Рабиновича *, очень существенные расхождения в полученных результатах.

Резюмируя все сказанное выше, приходим к следующим выводам:

1. Возможно уверенное суждение об изменении громкости в некоторое небольшое число раз (в 2, 3, 4).

2. Изменение громкости в определенное число раз соответствует определенному (приблизительно) изменению уровня силы, одинаковому для всякого исходного уровня.

3. Изменение уровня силы звука, соответствующее данному изменению громкости, меньше, чем это следует из закона Вебера-Фехнера.

4. Зависимость изменения громкости от частоты пока еще окончательно не установлена; однако, учитывая работы по сравнению громкости звуков различной частоты (кривые Кингсбери и Флетчера-Мансона), надо полагать, что такая зависимость существует.

---

* Работа находится в печати.

VI. Громкость сложного звука

Говоря о зависимости громкости звука от силы и частоты, мы имели в виду пока только громкость простых синусоидальных тонов. Опыт показывает, что громкость сложного звука определяется не только силой и частотой его компонент, но и некоторыми привходящими факторами, зависящими от соотношения между отдельными компонентами. Эти привходящие факторы суть взаимная маскировка и биения. Не описывая достаточно известных [16] явлений максировки и биений, мы займемся лишь связью между этими явлениями и громкостью звука.

Если один звук полностью маскирует одновременно звучащий другой, то, очевидно, громкость замаскированного звука будет равна нулю. Если же более слабый звук едва слышен на фоне более сильного, то громкость первого будет очень мала, во всяком случае меньше, чем если бы он не был частично замаскирован (Яновский [11]).

Степень маскировки есть некоторая функция разницы частот двух тонов. При достаточном отдалении по высоте маскировка не имеет места, и, следовательно, громкость каждого из тонов остается неизменной; при сближении же тонов наступает маскировка, и громкость маскируемого звука постепенно убывает, — такую мысль развивают Флетчер и Мансон [10].

Однако в этом вопросе многое остается пока неясным и не проверенным на опыте. Во-первых, убывание громкости при маскировке не может быть проверено способом сравнения с эталонной громкостью, так как сравнивать мы можем только громкость всего комплекса звуков, а не отдельных его компонент.

Во-вторых, если допустить постепенное убывание громкости при маскировке, то из этого следует, что присутствие маскирующего тона влияет не только на степень громкости, но и на скорость изменения громкости при изменении силы звука. Для примера возьмем два звука с частотою F_1 и F_2 и уровнями ощущения S_1 и S_2 децибел и предположим, что их частоты и уровень ощущения таковы, что первый, более низкий звук, полностью маскирует второй. Увеличивая постепенно S_2, мы добьемся того, что звуки станут равногромкими. Пусть это произойдет при уровне S_2' децибел. По предположению при уровне S_2 громкость второго звука была равна нулю, при уровне же S_2' децибел она достигла такой величины, какой была бы при этом уровне и без маскирующего тона, так как маскирующее действие низкого тона прекратилось. Следовательно, изменение уровня ощущения на $(S_2' - S_2)$ децибел произвело такое же изменение громкости в присутствии маскирующего тона, какое произвело бы изменение на $(S_2' - O)$ децибел при отсутствии его.

В-третьих, экспериментально не выяснено, не изменяется ли громкость маскирующего тона при полной маскировке, иными словами, не увеличивают ли замаскированные звуки громкости

всего комплекса, воспринимаемого в данном случае, как один только маскирующий тон.

Влияние биений на громкость звука сказывается в периодическом изменении ее при биениях. При малой частоте биений колебания громкости слышны вполне отчетливо, при большой частоте воспринимаются как шероховатость звука. И в том и в другом случае они вносят в восприятие громкости некоторый новый элемент, который не оценивается количественно.

Громкость сложного звука была экспериментально изучена Яновским [11], а затем Флетчером и Мансоном [10]. Однако, полученные результаты обеих работ значительно расходятся между собой. По Яновскому максимальная громкость двузвучия получается при сложении двух тонов одинаковой или близкой высоты. Если тоны равногромкие, то уровень громкости при этом увеличивается на величину от 6 до 11 децибел. При увеличении разницы по высоте между тонами громкость комплекса постепенно уменьшается, и при большом удалении прирост уровня громкости едва достигает 1 децибела. По Флетчеру и Мансону выходит, как это мы увидим из дальнейшего изложения, как раз наоборот, т. е. максимальная громкость двузвучия будет достигнута при наибольшем отдалении компонент по высоте.

