НОВЕЙШИЕ УСПЕХИ ПРИКЛАДНОЙ АКУСТИКИ

Ф. Тренделенбург, Берлин

III. ЗВУКОПРИЕМНИКИ И ЗВУКОИЗЛУЧАТЕЛИ

1. Звукоприемники

Из звукоприемников, применяемых для технических целей, рассмотрим прежде всего конденсаторный микрофон. Конденсаторные микрофоны включаются как по низкочастотной схеме Венте [41], так и по высокочастотной схеме Риггера [42, 43]. Высокочастотная схема нашла себе применение в исследовательской работе во многих областях акустики и механики [44]. С. Кавацоэ [45] применил к конденсаторному микрофону схему высокочастотного делителя напряжения, причем действие микрофона при изменениях высокой частоты существенно не меняется, если эти изменения не выходят за определенные пределы.

Были предприняты систематические исследования собственно приемной системы конденсаторного микрофона — его капсюля; исследовались, с одной стороны, постоянство его чувствительности, а с другой — искажения звукового поля, вносимые самим микрофоном. С. Баллантайн [46] исследовал явления „старения" конденсаторного микрофона типа Венте. Механическое напряжение мембраны такого микрофона изменилось в теч ние $3^1/_2$ лет не более чем на 4,5%; изменение чувствительности за тот же промежуток времени было также сравнительно мало. Некоторые изменения чувствительности, зависящие от температуры, обусловливаются различным расширением при нагревании дюралюминия и стальной оправы. С. Баллантайн нашел,

* Jahrbuch. d. drahtl. Tel., u Tel, 37, 38, 1931. перев. Н. Д. Ершовой. Продолжение, см. Усп. физ. наук. XI, вып. 4, 650 (1931).

что температурные изменения чувствительности выражаются цифрой в 0,6% на градус Цельсия.

Кроме конденсаторных микрофонов преимущественно для высококоличественной передачи применяются ленточные микрофоны и микрофоны Рейса [48]. Первые из них в новой конструкции, предусматривающей расширение передаваемой полосы в сторону высоких частот, нашли себе применение, между прочим, в технике звукового кино [47].

Микрофоны Рейса проверялись путем электростатического возбуждения: микрофонная колодка наполнялась угольным порошком и закрывалась угольной пластинкой, причем собственные колебания пластинки не сказывались вследствие значительного затухания, обусловленного угольным порошком. На пластинку накладывалась металлическая фольга, представлявшая собой одну обкладку конденсатора, второй обкладкой служила металлическая решетка, находившаяся на небольшом расстоянии от мембраны.

Поскольку катодофон для технических целей больше не применяется, мы вкратце укажем лишь на работу Э. Мейера [49], выясняющую физический механизм его действия. При исследовании в стоячих волнах в трубке Кундта оказалось, что катодофон реагирует сильнее всего тогда, когда он поставлен на расстоянии $^1/_4\lambda$, $^3/_4\lambda$, $^5/_4\lambda$ и т. д. от закрытого конца трубки. Таким образом катодофон не является приемником давления, так как колебания давления имеют в указанных точках узлы. Для дальнейшего выяснения вопроса о том, является ли катодофон приемником скорости или смещения, были проведены аналогичные измерения в большом диапазоне частот, показавшие, что катодофон является приемником смещения. Э. Мейер полагает, что находящийся между анодом и катодом пространственный заряд отрицательных ионов колеблется вместе с частицами воздуха в звуковой волне, благодаря чему модулируется анодный ток.

В вопросах количественно правильной передачи звука большую роль играют искажения звукового поля, вносимые самим микрофоном. При приеме волн высокой частоты практически трудно удовлетворить условию, чтобы наи-

больший размер микрофона был мал по сравнению с $\lambda/2\pi$ (λ — длина волны звука); если же это условие не выполнено, то возникают явления отражения и дифракции. Обозначим через P/P_0 отношение звукового давления на приемнике к давлению в неискаженном звуковом поле; отношение P/P_0 имеет наибольшее значение, когда микрофон находится в жесткой стене, размеры которой велики по сравнению с длиной волны. В этом случае $P/P_0 = 2$, т. е. интенсивность звукового поля около звукоприемника возрастает при этом в четыре раза.

С. Баллантайн [50] на основании соображений, данных Релэем, вычислил значения P/P_0 для жесткого шара

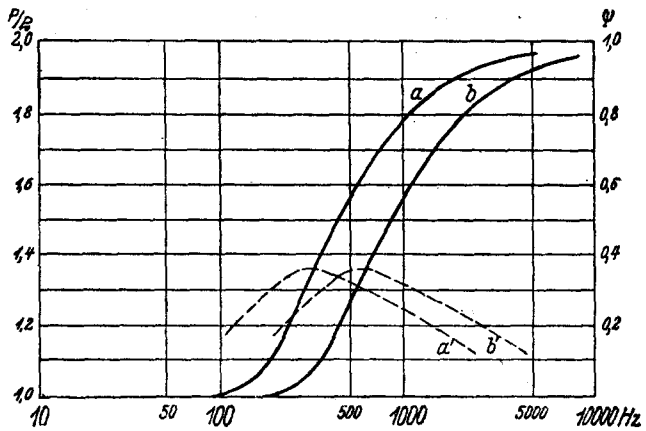


Рис. 15. Искажения звукового поля около жесткого шара.

(со стороны, обращенной к источнику звука) при различных отношениях радиуса шара к длине волны. Рис. 15 дает график функции P/P_0. Если стандартный микрофон вделан в поверхность жесткого шара, то, пользуясь кривой, изображенной на рис. 15, можно определить поправочный коэфициент для исключения ошибок, обусловливаемых явлением дифракции.

Все замечания, сделанные до сих пор, относятся или к вопросам возможности уменьшения искажений звукового поля, вносимых самим микрофоном, или в некоторых случаях к оценке их величины. Обратно, во многих практических вопросах имеет большое значение как раз тот факт,

что мы можем, располагая соответствующим образом микрофон (например помещая его в горло воронкообразного рупора), добиться большой чувствительности микрофона в определенных направлениях.

