

## НОВЕЙШИЕ УСПЕХИ ПРИКЛАДНОЙ АКУСТИКИ \*

Ф. Тренделенбург, Берлин

### V. СЛУХ И РЕЧЬ

При обзоре работ, занимающихся выяснением свойств слуха, на первое место необходимо поставить работу Трегера<sup>80</sup>. Последнему удалось, точными физическими методами, исследовать свойства барабанной перепонки на живом объекте. Для изучения свойств барабанной перепонки, использовалось обратное действие ее колебаний на звуковой процесс, вызываемый звукоизлучателем в трубке, введенной в слуховой проход. Свойства барабанной перепонки влияли на звуковой процесс в трубке, подобно тому как свойства замыкающего сопротивления в электрическом контуре влияют на процесс в самом контуре. Мы уже указывали выше, что дифференциальное уравнение процесса в акустическом проводнике аналогично „телеграфному уравнению“. Решение этого дифференциального уравнения показывает, что определение акустических свойств барабанной перепонки может быть произведено путем измерения амплитуды и фазы давления в определенных местах проводника.

Обозначим через  $P_{\max}$  давление в измеряемой точке, выбранной на расстоянии  $\frac{\lambda}{2}$  от звукоизлучателя, и через  $P_{\min}$  давление в том же месте, но при длине трубки (между точкой, в которой производятся измерения и замыкающим сопротивлением) укороченной на  $\frac{\lambda}{4}$ ; отношение  $\frac{P_{\max}}{P_{\min}}$  зависит, согласно теории, от величины механического

\* Продолжение, см. „Успехи физических наук“, XI, вып. 4, 650; XII, вып. 1.

сопротивления ( $R$ ), характеризующего барабанную перепонку, как приемник звука (под механическим сопротивлением подразумевается отношение давления на приемнике к его скорости).

Определение амплитуды и фазы  $P_{\max}$  и  $P_{\min}$ , выполнялось с помощью компенсационного микрофона Тишнера, о котором уже говорилось выше<sup>81</sup>. Необходимо отметить также, что отношение между  $R$  и  $\frac{P_{\max}}{P_{\min}}$  дает характеристику проводимости акустического проводника; характеристика проводимости в акустическом случае определяется так же как и в электрическом — из измерений при холостом ходе. При исследованиях на холостом ходе трубка не вводится в слуховой проход, но закрывается наглухо металлическим штепселем, так что на конце наступает полное отражение.

Измерения чистыми тонами в диапазоне от 200 до 3000 герц показали, что барабанная перепонка действует как приемник давления: механическое сопротивление имеет упругий характер. Абсолютные значения сопротивления (в единицах CGS) в зависимости от частоты приведены на рис. 35. Рис. 36 дает фазу сопротивления барабанной перепонки. В диапазоне между 700 и 800 герц сопротивление барабанной перепонки достигает своего минимума; его абсолютное значение при этом почти равно акустическому

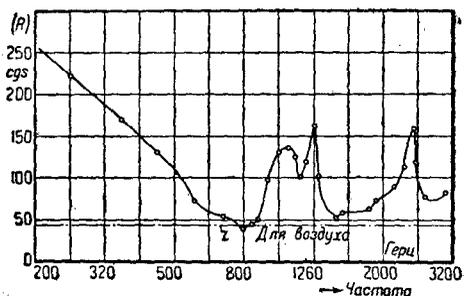


Рис. 35. Кажущееся сопротивление барабанной перепонки в зависимости от частоты (по Трегеру).

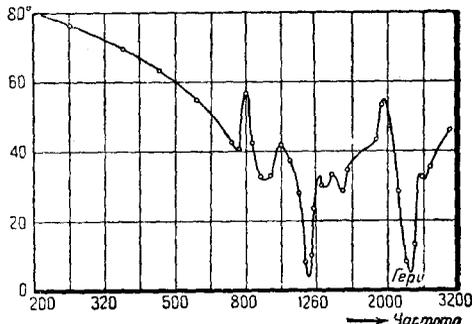


Рис. 36. Фаза сопротивления барабанной перепонки в зависимости от частоты.

акустическому

сопротивлению воздуха, а именно — оно составляет около 40 единиц *CGS*. Таким образом выясняется интересный факт, что человеческое ухо в области максимальной чувствительности работает почти идеально<sup>28</sup>.