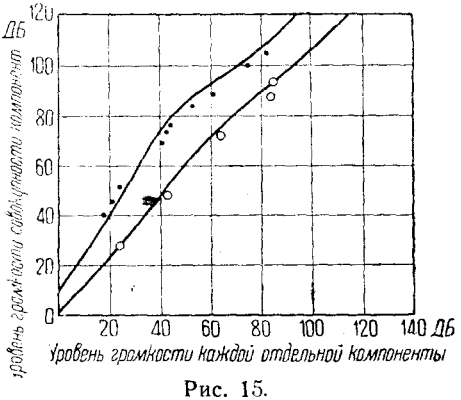

Рис. 15.

Результаты, полученные Флетчером и Мансоном для громкости совокупности нескольких тонов, достаточно отдаленных друг от друга по высоте, чтобы не было влияния маскировки и биений, даны на рис. 15. Верхняя кривая относится к совокупности 10 равногромких компонент, нижняя — 2 равногромких компонент. Для удобства изучения Флетчер и Мансон взяли совокупность тонов одинаковой громкости, что было установлено путем сравнения каждой компоненты в отдельности с тоном в 1000 герц.

Для изучения влияния маскировки на громкость сложного звука Флетчер и Мансон произвели другую серию опытов, результаты которых даны на рис. 16. Разница по частоте ΔF между каждыми двумя соседними компонентами была установлена постоянной. Звук состоял из 10 равногромких компонент, причем частота самой низкой компоненты была 1000 герц. Первая кривая сверху была получена для $\Delta F = 340$ герц, вторая — для $\Delta F = 230$ герц, третья для $\Delta F = 112$ герц и четвертая — для $\Delta F = 50$ герц.

Из описанных опытов можно вывести следующие два заключения:

1. Громкость сложного звука возрастает с увеличением числа компонент*.

2. Сближение компонент по высоте влечет постепенное уменьшение громкости сложного звука.

Последний вывод косвенным образом подтверждает высказанное Флетчером и Мансоном положение о постепенном убывании громкости маскируемого звука. Мы говорим „косвенным образом", так как, чтобы перейти от описанных опытов к этому положению, нужно предварительно предположить, что громкости присуще аддитивное свойство (см. ниже).

VII. Теория громкости

Теоретическое обоснование экспериментально установленной зависимости громкости от силы звука и частоты (а для сложного звука от силы и частоты его компонент) давалось в той или иной мере авторами исследований, но не в виде стройной теории, а лишь в виде отдельных замечаний и предположений. В то же время для систематизации всего материала очень важным является объяснение физического и физиологического механизма восприятия громкости.

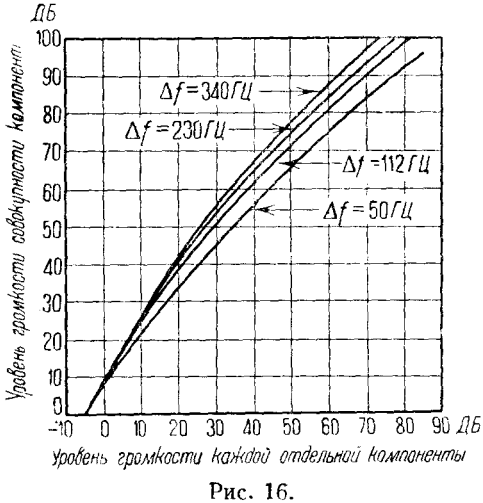

Рис. 16.

В этом отношении наибольшего внимания заслуживает неоднократно цитированная нами выше статья Флетчера и Мансона [10], в которой впервые сделана попытка дать законченную теорию громкости звука. Авторы развивают следующую гипотезу **: громкость звука пропорциональна количеству нервных импульсов, проходящих через слуховой нерв к мозгу в единицу времени. Громкости присуще а д д и т и в н о е свойство; иными словами, при одновременном восприятии нескольких звуков громкость всего комплекса равна сумме громкостей компонент.

Исходя из этой гипотезы, становится возможным для изучения характера изменения громкости при изменении силы звука восполь-

* Интересно отметить, что в результате сложения нескольких звуков, лежащих ниже порога слышимости, может возникнуть звук слышимый, т. е. лежащий выше порога.

** Частично эта гипотеза была уже высказана Флетчером в одной из его предшествующих работ.

зоваться не только непосредственным суждением о громкости, но также и измерением громкости сложных звуков.