Н. Обата и И. Иошида[51] исследовали в достаточной мере полно зависимость чувствительности конденсаторного микрофона от направления звука, причем микрофон или был снабжен воронкообразным рупором или помещался

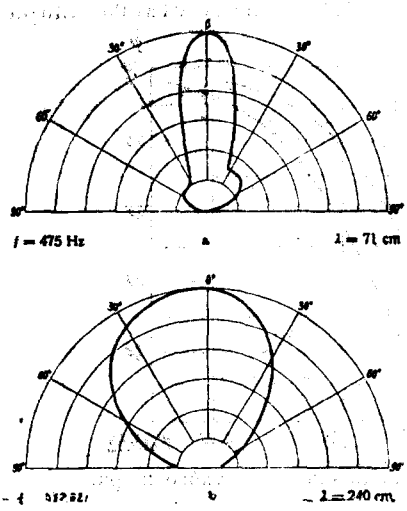


Рис. 16. Направленная чувствительность параболического звукового зеркала.

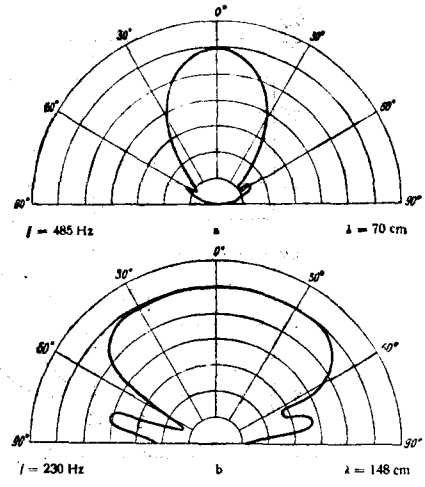


Рис. 17. Направленная чувствительность воронкообразного рупора.

в фокусе рефлектора. Источником звука при этих опытах служил громкоговоритель, находившийся на значительном расстоянии от микрофона.

Некоторые результаты их исследований даны на рис. 16 и 17. Рис. 16 *a* и *b* дают график направленной чувствительности рефлектора сечением в 200 *см* и глубиной 146 *см*. Рис. 17 *a* и *b* дают то же для изогнутого экспоненциального рупора, разрез которого указан на рисунке. Табл. I дает цифровые значения усиления (увеличения

амплитуды звукового давления на приемнике звука при применении рефлектора или рупора).

ТАБЛИЦА I

Частота	Рефлектор	Рупор
475	3,2	3,5
316	2,2	6
275	2,4	7
233	2,1	8 8
188	1,4	—

Таблица показывает, что с помощью указанных вспомогательных средств можно получить значительное повышение чувствительности приемника для звуковых волн, падающих в оптимальном направлении.

Звуковые рефлекторы и рупоры описанного типа с успехом применялись [52] для локализации звука аэропланов.

2. Звукоизлучатели

(Общие вопросы электрических звукоизлучателей)

Весьма большое количество работ посвящено звукоизлучателям, в особенности электрическим звукоизлучателям, имеющим большое техническое значение. Наряду с чисто акустическими вопросами (например свойствах звукового поля) подробно исследовались вопросы электроакустического коэфициента полезного действия; в то время как прежде во избежание искажений звука довольствовались коэфициентом полезного действия порядка 0,1 процента, теперь величина этого коэфициента доводится до нескольких процентов без ухудшения качества передачи.

Рассмотрим сначала общие вопросы конфигурации звукового поля, тесно связанные с замечаниями, сделанными в конце предыдущего раздела.

К. Сатô [53] на основании данных Релэя рассчитал звуковое поле конического рупора, в устьи которого находился источник звука. Рис. 18 *a* и *b* дают некоторые из результатов его вычислений, причем вычисления относились

к рупору с отверстным углом в 20° и к точкам, находящимся на больших расстояниях от рупора. На рис. 18*a* $k \cdot a = 3{,}831$, на рис. 18*b* $k \cdot a = 7{,}662$ ($k = 2\pi/\lambda$ и λ — длина рупора). В звуковом поле рупорного звукоизлучателя наблюдаются интерференционные максимумы и минимумы — явления, подобные тем, которые наблюдали Бакхауз и Тренделенбург[54] в звуковом поле блаттхаллера.

Расчет звукового поля круглой поршневой мембраны раньше был возможен только для тех точек, расстояние которых от мембраны велико по сравнению с радиусом мембраны[55], и более того —

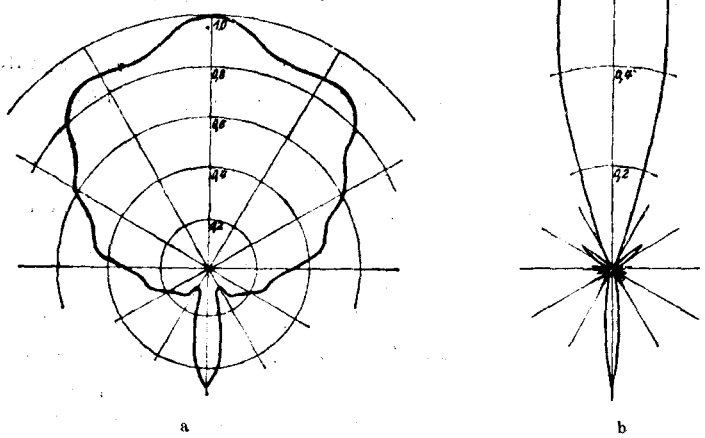


Рис. 18. Направленное действие рупорного излучателя.

лишь для точек, лежащих на перпендикуляре к середине мембраны[56]. Бакгауз[57] дал общее решение найденного Релэем интеграла, выражающего потенциал скоростей поршневой мембраны для всех точек, лежащих вне сферы с радиусом, равным радиусу поршневой мембраны. Результаты расчета были проверены экспериментально, причем обнаружилось, вообще говоря, хорошее совпадение теории с опытом. В основу расчета звукового поля было положено предположение, что мембрана колеблется в жесткой стенке, размеры которой велики по сравнению с длиной волны[58],

М. Стрёт[59] исследовал свойства акустического экрана приблизительно следующим образом.

Два точечных излучателя расположены на поверхности жесткого шара так, что они находятся как раз на противоположных концах одного из диаметров. Оба излучателя колеблются с противоположными фазами. Очевидно, что если диаметр шара очень мал ($D \ll \lambda/2\pi$), то на больших расстояниях от него звука практически не будет, так как во всех точках, достаточно удаленных от шара, уплотнение, создаваемое одним излучателем, нейтрализуется разрежением, создаваемым другим. Если шар велик по сравнению с длиной волны ($D \gg \lambda/2\pi$), то излучение соответствует излучателю нулевого порядка, вделанному в жесткую стенку очень больших размеров; одна половина излучения распространяется по одну сторону шара, другая — по другую.