Измерения, произведенные над различными лицами, показали, что при частоте ниже 500 герц сопротивление барабанной перепонки у всех в достаточной мере одинаково (на рис. 37*a* векторно представлено сопротивление барабанной перепонки семи исследуемых лиц, при частоте 500 герц), но в более высоких областях становятся заметными индивидуальные различия (рис. 37*b*, 1000 герц).

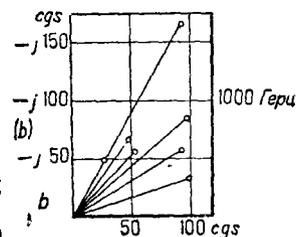
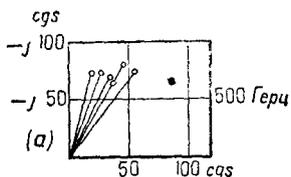


Рис. 37. Сопротивление барабанной перепонки различных исследуемых лиц: *a* — при 500 герц и *b* — при 1000 герц (изображение векторное).

В подобных же работах можно найти указания относительно направленной чувствительности слуха при слушании одним ухом<sup>29</sup>. При частотах свыше 300 герц экранирующее действие головы уже становится заметным. При частотах свыше 2000 герц восприятие делается остро направленным. Рис. 38 показывает как при этом наступает оптимум для направления, перпендикулярного к ушной раковине.

Проводились работы и по исследованию свойств внутреннего уха. В основе этого вопроса лежит то, что его полное решение чисто физическими методами невозможно; в граничной области между физикой и физиологией вообще трудно найти однозначное решение, как и во многих задачах чистой физики. Исследования биологов, производимые над живым организмом, допускают лишь незначительные вариации, в то время как физики, работая над неодушевленной материей, могут выбирать условия опыта более или менее свободно.

Наиболее важным является вопрос о том, каким способом ухо может различать тона по их высоте. Движение

барабанной перепонки (о поведении которой под действием падающего на нее звука, мы достаточно точно можем судить по только что упомянутым исследованиям Трегера) передается на ряд слуховых косточек. Последние из слуховых косточек <sup>84</sup> является стремя (см. схематический рис. 39). Движение стремени передается на тонкую перепонку овального окна, лежащего в начале улитки; улитка наполнена лимфатической жидкостью, в которой возникают, таким образом, колебания давления, соответствующие падающему звуку.

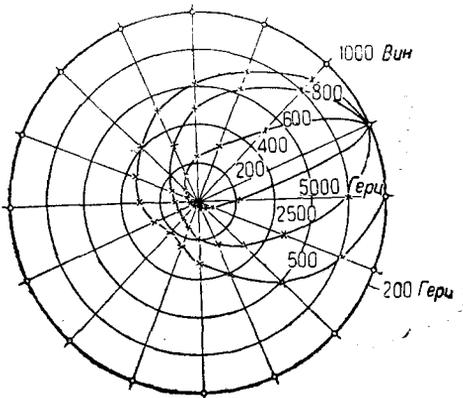


Рис. 38. График направленной чувствительности уха (по Трегеру).

Улитка делится на две части перегородкой, состоящей из костной и перепончатой части. Перепончатая часть перегородки представляет собою туго натянутую волокнистую мембрану, основную мембрану, имеющую — как это вполне можно предполагать — решающее значение для способности уха различать тона по их высоте. Нижняя часть улитки также наполнена лимфой и заканчивается круглым окном, закрытым мембраной.

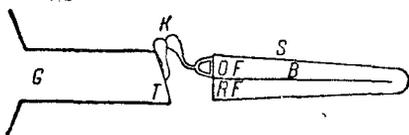


Рис. 39. G — слуховой проход, K — слуховые косточки; T — барабанная перепонка; OF — овальное окно; S — улитка с основной мембраной B (схематические).

Колебания давления в верхней части улитки вызывают вынужденные колебания основной мембраны, которые передаются в нижнюю часть улитки, где они с помощью круглого окна могут быть сравнены с внешним давлением.

Над основной мембраной распределены окончания слухового нерва, через посредство этих окончаний раздражения, возникающие при колебании основной мембраны, могут передаваться в акустический центр мозга.

Над основной мембраной распределены окончания слухового нерва, через посредство этих окончаний раздражения, возникающие при колебании основной мембраны, могут передаваться в акустический центр мозга.