Рис. 15 (см. выше) дает нам экспериментально установленное соотношение между уровнем громкости сложного комплекса из нескольких (2 и 10) равногромких звуков и уровнем громкости каждого из них в отдельности. Соотношение же между громкостью комплекса и громкостью отдельной компоненты устанавливается основной гипотезой. Отсюда уже сравнительно нетрудно установить зависимость громкости от уровня громкости, т. е. в конечном счете от частоты и силы звука.

Обозначая через N число, пропорциональное количеству нервных импульсов, проходящих через слуховой нерв в единицу времени, т. е. громкость звука в условных единицах, можем написать:

$$N = G\ (L),$$

где G есть некоторая функция от уровня громкости L.

Зависимость же уровня громкости от силы и частоты звука дается кривыми равной громкости (рис. 8). Верхняя кривая рис. 15 относится к сложному звуку, состоящему из 10 равногромких компонент, нижняя — из 2 равногромких компонент. Здесь мы будем иметь следующие зависимости:

$$G(L) = 10G(L_k),$$
$$G(L) = 2G(L_k),$$

где L — уровень громкости всего комплекса и L_k — уровень громкости каждой отдельной компоненты.

Выведенная на основе этих экспериментов зависимость громкости от уровня громкости дана на рис. 17. Громкость отложена в условных единицах в логарифмическом масштабе. Эта кривая очень близка к кривой, данной Гэмом и Паркинсоном (рис. 12, 2), а также к кривой, выведенной нами на основе наблюдений Гейгера и Файрстона (12, 1). В участке от 40 до 100 децибел зависимость между логарифмом громкости и уровнем громкости близка к линейной.

Громкость сложного звука по Флетчеру и Мансону определяется формулой:

$$N = \sum_{k=1}^{k=n} b_k G(L_k),$$

где n — число компонент, L_k — уровень громкости отдельной компоненты и b_k — коэфициент, указывающий уменьшение громкости компоненты вследствие маскировки другими компонентами.

Делая ряд допущений, упрощающих задачу, авторы в конце концов приходят к довольно сложной формуле для b_k, которую мы приводим:

$$b_k = [(250 + F_k - F_m)\,1000]\ 10^{(L_k - L_m)T}\, Q\,(\zeta_k + 30 \log F_k - 95),$$

где F_k — частота данной компоненты сложного звука, F_m — частота

маскирующей компоненты, L_k и L_m — соответствующие уровни громкости, T — степень маскировки, данная графически на основе экспериментальных данных, Q — некоторая функция от F_k и F_m, данная графически на основе экспериментальных данных, b_k — уровень силы данной компоненты.

В основу этой формулы положены следующие предположения:

1. Если компоненты далеки друг от друга по высоте, то маскирующего действия нет и $b_k = 1$.

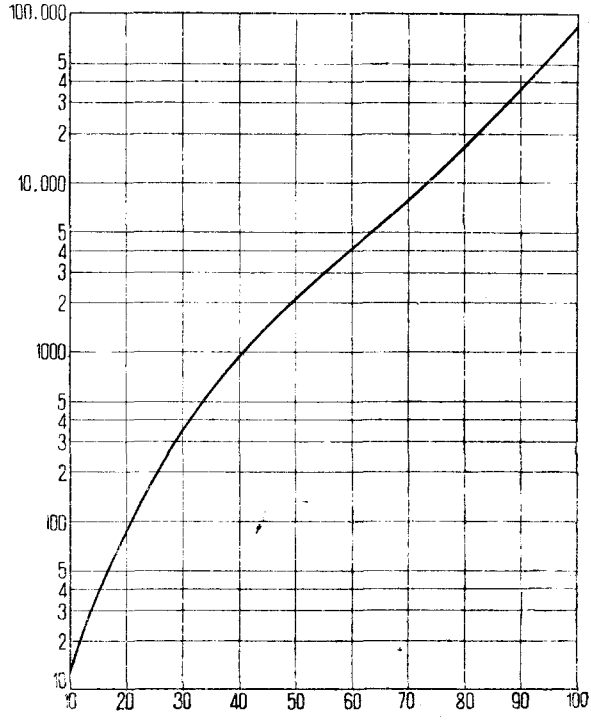

Рис. 17.

2. Если компоненты близки по частоте, то

а) нижняя компонента маскирует верхнюю (т. е. маскирующее действие учитывается только по отношению к более высоким звукам);

б) только одна ближайшая нижняя компонента оказывает маскирующее действие на данную компоненту; действием всех остальных пренебрегается;

в) степень маскировки пропорциональна разности частот компонент.