Обозначая общую мощность через L, можно положить

$$L = kQ^2 2e,$$

где k — множитель, включающий в себя плотность воздуха, скорость звука и т. д., Q — производительность одного источника звука и e — множитель, характеризующий совместное действие обоих излучателей; согласно вышеизложенному e зависит от отношения D/λ. В предельном случае ($D \ll \lambda/2\pi$) e равно нулю, а для $D \gg \lambda/2\pi$ e достигает значения 0,5. Стрёт вычислил ход изменения e в зависимости от отношения диаметра шара к длине волны.

Технически особенно интересен вопрос о том, как ведет себя поршневая мембрана, вделанная в жесткую стенку. Если принять, что кратчайший путь звука между обоими точечными излучателями имеет решающее значение в нейтрализации поля, обусловленной противоположностью их фаз, то от идеализированной системы двух звукоизлучателей, расположенных на поверхности шара, можно перейти к излучению поршневой мембраны. Решающее значение в этом случае будет иметь путь звука от оборотной стороны мембраны через край акустического экрана до передней ее стороны. Описанную выше идеализированную систему можно принять в качестве эквивалента поршневой мембраны

с круглым экраном, диаметр которого равен половине длины окружности, описанной радиусом, равным радиусу шара.

Ход чрезвычайно важного для звукоизлучения коэфициента e дает рис. 19, где через $2a$ обозначен диаметр круглого экрана. Это соотношение можно еще яснее иллюстрировать на практическом примере. Предположим, что самым низким из передаваемых тонов будет тон частотою в 100 герц (длина волны 3 *м*). Если отдаваемая при этой частоте мощность должна составлять не менее 80% от максимальной отдачи мощности, то экран должен иметь диаметр не менее 1 *м*.

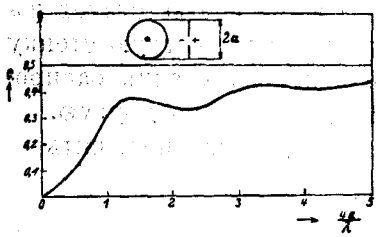


Рис. 19. Увеличение излучения звуковым экраном.

Здесь необходимо заметить еще следующее: введение экрана часто приписывается Райсу и Келлогу[60]; также и в упомянутой работе Стрёта дается ссылка только на обширную работу этих исследователей. Однако О. Неспер[61] указывает, что акустический экран впервые применил В. Бурстин[62] для камертона. Кроме того, следует подчеркнуть, что Риггер[63] в своей работе „К теории громкоговорителя“ подробно исследовал именно действие поршневой мембраны, колеблющейся в жесткой стенке, и впервые показал соответствие такого звукоизлучателя требованиям неискаженной передачи.

Работы, относящиеся к конструкциям электрических звукоизлучателей, занимаются, с одной стороны, улучшением чистоты передачи, а с другой — увеличением электроакустического коэфициента полезного действия. Особое внимание было обращено на уменьшение нелинейных искажений. Электромагнитные системы особенно подвержены этой опасности. Особым расположением якорей у громкоговорителей „Gealion“[64] удалось добиться уменьшения нелинейных искажений, возникающих вследствие увеличения силы при приближении якоря к полюсам; этого достигли тем, что при приближении якоря к полюсам плечо рычага автома-

тически уменьшалось и поэтому вращающий момент оставался постоянным.

Еще раньше обсуждался вопрос [65] о том, что электродинамические системы представляют большие преимущества в смысле уменьшения нелинейных искажений; эти преимущества особенно очевидны тогда, когда необходимо получить большую акустическую мощность. Всюду, где требуется большая акустическая мощность и безукоризненная чистота передачи, применяется электродинамический принцип. В подобных случаях применяются громкоговорители с подвижной катушкой и конической мембраной [66], блаттхаллеры [67] и громкоговорители с рифленой мембраной [68] (дальнейшее развитие громкоговорителя со складчатой мембраной Герлаха) [69]. Нейман [70] усовершенствовал риггеровский блаттхаллер путем различных конструктивных мероприятий и усиления магнитной системы. Выражение, данное Риггером для электроакустического коэфициента полезного действия поршневой мембраны, возбуждаемой электродинамически, можно после некоторых преобразований написать в следующем виде: *

$$\eta = C\,\frac{B_L^2 V_L F^2}{\rho M^2},$$

где C — постоянный множитель пропорциональности, B_L — магнитная индукция в воздушном зазоре, V_L — объем проводника, F — поверхность мембраны, ρ — удельное сопротивление материала проводника, M — общая масса (масса мембраны M_m + масса проводника M_l + соколеблющаяся масса воздуха M_s). Для увеличения коэфициента полезного действия могут быть приняты следующие меры:

1. Увеличение излучающей поверхности. Границей этого увеличения является увеличивающаяся направленность действия, которая не должна превышать определенных пределов.

2. Уменьшение масс мембраны и проводника.

* Соотношение справедливо лишь для небольшого коэфициента полезного действия и для тонов, длина волны которых велика по сравнению с сечением мембраны.

Эффект соколеблющейся массы воздуха ведет к тому, что уменьшение масс мембраны и проводника может улучшить коэфициент полезного действия только до тех пор, пока эти массы значительно превышают массу соколеблющегося воздуха. Кроме того, слишком большому уменьшению массы мембраны препятствует еще и требование достаточной ее жесткости, что необходимо для уменьшения „размягчения" мембраны по отношению к компонентам высокой частоты. Далее следует указать, что уменьшение массы проводника (предполагая, что материал его остается тем же) вызывает уменьшение его объема; следовательно, коэфициент полез-

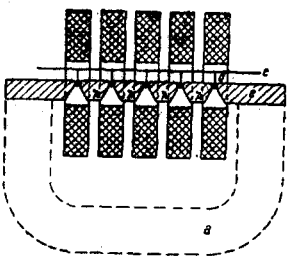


Рис. 20. Блаттхаллер со щелевым возбуждением.