Основной проблемой является выяснение вопроса о том, каковы вынужденные колебания основной мембраны; в частности возможно ли, что основная мембрана представляет собою анализатор звука, и что при тоне определенной высоты колеблется лишь определенная часть мембраны. Основная мембрана имеет продолговатую форму, длина ее равна приблизительно 35 мм, ширина мембраны у овального окна достигает всего лишь 0,04 мм, у вершины улитки ее ширина равна около 0,5 мм. Мембрана имеет — как это уже упоминалось — волокнистое строение, причем ее поперечное натяжение значительно больше, чем продольное.

Гельмгольц<sup>85</sup> впервые теоретически исследовал колебания мембраны такого типа. При вычислениях он предполагал, что действующая сила распределена равномерно по всей мембране. В дальнейшем было установлено, что мембрана имеет форму равнобедренного треугольника и что продольное натяжение мембраны исчезающе мало по сравнению с поперечным натяжением. Вычисления дают, что при таком строении мембраны соколеблется лишь небольшая часть волокон; это аналогично тому, что мы имеем в случае струн рояля, над которыми пропет какой-либо тон; группа струн, собственный период колебаний которых близок к периоду данного тона, начинает соколебаться, амплитуда же остальных струн, период которых лежит далеко от резонанса, остается малой.

Далее, вычисление дает, что основание треугольника (область мембраны вблизи вершины улитки) реагирует на низкие тона; для высоких тонов резонансная область лежит в начале основной мембраны — вблизи овального окна. Эти данные теории Гельмгольца вполне правильны; они хорошо совпадают с результатами опытов, произведенных над животными. В этих опытах основная мембрана повреждалась чрезмерно сильными акустическими или механическими раздражениями; при низких тонах повреждения наблюдались у вершины улитки, при высоких у овального окна<sup>86</sup>. Но против теории Гельмгольца имеется целый ряд возражений<sup>87</sup>. Одно из этих возражений стоит в связи с вопросом о том, каким образом ухо ощущает низкие тона

даже тогда, когда они длятся лишь чрезвычайно короткий промежуток времени (наименьший около двух колебаний). При столь коротком воздействии система не может возбудиться достаточно для того, чтобы могло возникнуть точное ощущение тона. Весьма существенным является и другое возражение, а именно: чрезвычайно трудно представить себе физически, что основная мембрана, будучи весьма легкой, может обладать столь низкими собственными частотами, как частоты тонов на нижней границе слышимости, а затем как может основная мембрана анализировать весь диапазон слышимых частот, охватывающий около десяти октав. Люкс, Роаф и Флетчер, Вегель и Лен и другие<sup>89</sup> пытались устранить эти противоречия тем, что они рассматривали основную мембрану как сложную систему, массу и упругость которой следует считать состоящей из массы и упругости лимфатической жидкости и гибкой перегородки;

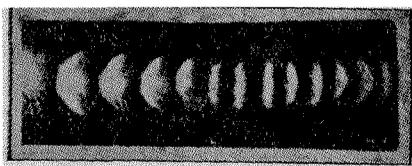


Рис. 40. „Звуковая картина“ на модели мембраны (по Эвальду).

эта теория лучше объясняет анатомические соотношения, но не вполне устраняет затруднения, упомянутые выше<sup>89</sup>.

Эвальд<sup>90</sup> пытался проверить теорию Гельмгольца на модели. Для этого он возбуждал колебания тонкой резиновой мембраны и нашел, в полную противоположность воззрениям Гельмгольца, несколько зон максимального возбуждения; он нашел, что на мембране образуются стоячие волны, причем при низкой частоте возбуждающего колебания узлы стоячих волн лежат далеко друг от друга, при более высоких частотах они сближаются (рис. 40). Отсюда, в противоположность гельмгольцевской „одноточечной теории“ вынужденных колебаний основной мембраны, можно говорить о „многоточечной теории“ Эвальда<sup>91</sup>, так как по Эвальду каждому тону соответствует определенная „звуковая картина“ (Schallbild), покрывающая всю основную мембрану.

Теория Эвальда, если ее рассматривать с точки зрения

результатов наблюдения повреждений уха, вряд ли может быть признана справедливой. Повреждения мембраны, вызываемые акустическим путем, помощью тона определенной высоты, в действительности лежат в одной определенной точке, а не распределены по всей поверхности мембраны. Причины неправильности результатов, полученных Эвальдом, повидимому, заключаются в том, что модель мембраны, по своему натяжению и затуханию, не вполне соответствовала действительности.

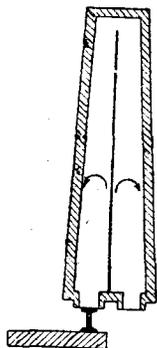


Рис. 41. Образование вихрей у модели мембраны (схематически, по Бекешу).