3. Если компоненты весьма близки по частоте, то надо говорить не о сложении громкостей и маскировке, а о сложении энергий.

Таким образом при учете громкости сложного звука энергии группы весьма близких компонент суммируются, и эта группа считается одной компонентой. Понятие „весьма близких" компонент было найдено из опыта.

Для частот меньших 2000 герц весьма близкими можно считать компоненты в полосе 100 герц, для частот от 2000 до 4000 герц — в полосе 200 герц, для частот от 4000 до 8000 герц — в полосе 400 герц, и для частот больших 8000 герц — в полосе 800 герц.

Расчеты громкости сложного звука, произведенные Флетчером и Мансоном по выведенной выше формуле, очень близко совпали с наблюденными величинами.

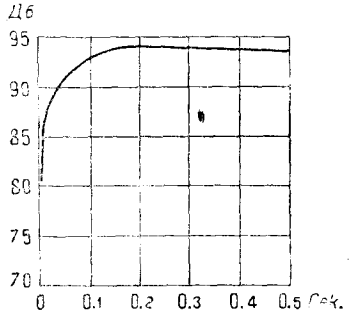

Рис. 18.

VIII. Громкость весьма кратких звуков

Этот вопрос пришлось выделить и поместить в конце по той причине, что для его понимания необходимо предварительное ознакомление со всем изложенным выше материалом. Бекеши[8] сравнивал громкость весьма краткого звука (начиная от сотых долей секунды) с громкостью контрольного звукового импульса той же частоты длительностью в 0,2 сек. и определил, что с увеличением длительности

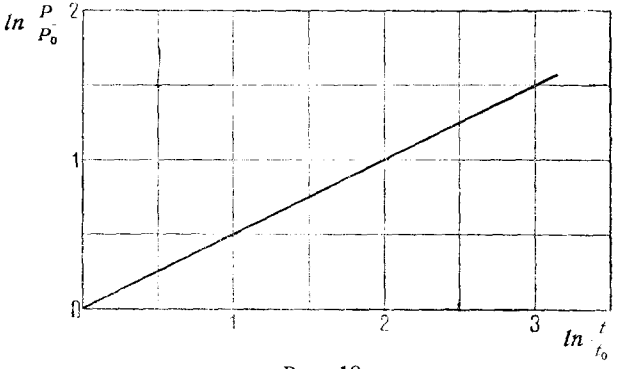

Рис. 19.

весьма краткого звука его громкость возрастает до тех пор, пока не достигнет полной (определяемой силой и частотой данного тона) громкости.

На рис. 18, где по оси абсцисс отложена длительность изучаемого тона, а по оси ординат — уровень ощущения контрольного импульса, изображена экспериментально определенная Бекеши зависимость. Полученный результат в то же время обозначает, что

громкость всякого звука не сразу, а лишь постепенно достигает своей полной величины (после чего снова начинает уменьшаться под влиянием утомления — см. стр. 651). Такой характер явления наблюдается независимо от частоты тона.

В другой своей работе Бекеши [5], исследуя тот же вопрос, установил точную зависимость между длительностью и громкостью весьма краткого звука. Она приведена на рис. 19, где по оси ординат отложен логарифм отношения эффективного давления весьма краткого звука P к эффективному давлению равногромкого контрольного импульса P_0, а по оси абсцисс — логарифм отношения длительности контрольного импульса t_0 к длительности весьма краткого звука t.

Из чертежа следует:

$$2 \lg \frac{P}{P_0} = \lg \frac{t_0}{t}, \tag{1}$$

откуда

$$\left(\frac{P}{P_0}\right)^2 = \frac{t_0}{t} = \frac{I}{I_0},$$

где I и I_0 — соответствующая сила звука, следовательно,

$$It = I_0 t_0. \tag{2}$$

Из этого соотношения можно вывести предположение, что громкость весьма краткого звука определяется произведением силы звука на продолжительность звучания, т. е. величиной полной звуковой энергии.

Интересно отметить, что подобная зависимость, сходная с законом фотохимического действия, уже давно установлена для кратких зрительных ощущений.