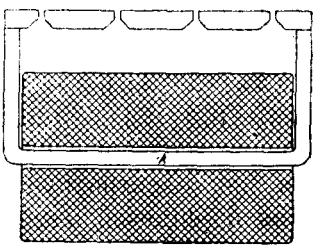


Рис. 21. Блаттхаллер с возбуждением ярма.

ного действия не увеличивается. Подробное исследование зависимостей, упомянутых здесь лишь вкратце, показывает, что оптимальный коэфициент полезного действия получается в том случае, когда массы проводника и мембраны равны.

3. Значительное увеличение коэфициента полезного действия можно получить путем усиления поля, так как коэфициент полезного действия возрастает пропорционально B_L^2. Особым расположением катушек удалось добиться уменьшения потока рассеяния. На рис. 20 изображена система блаттхаллера со „щелевым" возбуждением; рис. 21 дает схему прежнего устройства с возбуждением ярма. Устройство, аналогичное изображенному на рис. 21, обусловливает, естественно, больший поток рассеяния; затрата на возбуждение поля в 20 000 гаусс при возбуждении ярма приблизительно на 100% больше, чем при щелевом возбуждении. Кроме того последнее устройство отличается лучшим тепло-

отводом. От большого блаттхаллера со щелевым возбуждением удалось без применения рупора при затрате электрической мощности в 800 ватт получить 1/4 HP акустической мощности [71].

Вопрос об увеличении коэфициента полезного действия электродинамического громкоговорителя с помощью трансформации давления и рупора был исследован Ганна [72]. Для исследования был выбран громкоговоритель с подвижной катушкой, работавший в полосе частот от 100 до 5000 герц с отдачей в 30% при применении медного проводника и с отдачей в 40% при применении алюминиевого проводника. Вследствие больших амплитуд колебаний мембраны при низких частотах мощность громкоговорителя с мембраной определенной величины ограничена. Ганна разделял, в случаях когда это было необходимо, полосу частот на несколько громкоговорителей: для передачи низких тонов употреблялся громкоговоритель с большой поверхностью мембраны, для передачи высоких тонов громкоговоритель с малой поверхностью мембраны.

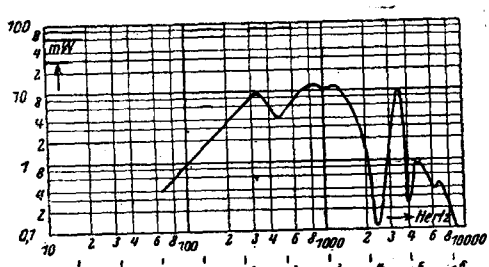


Рис. 22. Частотная кривая полной мощности громкоговорителя Райса-Келлога.

Определение коэфициента полезного действия звукоизлучателя удобно производить или определяя общую отданную звуковую мощность из средней плотности звуковой энергии в помещении, поглощение которого известно, или путем электрических измерений при включенном и выключенном поле сначала в воздухе, а затем в вакууме [73].

Мейер и Юст [74] нашли, что коэфициент полезного действия электродинамического громкоговорителя равен приблизительно 1%; коэфициент полезного действия мощного электромагнитного громкоговорителя доходит до 3,5%; электростатического громкоговорителя — до 2% и электромагнитного рупорного громкоговорителя — до 7% (в случае резонанса).

На рис. 22 дана частотная характеристика общей мощности громкоговорителя Райса-Келлога. Характеристика дает среднюю интенсивность для случая, когда громкоговоритель работает в помещении с хорошо отражающими поверхностями. Для помещения с большим поглощением эта характеристика дает неполную картину звукоизлучения, так как при ее снятии не была принята во внимание неизбежная направленность действия громкоговорителя; о направленном действии мы говорили выше. Рис. 23 дает для того же громкоговорителя кривую зависимости интенсивности звука от частоты непосредственно перед мембраной на нормали к ее середине; из сравнения рис. 23 и 22 видно, что на нормали к середине сильнее выступают вследствие направленности действия компоненты высоких частот.

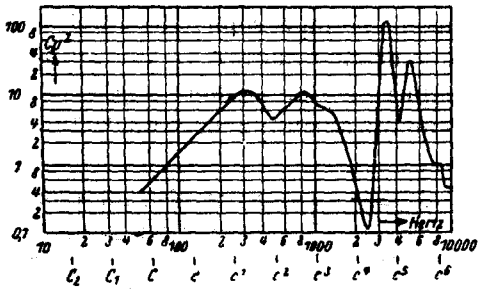


Рис. 23. Зависимость интенсивности звука от частоты на нормали к середины мембраны.

3. Музыкальные инструменты[75] и их звук

Физические особенности скрипки — главного инструмента современного оркестра — получили свое дальнейшее освещение в работах Бакхауза[76]. В то время как прежде экспериментальные исследования производились оптическими методами (над колеблющимися струнами скрипки) и методами анализа звука скрипки в звуковом поле, теперь удалось получить объективные заключения и о форме колебаний корпуса скрипки при различных частотах. Формы колебания корпуса скрипки были изучены[77] следующим образом: чрезвычайно легкая металлическая фольга, диаметром приблизительно в 0,8 *см* наклеивалась на исследуемые области корпуса скрипки. Фольга представляла собою одну обкладку конденсатора, второй обкладкой которого являлся неподвижный электрод, находившийся на расстоянии 0,5 *мм*

от фольги. При колебаниях скрипичного корпуса возникали изменения емкости этого конденсатора. Изменения емкости превращались по методу Риггера в изменения тока и записывались осциллографически.

Особый интерес представляла задача — выяснить подобного рода исследованиями, какого порядка излучатель представляет собою скрипка. Для этого производились одновременно осциллографические записи двумя такими конденсаторами, находившимися в двух точках скрипки, а затем определялась разность фаз полученных, колебательных кривых. Рис. 24 дает форму колебаний корпуса скрипки для тона частотой в 192 герца. Узловая линия идет вдоль борта; измеряемые точки на основании и деке скрипки колеблются в противоположных фазах; борт же при низких частотах представляет собою жесткую связь между декой и основанием скрипки. Кроме того узловая линия идет сверху вниз через основание и деку. Колебания подобной формы можно приближенно принять за колебания секториального шарового излучателя второго порядка (оси которого соответствуют осям инструмента).