Бекешу провел интересные исследования по выяснению этого вопроса<sup>92</sup>. Он наблюдал колебания мембраны, помещенной в вязкую жидкость. Он предполагал при этом, что мембрана, натянутая в жидкости с достаточно большим внутренним трением, не может иметь собственных колебаний. Бекешу не нашел никаких определенных узлов колебаний для модели мембраны, погруженной в раствор глицерина. Стробоскопическими исследованиями было обнаружено, что от возбуждаемых участков вдоль мембраны бегут группы волн, амплитуда которых постепенно уменьшается. Далее, им было установлено, что в жидкости, вблизи самой мембраны, образуются вихри (рис. 41 и 42); при низких частотах вихри лежат далеко от окна, при высоких — вблизи него. При очень сильных возбуждениях удалось получить повреждения в определенных местах мембраны. Таким образом оказалось возможным вызвать на этой модели повреждения, аналогичные повреждениям, имевшим место при опытах с животными. Рис. 43 показывает повреждения мембраны, вызванные подобного рода вихрем. В основе исследований Бекешу<sup>94</sup> лежит „одноточечная теория“, хотя механизм действия здесь совершенно другой, чем это предполагал Гельмгольц. Преимуществом этой теории сравнительно с теорией Гельмгольца является то, что здесь менее ясно выступают трудности объяснения колебательного процесса, состоящего из одного колебания.

Незадолго до этого опять затрагивались теоретические вопросы, касающиеся основной мембраны. Кох<sup>94</sup> рассматривал вынужденные колебания модели, аналогичной основной мембране, но в несколько других предположениях, чем

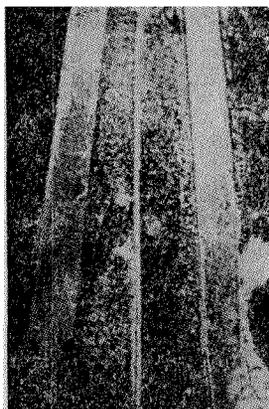


Рис. 42. Образование вихрей у модели мембраны (по Бекешу).

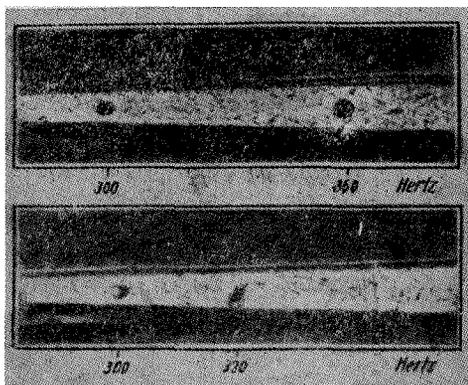


Рис. 43. Разрушение модели мембраны вихревыми образованиями (по Бекешу).

те, что были положены Гельмгольцем в основу его теории. Предполагалось, что мембрана прямоугольна, продольное натяжение мало по сравнению с поперечным, но не исчезающе мало, как это считал Гельмгольц. Далее предполагалось, что область слышимых частот лежит ниже самых низких собственных частот мембраны, что вполне вероятно ввиду малости последней. Это предположение прямо противоположно теории Гельмгольца, предполагавшего, что мембрана с помощью собственных частот анализирует звук. Вычисления, проведенные в этих предположениях, показывают, что стоячие волны возникают как в поперечном, так

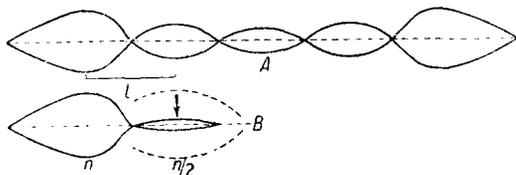


Рис. 44. Стоячие волны на мембране с внутренним заглушением (по вычислениям Коха и Гильдсмейстера).

и в продольном направлении, но так как по предположению мембрана в поперечном направлении сильно натянута, то волнами, распространяющимися в поперечном направлении, можно пренебречь. Продольные волны можно разложить на две системы, из которых каждая начинается на узком крае мембраны и кончается на другой стороне. Рис. 44А изображает систему стоячих волн, возникающую вследствие сложения обеих групп волн; наибольшие амплитуды лежат у краев.