Для удобства определения уровня громкости весьма краткого звука при заданном уровне громкости такого же длительного звука формуле (1) можно придать несколько иной вид:

$$20 \lg_{10} \frac{P}{p} = 20 \lg_{10} \frac{P_0}{p} + 10 \lg_{10} \frac{t_0}{t},$$

где p — пороговое значение эффективного давления для данной частоты. Подставляя вместо $20 \lg_{10} \frac{P}{p}$ и $20 \lg \frac{P_0}{p}$ соответствующие уровня ощущения, получим:

$$S = S_0 + 10 \lg_{10} \frac{t_0}{t}.$$

Вполне понятно, что если уровень ощущения весьма краткого звука S на $10 \lg_{10} \frac{t_0}{t}$ больше уровня ощущения равногромкого контрольного импульса S_0, то при равном уровне ощущения весьма краткий звук будет иметь уровень громкости L на ту же величину

$\left(\text{т. е. на } 10\lg_{10}\frac{t_0}{t}\right)$ меньший, чем уровень громкости контрольного импульса L_0, т. е.

$$L_0 = L + 10\lg_{10}\frac{t_0}{t}. \qquad (3)$$

В опытах Бекеши $t_0 = 0{,}1$ сек.

Та же зависимость была получена Штойделем [18]. На рис. 20 даны кривые, выведенные им на основе большой экспериментальной работы. По оси абсцисс отложена длительность весьма краткого звука, по оси ординат — уровень ощущения контрольного импульса. Кривые соответствуют уровням ощущения весьма краткого звука в 92, 82 и 72 децибел. Полная громкость достигается уже при длительности звука в 0,1—0,15 сек. (по Бекеши при 0,20 сек., рис. 18). Формула (3), вытекающая из кривых Бекеши, вполне удовлетворяет и кривым Штойделя.

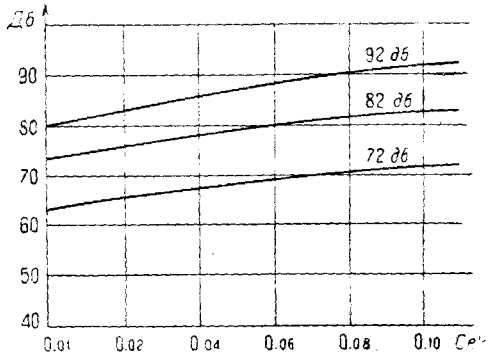

Рис. 20.

Несколько иной вид имеет зависимость, выведенная Лифшицем [19]. Он изучал громкость кратких звуков, состоящих из серии щелчков, следующих друг за другом с определенной частотой, и установил следующее:

$$L = L_a + 10\lg_{10} N,$$

где L — уровень громкости серии, L_a — уровень громкости отдельного щелчка и N — число щелчков в серии. Принимая во внимание, что $N = \frac{t_0}{t_a}$, где t_0 — длительность серии и t_a — длительность щелчка (точнее промежуток времени от одного щелчка до другого), можно придать приведенной формуле вид, чрезвычайно напоминающий формулу Бекеши (3):

$$L_0 = L_a + 10\lg\frac{t_0}{t_a}. \qquad (4)$$

Частота следования щелчков не влияет на суммарную громкость серии, важно лишь количество щелчков, воспринятых ухом (конечно, при неизменной силе щелчков). Иными словами, ухо интегрирует энергию единичных импульсов всей серии.

Переходя от щелчков к кратким звукам, сила которых I явля-

ется непрерывной функцией от t, Лифшиц придал наблюденной им зависимости такой окончательный вид:

$$L = \lg \int_{t_1}^{t_2} I\, dt. \qquad (5)$$

Если рассматривать пороговое значение звука как нулевую громкость, то, очевидно, и в этом случае при значительном уменьшении продолжительности звучания будет иметь место увеличение силы звука для сохранения неизменной громкости (т. е. порога слышимости).

Экспериментальная работа Беликова [20] по этому вопросу подтвердила зависимость, установленную Лазаревым на основе предложенной им ионной теории возбуждения:

$$It = a + bt,$$

где I — сила звука у порога слышимости, t — время звучания, a и b — постоянные величины.

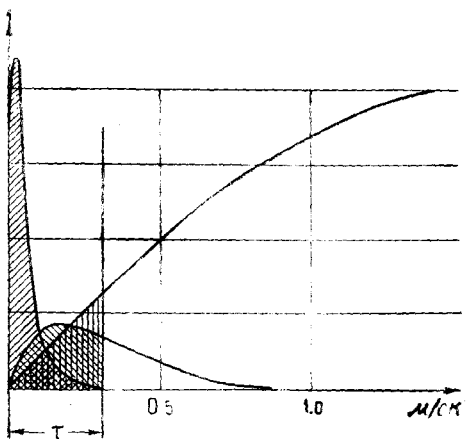

Рис. 21.