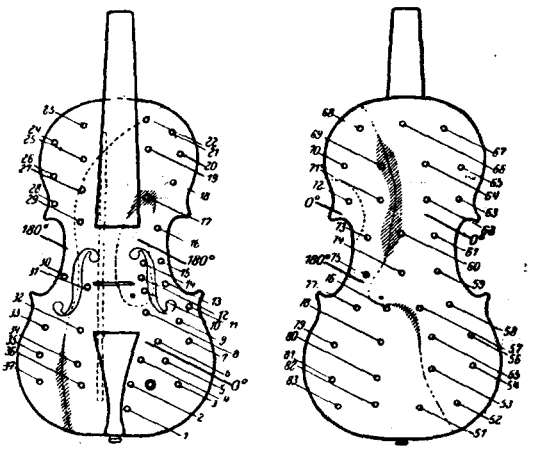
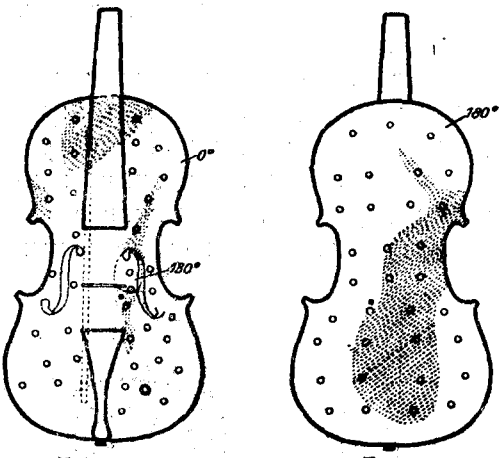


Рис. 24. Форма колебаний корпуса скрипки при частоте 192 герца (по Бакхаузу).

Бакхауз еще раньше пришел к заключению [78], основываясь на ничтожно малой силе основного тона в акустическом спектре скрипки при данной частоте, что скрипка в области низких частот колеблется как излучатель сравнительно высокого порядка и поэтому в данной области частот не может давать сколько-нибудь значительного излучения. Это предположение было полностью подтверждено изложенными выше фактами. При более высоких частотах

скрипка колеблется, как это показывают рис. 25 и 26, почти как диполь (т. е. как излучатель первого порядка). Основание и дека колеблются почти в одинаковых фазах, борт остается еще жестким.

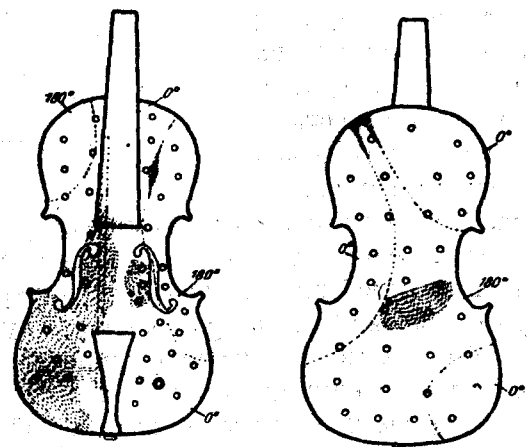


1. $\bar{N} = 10{,}0$ 2. $\bar{N} = 1{,}25$

Рис. 25. Форма колебаний корпуса скрипки при частоте 287 герц (по Бакхаузу).

Особо интересен тот факт, что при высоких частотах (683 герца) хорошая скрипка колеблется почти как излучатель нулевого порядка. Борт в этом случае не является уже жесткой связью, а становится динамически „мягким". Бакхауз придает этому обстоятельству важное значение: излучатели нулевого типа являются наиболее выгодными, так как в этом случае излучение скрипки оптимально.

Людер[79] исследовал распределение звука отдельных инструментов и целых оркестровых произведений; исследования проводились описанным выше методом статистического анализа по октавам.



1. $N_{95\%} = 59{,}0$ 2. $N_{95\%} = 5{,}4$

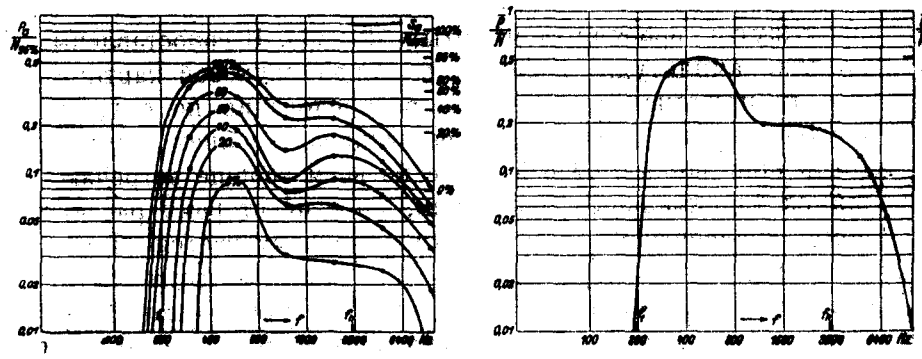
Рис. 26. Форма колебаний корпуса скрипки при частоте 483 герца (по Бакхаузу).

Этими исследованиями было выяснено, как распределяются компоненты отдельных звуков по различным октавам и какие наблюдаются максимумы в течение определенного

промежутка времени (4 минуты). В табл. II сопоставлены средние амплитуды давления в общей звуковой картине, т. е. не принимая во внимание распределение по октавам и максимальные значения, встречающиеся в общем спектре. Последние данные относятся не ко всем вообще встречающимся максимальным значениям, но к некоторому расчетному значению $S_{95\%}$; под этим подразумевается такое значение, ниже которого лежит 95% всех максимумов. Это значение выбрано на том основании, что технически менее существенно знать, какие максимумы могут встречаться вообще, но чрезвычайно важно знать, с какими „средними" максимумами приходится иметь дело, а совершенно случайные незначительные превышения являются почти незаметными. Данные табл. II относятся к точкам, находящимся на расстоянии 5 *м* от источника звука, в направлении оптимального излучения.