Совершенно очевидно, что эта система волн чрезвычайно похожа на „звуковую картину“, полученную Эвальдом. Таким образом вычисления Коха, повидимому, согласуются с „многоточечной теорией“ Эвальда. Но надо отметить, что дальнейшие вычисления, произведенные самим Кохом и Гильдмейстером<sup>95</sup>, привели к решению первоначального уравнения, указывающему на справедливость „одноточечной теории“. Такое решение возможно при следующих предположениях.

1. Один конец мембраны свободен; тогда исчезают волны, идущие от этого края.

2. Периодическая сила действует особенно сильно на узкий край, а не равномерно на всю мембрану.

3. Затухание возрастает по направлению от одной узкой части до другой. Если эти три условия выполнены, то практически на основной мембране образуется лишь один максимум (рис. 44В), находящийся тем дальше от овального окна, чем ниже возбуждающий тон; это последнее хорошо совпадает с уже неоднократно упоминавшимися исследованиями над поверждениями слуха.

С точки зрения чистоты звукопередачи особенно интересен вопрос о том, как сказываются искажения на субъективном восприятии звука. Раньше занимались преимущественно исследованиями влияния частотных характеристик приборов на чистоту тона; теперь исследуются также и влияния нелинейных искажений на восприятие звука. Для нелинейных искажений характерны „комбинационные тона“ — компоненты, не содержащиеся в первоначальном звуке. Пусть на передающую систему падают два тона с

частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$ ; если система нелинейна, то кроме этих основных тонов, передаются еще комбинационные тона, частоты которых определяются по следующему закону:

$$\omega_n = m\omega_1 \pm n\omega_2 \quad m, n = 1, 2, 3, \dots$$

Обычно особенно сильно заметен первый разностный тон  $\omega_1 - \omega_2$  и суммовой тон  $\omega_1 + \omega_2$ .

Если на систему падает простой синусоидальный тон  $p = p_1 \sin \omega t$ , то вместе с первоначальным тоном, возникают еще и высшие гармонические с частотами  $2\omega, 3\omega \dots$  и т. д., образующиеся по вышеупомянутому закону. По предложению Кюпфмюллера<sup>97</sup> за меру нелинейного искажения принимается так называемый клиррфактор:

$$k = \sqrt{\frac{P_2^2 + P_3^2 + \dots}{P_1^2}},$$

где  $P_1$  амплитуда основного колебания, — единственного, воздействующего на систему,  $P_2, P_3 \dots$  и т. д., — амплитуды обертонов, возникающих вследствие искажения.

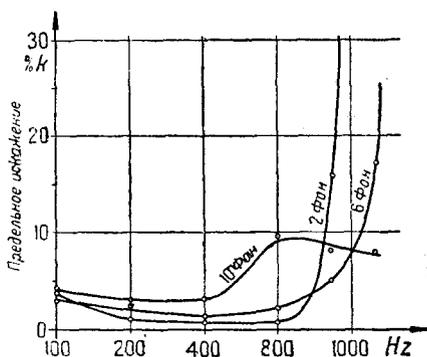


Рис. 45. Зависимость граничного искажения от частоты (по Яновскому).

Яновским<sup>98</sup> была исследована слышимость нелинейных искажений. Искажения создавались в ламповой схеме (рабочая точка на криволинейной части характеристики). Из хода рабочей характеристики можно было вычислить клиррфактор. Зависимость порога слышимости искажений от частоты тона, действующего на искажающую систему („пороговое искажение“), представлено для различных громкостей на рис. 45. Пока высота основного тона лежит ниже 600 герц, первый обертон (единственно заметный при небольшом клиррфакторе), вследствие большей чувствительности как уха, так и телефона к высоким частотам, слышен лучше, чем основной тон; соответственно этому и искажения при низких частотах более заметны, даже при

небольшом клиррфакторе. Если основной тон лежит в тех областях частот, к которым ухо более чувствительно, то обертон, вызываемый нелинейным искажением, слышен хуже и поэтому порог слышимости искажений повышается.

При одновременном действии двух тонов, слышимость нелинейных искажений может быть различной; она зависит как от относительного положения обоих тонов, так и от их положения в слышимой области. Здесь могут иметь место следующие явления.

1. Изменение тембра. Возникают один или несколько новых тонов, которые по отдельности не слышны, но вызывают изменение тембра (пороговое значение клиррфактора 1—6%).

2. Становится слышимым отдельный тон. Вновь возникающий тон слышен в искаженном звуке (пороговое значение от 0,3 до 1,4%).