Громкость щелчка была изучена Штойделем [18] в упомянутом выше исследовании. Он установил, что громкость щелчка зависит от его формы, т. е. от формы нарастания и спадания звукового давления при щелчке, и сформулировал свои наблюдения следующим образом: человеческое ухо реагирует только на изменение давления, интегрируя эффективное давление по времени в течение очень краткого промежутка времени $\tau = 0{,}3$ миллисекунды.

На рис. 21 даны три равногромких щелчка различной формы.

Это положение Штойдель переносит на все звуки вообще, считая, что в течение каждого колебания ухо интегрирует изменения давления за промежуток времени τ, причем:

1) если $\tau < T$ (период колебания), то начало интегрируемого участка кривой устанавливается таким образом, чтобы интеграл был наибольшим (рис. 22);

2) если $\tau > T$, т. е. если в течение интегрируемого промежутка произойдет несколько колебаний, то ухо интегрирует только одно полное колебание (рис. 22).

Нетрудно убедиться, что при увеличении частоты до 2000—3000 герц интеграл будет возрастать, после чего начнет убывать. Это примерно соответствует кривой чувствительности уха. Штойдель считает, что выведенное им положение относится к уровня от 50 до 100 децибел.

IX. Измерение громкости

Измерение громкости, как это понимается в настоящее время, сводится лишь к определению уровня громкости, т. е. к сравнению громкости данного звука с громкостью синусоидального тона в 1000 герц. Как было сказано выше (см. примеч. на стр. 652 и 654), для синусоидального тона в 1000 герц величины уровня громкости, уровня ощущения и уровня силы совпадают. Таким образом, сравнивая какую-либо громкость с громкостью тона в 1000 герц, мы получаем выражение этой громкости в децибелах через уровень силы тона в 1000 герц — это есть нормальная шкала уровня громкости, принятая во всех странах. Для установления нормальной шкалы громкости и измерения громкости чистых тонов применяется схема (рис. 23), состоящая из двух генераторов, двух

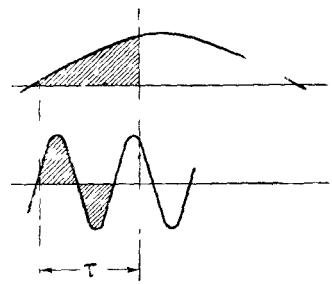

Рис. 22.

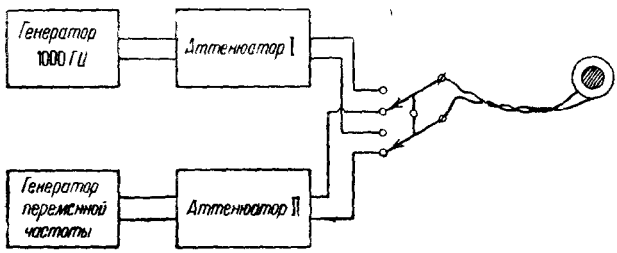

Рис. 23.

аттенюаторов и телефонной трубки. Аттенюатор (А. Гунд[21]) представляет собою прибор, дающий любое заданное ослабление силы звука при неизменном волновом сопротивлении (обычно 600 Ω чисто омического сопротивления). На рис. 24 приведена схема аттенюатора, состоящего из отдельных звеньев, включаемых попеременно специальным трехполюсным переключателем (в точках *A* и *B*). Каждое звено дает ослабление на определенное число децибел. Аттенюатор, дающий полное ослабление на 100 децибел через один децибел, состоит из 19 звеньев. Первая группа из 9 звеньев дает ослабления от 1 до 9 децибел, вторая группа из 10 звеньев—ослабления от 10 до 100 децибел. Включая после-

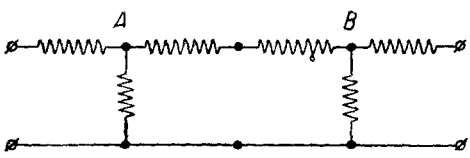

Рис. 24.

*

довательно два звена, по одному из каждой группы, можно получить любое заданное ослабление.

Для установления уровня громкости нужно экспериментально определить, какое положение переключателей аттенюатора I соответствует порогу слышимости для нормального слуха при данной мощности генератора.