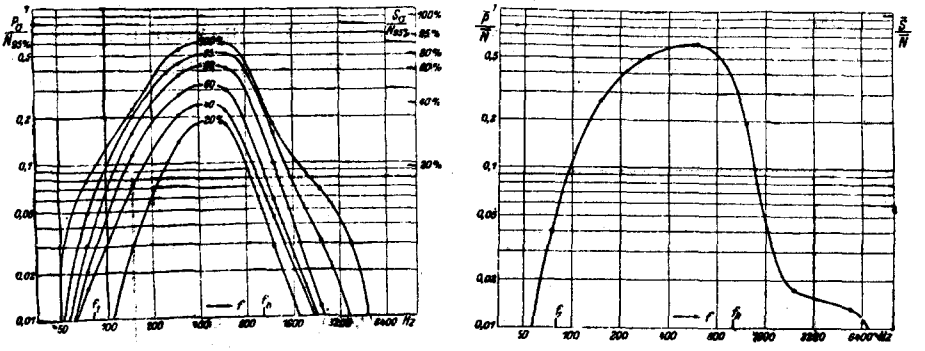
ТАБЛИЦА II

Источник звука	Значение $S_{95\%}$ в барах	Среднее значение S общего изменения
Мужской голос (1)	0,425	0,038
(2)	0,64	0,019
(3)	0,365	0,015
(4)	0,345	0,023
Среднее	0,485	0,024
Женский голос (1)	0,22	0,018
(2)	0,665	0,052
(3)	0,34	0,032
Среднее	0,405	0,033
Разговорная речь: английская	0,645	0,043
Разговорная речь: русская	0,37	0,039
Разговорная речь: итальянская	0,255	0,024
Флейта	2,15	0,35
Скрипка	1,7	0,21
Труба	9,4	0,80
Контрафагот	1,25	0,23
Контрабас	2,45	0,34
Литавры		
mezzoforte	35,5	3,4
forte	32,0	3,45
fortissimo	44,0	4,8
Большие литавры		
piano mezzoforte	6,65	1,0
Тарелки	1,0	0,23



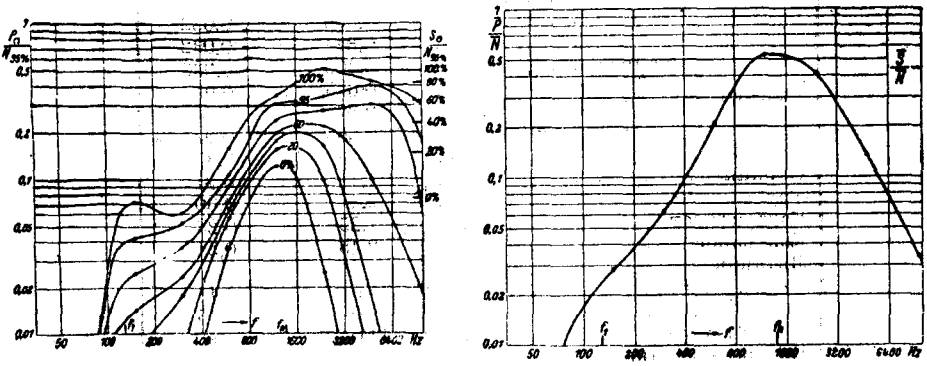
N = 2,0

Рис. 27. Спектр средних значений и спектр максимумов скрипки.



N 95% = 16,0 N = 1,8

Рис. 28. Спектр средних значений и спектр максимумов флейты.



N 95% = 98,0 N = 9,1

Рис. 29. Спектр средних значений и спектр максимумов трубы.

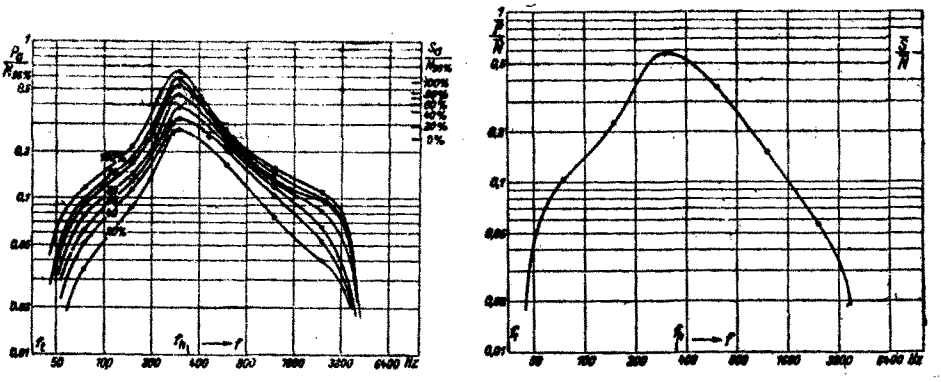
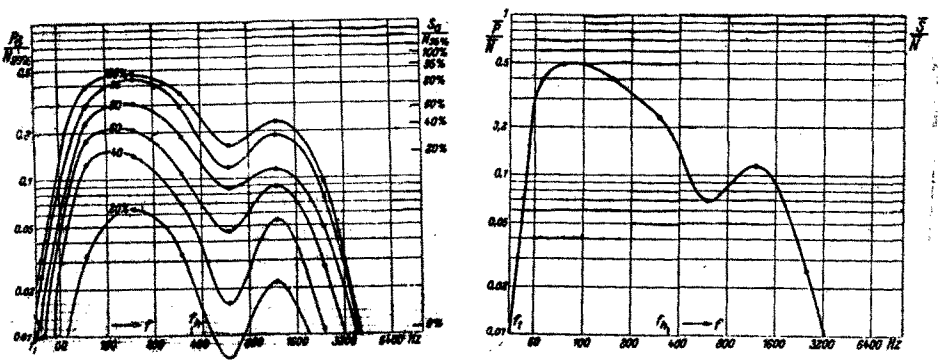
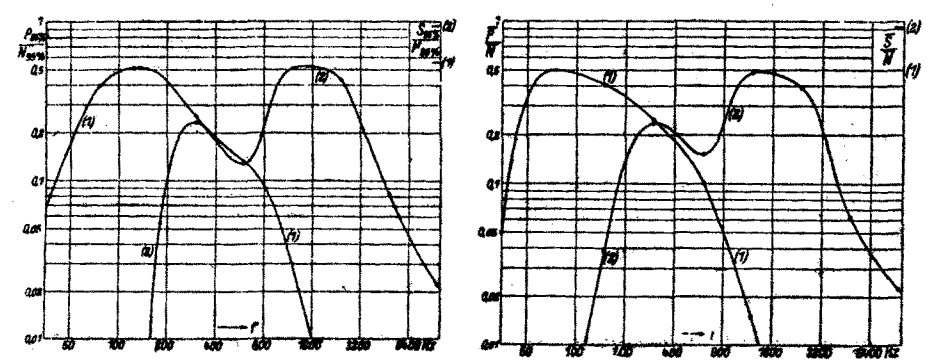


Рис. 30. Спектр средних значений и спектр максимумов контрафагота.