Измерения с аттенюатором наталкиваются на принципиальную трудность, заключающуюся в зависимости сопротивления телефона от частоты. Чтобы избежать этой трудности, обычно включают на выходе аттенюатора сопротивление, равное волновому сопротивлению аттенюатора, делая от малой части его отвод тока к телефону. Таким образом сопротивление на выходе остается практически постоянным. В приведенной схеме, однако, происходит большая потеря мощности. Этого недостатка лишена схема (рис. 25), предложенная С. Ржевкиным*. Схема состоит из параллельной комбинации сопротивления R и емкости C, включаемой в цепь телефона. Можно подобрать такие значения R и C, что общее сопротивление будет практически постоянным и независимым от частоты, притом чисто омическим. Трансформатор U приводит сопротивление к величине волнового сопротивления аттенюатора.

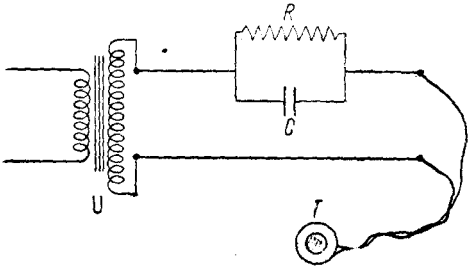

Рис. 25.

Измерение громкости звука, идущего извне, производится при помощи фонометра, иногда называемого также аудиометром. Фонометр представляет собой электроакустический прибор, дающий звук неизменной частоты и тембра и переменной громкости. Шкала фонометра указывает уровень громкости в децибелах и отградуирована обычно через один или через два децибела в диапазоне от 0 до 100 децибел.

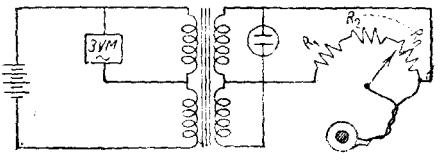

Рис. 26.

Фонометр в основном состоит из трех частей: источника звука, потенциометра и телефонной трубки. В качестве источника звука применяется обычно зуммер, или камертон с прерывателем, реже ламповый генератор, так как желательно, чтобы фонометр был портативным. На рис. 26 приведена принципиальная схема фонометра Баркгаузена. Фонометр градуируется по нормальной шкале громко-

* Работа готовится к печати.

сти. На рис. 27 для примера приведена кривая (верхняя линия) градуировки очень распространенного в Америке аудиометра 3-А, дающего шумовой тон, по тембру близкий к речи. По оси абсцисс отложены ступени аудиометра, по оси ординат — уровень громкости. Для сравнения на этом же рисунке приведена кривая (нижняя линия) зависимости уровня громкости от уровня ощущения для речи. Телефонная трубка фонометра устроена таким образом, чтобы при прижатии к уху между нею и ушной раковиной оставалась небольшая щель, в которую может проникать поступающий извне измеряемый звук. Методика работы с фонометром состоит в следующем: прикладывая плотно телефон к одному уху и закрывая другое, изменяют громкость звука фонометра до тех пор, пока не наступает впечатление равенства громкостей. Очень часто бывает затруднительным установить на фонометре равную громкость, но сравнительно легко установить большую или меньшую громкость. Тогда громкость определяемого звука можно установить путем интерполяции между двумя показаниями фонометра, из которых одно чуть громче, а другое чуть тише определяемого звука. Можно также пользоваться методом маскировки. Громкость звука фонометра меняется до тех пор, пока она установится на грани маскировки измеряемым звуком, т. е. до момента, когда звук фонометра будет едва слышен на фоне измеряемого звука. Показания шкалы фонометра при этом методе дают так называемую замаскированную громкость. Для установления громкости измеряемого звука нужно, следовательно, иметь определяемую экспериментально переходную шкалу.

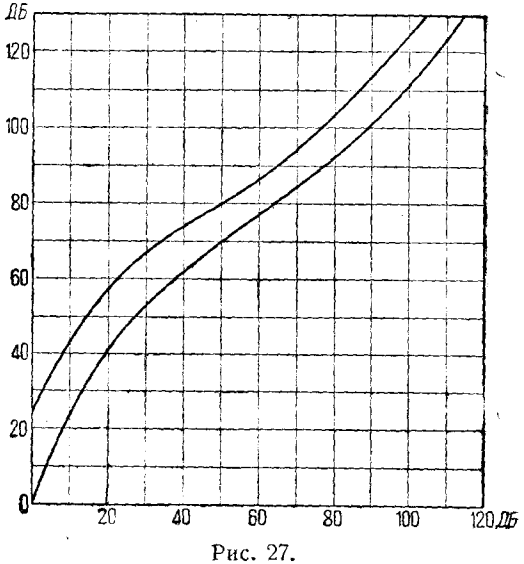

Рис. 27.

Степень точности фонометрических измерений изучалась японскими авторами Обата и Морита[22] на шуме метрополитена в Токио. Они пришли к следующим выводам:

1. Для правильного измерения громкости шума нужно приобрести известный опыт. 2. Для увеличения точности измерения нужно напрактиковаться именно на данном шуме. 3. Вероятная ошибка наблюдения (среднее отклонение от полученных средних) составляет для опытных наблюдателей меньше 1,5 децибела.

Как можно заключить из работы Обата и Морита, точность фонометрического измерения достаточно высока.

Громкость звука можно измерять также при помощи камертона, снабженного механическим молоточком, всегда дающим удар одинаковой силы по камертону. Этот метод описан Дэвисом[23] и усовершенствован Стовелем[24]. Желая измерить громкость какого-либо звука (при помощи камертона можно измерять только звуки, поступающие извне к обоим ушам), возбуждают камертон и подносят его как можно ближе к уху. Одновременно с ударом по камертону пускают в ход секундомер, останавливая его в тот момент, когда звук камертона, затихая, начинает маскироваться измеряемым звуком. Если затухание камертона предварительно измерено, то по времени, прошедшему от начала звучания камертона до момента маскирования, можно судить об уровне громкости измеряемого звука. В приборе, сконструированном Стовелем, секундомер укреплен на самом приборе и начинает автоматически работать в момент удара.

В заключение упомянем о сконструированном Штойделем „автоматическим фонометре", который производит определение громкости без участия человеческого уха. Прибор построен на уже изложенном выше принципе суммирования эффективного давления за краткий промежуток времени (см. стр. 670). Если судить по опытам самого Штойделя, показания его прибора очень близки к средним показаниям испытуемых. Ввиду большой сложности прибора его описания мы в настоящей статье не приводим.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. Riess, Phys. Rev. **31**, 867, 1928.
2. V. Knudsen, Phys. Rev. **21**, 84, 1923.
3. П. Лазарев, Изв. физ. ин. **1**, 3, 1920.
4. G. v. Békésy, Ann. d. Phys. **7**, 3, 1930.
5. G. v. Békésy, Phys. Ztschr. **30**, 721, 1929.
6. Proposed, Standards for Noise Meusurement, J. Ac. Soc. **5**, N. **2**, 1933.
7. П. Лазарев, Изв. физ. ин. **1**, 1, 5, 1920.
8. G. V. Békésy, Phys. Ztschr. **30**, 115, 1929.
9. B. Kingsbury, Phys. Rev. **29**, 588, 1927.
10. H. Fletcher and W. Munson, J. Ac. Soc. **5**, N. 2, 1933.
11. W. Janovsky, Ztschr. tech. Phys. N. **12**, 1931, русск. пер. П. Белякова Успехи физики, Физические проблемы звукового кино, ГТТИ, 1932.
12. L. Ham and I. Parkinson, Journ. Ac. Soc. **3**, N. 4, 1932.
13. L. Laird, E. Taylor and H. Wille, Journ. Ac. Soc. **3**, N. 3, 1932.
14. P. Geiger and F. Firestone, Journ. Ac. Soc. **5**, N. 1, 1933.
15. R. Riess, Journ. Ac. Soc. **4**, N. 3, 1933.
16. С. Ржевкин, Слух и речь в свете современных физических исследований, ГИЗ, 1928.
17. H. Fletcher, Journ. Ac. Soc. **1**, 311, 1930 (русск. пер. С. Ржевкина, Усп. физич. наук **11**, 6, 1931).
18. N. Steudel, Roch. u. El. **41**, N. 4, 1933.
19. L. Leifschitz, Journ. Ac. Soc. **5**, N. 1, 1933.
20. P. Belikoff, Pflüg. Arch. f. d. g. Physiol. **209**, 540, 1925.
21. А. Гунд, Измерения при высокой частоте, ОНТИ, 1930.
22. I. Obata and S. Morita, Journ. Ac. Soc. **4**, N. 2, 1933.
23. A. Davis, Nature 125, 48, 1930.
24. E. Stowell, Journ. Ac. Soc. **4**, N. 4, 1933.