$N_{95\%} = 6.95$ $\bar{N} = 1,1$

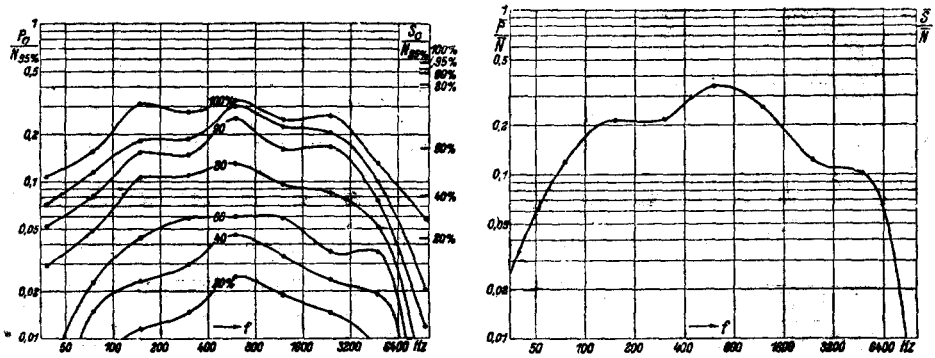
Рис. 31. Спектр средних значений и спектрмаксимумов контрабаса.



$N_{95\%} = 9,3$ $\bar{N} = 0.96$

Рис. 32. Спектр средних значений и спектр максимумов литавр (1) и тарелок (2).

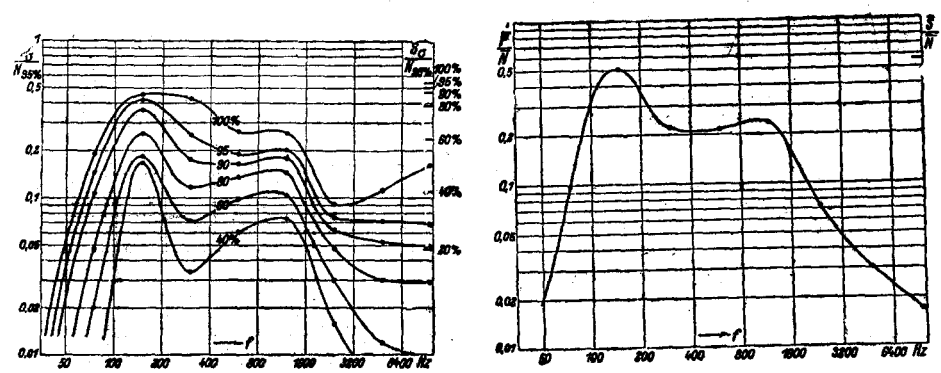
Спектры максимумов и средних значений отдельных инструментов и различных оркестровых пьес в том виде, как они снимались последовательными измерениями с помощью октавного фильтра, даны на рис. 27—34. Диа-



N 95% = 34,5 N = 1,9

Рис. 33. „Волшебная флейта".

граммы, обозначенные через *a*, относятся к спектрам максимальных значений. Параметром *p* для отдельных кривых служит суммарная частость. Суммарная частость



N 95% = 60,0 N = 4,2

Рис. 34. Лоэнгрин".

$p^0/_0$ означает, что в соответствующей октаве $p^0/_0$ всех максимумов лежит ниже соответствующей кривой и $(100 - p^0/_0)$ максимумов лежит выше данной кривой. Диаграммы, обозначенные через *b*, дают среднюю арифметическую ком-

понентов давления в соответствующих октавах. Необходимо заметить, что кривые приведены к практически равным масштабам путем умножения на факторы, зависящие от среднего арифметического значения по всем частотам. Эти факторы указаны под диаграммами; так например, значения ординат среднего значения для флейты представляют собою произведения среднего значения на 1,8; значения ординат кривой для трубы — на 2,1, для литавр — на 14,0. Эти факторы могут быть использованы в качестве меры звуковой нагрузки, даваемой данным инструментом.

Из рассмотрения кривых рис. 27—34 видно, что максимумы отдельных музыкальных инструментов лежат в совершенно различных октавах. Так например, главнейшие компоненты звука флейты (рис. 28) лежат между 200 и 800 герц; максимумы трубы (рис. 29) лежат значительно выше 1600 герц; максимумы литавр и контрабаса лежат между 50 и 100 герц (рис. 31 и 32).

Изложенные выше факты весьма существенны для расчета аппарата для передачи звука. Все элементы устройства должны быть сконструированы так, чтобы они могли передавать неискаженными также и максимальные значения компонентов звука. Из кривых видно, что максимумы отдельных инструментов лежат в совершенно различных областях частот и, следовательно, соответственно этому должны употребляться различные типы громкоговорителей; так, например для передачи духовых инструментов — рупорный громкоговоритель старого типа, который совершенно не может применяться для передачи контрабаса и литавр ввиду его чрезвычайно малой отдачи на низких частотах.

ЛИТЕРАТУРА

41. E. C. Wente, Phys. Rev. (2), *10*, 39, 1917.

42. H. Riegger, Wiss. Veröffentl. a. d. Siemens-Konz., *III/2*, 67, 1924; F. Trendelenburg, Wiss. Veröffentl. a. d. Siemens-Konz., *III/2*, 43, 1924.

43. A. H. Reeves, E. Commun., *7*, 268, 1929; на работы Риггера нет ссылки.

44. Ср., например, H. Backhaus, ZS. f. techn. Phys., *9*, 491, 1928 (исследования формы колебания корпуса скрипки); H. Gerdien, Wiss. Veröffentl. a. d. Siemens-Konz., *VIII/2*, 126, 1929; W. Mauksch, l. c., 130; C. Salomon, Loewe, *14*, 117, 1929; H. Thoma, ZS. d. V. D. I., 639, 1929; O. v. Auwers, Wiss. Veröffentl. a. d. Siemens-Konz., *V III/2*, 137, 1929; H. Gerdien, H. Pauli u. F. Trendelenburg, ZS. f. techn. Phys., *10*, 374, 1929 (измерения механической силы и измерения вращающего момента машин, кривошипов аэропланов, измерения сейсмическим маятником и т. п.); K. Schnauffer, Jahrb. d. D. Vers. — Anst. f. Luftfahrt, S. 304 1930.

45. S. Kawazoe, Res. Elektrot. Lab. Tôkyô, Nr. 282, 1930.

46. St. Ballantine, Proc. Inst. Radio Eng., *18*, 1206, 1930. В работе приведены вычисления влияния полости непосредственно перед мембраной; полость действует как акустическая емкость, а масса соколеблющегося воздуха как акустическая самоиндукция.

47. Сообщение об этом Гартмана недавно появилась в E. N. T.

48. E. Reiss, AEG Mitt., 1929, S. 601.

49. E. Meyer, E. N. T., *6*, 17, 1929.

50. St. Ballantine, Phys. Rev. (2), *32*, 988, 1928; см. также W. West, I. I. E. E., *67*, 1137, 1929.

51. J. Obata u. Y. Yosida, Rep. of the Aeronaut. Res. Inst. Tôkyô Imperial Univers., *V/9*, 231, 1930.

52. Кроме работы (1) см. также E. Waetzmann в Müller-Pouillets, Lehrb. d. Phys., 11. Aufl. *I/3*, *299*, 1929. Кроме того звукоулавливатели были описаны R. Berger, Schalltechnik, *3*, 90, 1930.

53. K. Satô, Jap. Journ. Phys., *V*, Nr. 3, 103, 1928/29. Ср. также новую работу K. Satô, Proc. Imp. Acad. Tôkyô, *VI*, 27, 256, 1930; эти работы велись в обратном направлении (рупор как приемник), причем получилось хорошее совпадение с приведенной выше теорией.

54. H. Backhaus u. F. Trendelenburg, ZS. f. techn. Phys., *7*, 630, 1926.

55. H. Stenzel, E. N. T., *4*, 239, 1927; *6*, 165, 1929; ZS. f techn. Phys., *10*, 567, 1929. Ср. также работу N. W. Mc Lachlan, Proc. Roy. Soc., *122*, 604, 1929, в которой автор приходит к тем же результатам, что и H. Stenzel в вышеназванной статье. Далее R. B. Lindsay, Phys. Rev., *32*, 515, 1928; J. Wolff u. L. Malter, Phys. Rev., *33*, 1061, 1929.

56. См. выше 54.

57. H. Backhaus, Ann. d. Phys. (V), *5*, 1, 1930.

58. Здесь необходимо отметить то, что Штенцелю также удалось вычислить звуковое поле для зон, находящихся на большом расстоянии от излучателя. Технически наиболее важен вопрос звукоизлучателей с конусной мембраной; Штенцель заменил конусную мембрану пространственным углом равной поверхности, поле излучения которого

можно было вычислить. Результаты вычислений хорошо совпадают с экспериментальными данными. См. об этом H. Stenzel, Forsch. u. Techn., S. 349, 1930.

59. M. J. O. Strutt, Phil. Mag. (VII), *7*, 537, 1929.

60. C. W. Rice u. E. W. Kellogg, Journ. Amer. Inst. Electr. Eng., *44*, 982, 1925.

61. O. Nesper, Funkbastler, *3*, 40, 1930.

62. W. Burstyn, ZS. f. techn. Phys., *3*, 180, 1922.

63. H. Riegger, Wiss. Veröffentl. a. d. Siemens-Konz., *III/2*, 67, 1924.

64. H. Benecke, AEGMitt., S. 588, 1929.

65. ZS. Hochfrequenztechn., *32*, 134, 1928.

66. Ср., например, F. A. Fischer u. Lichte, AEGMitt., S. 25, 1929 (работа дает подробные данные о громкоговорителях „Geaphon" и „Geakord", частотные кривые и т. п.); H. Benecke AEGMitt., S. 509, 1930; E. D. Cook, Gen. Electr. Rev., *33*, 509, 1930; H. M. Clarke, Exp. Wireless, *6*, 602, 1929. Об электродинамических громкоговорителях с плоской круглой мембраной см. R. W. Paul u. B. S. Cohen, Wireless World, *26*, 374, 1930; Exp. Wireless, *7*, 421, 1930; N. W. Mc. Lachlan, Phil. Mag. (VII), *7*, 1011, 1929.

67. H. Riegger, Wiss. Veröffentl. a d. Siemens-Konz., *III/2*, 43, 1924.

68. Ср., например, G. Kemna, u. M. Kluge, Siemens-Jahrbuch, *4*, 361, 1930.

69. Об электростатических громкоговорителях опубликовано мало работ, из них мы здесь назовем работы V. F. Greaves, F. W. Kranz u. W. D. Crozier, Proc. Inst. Rad. Eng., *17*, 1142, 1929. G. Green, Phil. Mag. (VII), 115, 1929.

70. H. Neumann, ZS. f. techn. Phys., *10*, 548, 1929; Wiss, Veröffentl. a. d. Siemens-Konz., *IX/2*, 226, 1930.

71. H. Neumann, Siemens-Ztschr., *10*, 562, 1930 (подробные данные о конструкции).

72. C. R. Hanna, Journ. Amer. Inst. Eng.; *47*, 253, 1928.

73. Лит. см. Успехи физ. наук, вып. 4, 1931.

74. E. Meyer u. P. Just, ZS. f. techn. Phys., *10*, 309, 1929.

75. О новых представлениях о музыкальных инструментах см. A. Kalähne in Müller-Pouillets, Lehrbuch der Physik, hrsg. von E. Waetzmann, *1*, 3, 226, 11. Aufl., Braunschweig, 1929. Далее см. E. G. Richardson, The acoustics of orchestral instruments, London, 1929.

76. H. Backhaus, Naturwissensch. *17*, 811 u. 835, 1929.

77. H. Backhaus, ZS. f. techn. Phys., *9* 491, 1928; ZS. f. Physik, *62*, 143, 1930.

78. H. Backaus, ZS. f. techn. Phys., *8*, 509, 1927.

79. H. Lueder, Wiss. Veröffentl. a. d. Siemens-Konz., *IX/2*, 167, 1930.