3. Тон становится хриплым. Новые тона, вызванные искажением, образуют баения с первоначальным тоном или друг с другом, вследствие чего искаженный тон кажется шероховатым (пороговое значение от 1,4 до 2%).

Практически измерения граничного искажения особенно существенны при передаче музыки. Следующая таблица дает результаты исследований, произведенных над пятью лицами.

Граничное искажение		Слышимость
Скрипка и рояль	9,1	Хриплый тон
	7,2	Хриплый тон
	11,5	Изменение тембра, треск
	7,2	Хриплый тон
	5,1	Тон звучит не чисто
Оркестр	3,5	Царапанье, треск, хрипкость
	3,0	
	3,5	
	4,9	
	3,0	

Из работ по изучению голоса необходимо упомянуть об исследованиях самого механизма голоса, а также об исследованиях звукового поля человеческого голоса (как, например, направленность голоса).

В основном правильная теория возникновения гласных при пении была дана Гельмгольцем. Струя воздуха идет из легких через голосовую щель в гортань; возбуждение голосовых связок при этом аналогично возбуждению флейты. Масса и упругость голосовых связок определяют собою высоту основного тона. Звук богат обертонами, из которых часть усиливается резонансом полости рта. Эти усиленные обертоны образуют форманты. Доказательство правильности воззрений Гельмгольца лежит в строгой периодичности колебательного процесса для гласных, спетых на определенной высоте.

Механизм фонации схематически представлен на рис. 45. При повышении давления в дыхательном горле голосовые связки расходятся; увеличение поперечного сечения голосовой щели вызывает уменьшение разности давлений между дыхательным горлом и гортанью, вследствие чего голосовые связки опять сходятся, разность давлений опять возрастает и т. д.

Механизм возникновения звука аналогичен механизму самовозбуждения лампового генератора. В ламповом генераторе постоянный ток (от анодной батареи) превращается вследствие самовозбуждения колебательной системы в переменный.

Возникновение гласных можно наглядно разобрать на электрическом эквиваленте. В правой части рис. 46 приведена схема лампового генератора с самовозбуждением, работающего на контур, связанный с антенной. Контур  $I$  электрический эквивалент системы голосовых связок, анодная батарея соответствует резервуару давления — легким. Стрелка  $\rightarrow$  означает обратную связь (в акустическом случае действие колебаний голосовых связок на струю воздуха). Необходимо подчеркнуть, что связь не должна пони-

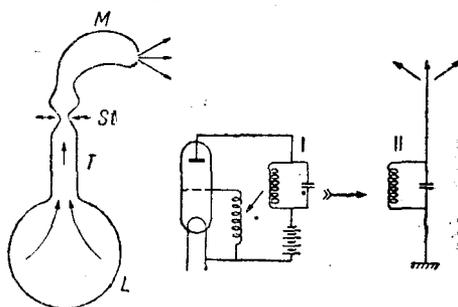


Рис. 46. Генератор с самовозбуждением в качестве эквивалента человеческого голоса.

маться как простая. В акустическом случае имеет место комбинированная связь (связь через трение и массу в голосовой щели, упругая связь в голосовых связках) в противоположность электрически наиболее частому случаю — чисто индуктивной связи. Процесс в контуре *I* влияет на процесс в контуре *II* (в акустическом случае на резонирующую полость рта, принимаемую для упрощения за простую систему <sup>98</sup>) — и на антенну (отверстие рта). Связь здесь также должна считаться комбинированной.

Теория возникновения гласных в общей форме, кратко изложенной выше, еще не разработана. На электрическом эквиваленте были разобраны лишь колебания голосовых связок — работа Вегеля <sup>99</sup>. В этой работе были определены также условия звучания, условия заглушенного звучания и условия стационарного колебательного состояния голосовых связок. Чрезвычайно важно констатировать тот факт, что изменение амплитуды колебаний голосовых связок вызывает некоторое изменение частоты; член дифференциального уравнения, определяющий трение, сильно зависит как от акустической самоиндукции и емкости, так и от величины и формы отверстия голосовой щели <sup>100</sup>.

Зависимость только что упомянутой величины и сопротивления (воздушной) струи от амплитуды обуславливает — на что до сих пор не указывалось — то, что звук гортани богат обертонами; здесь мы имеем аналогию с ламповым генератором с сильным односторонним возбуждением. Большое количество обертонов в звуке гортани является основным условием теории Гельмгольца — на что указывалось выше. В этом отношении процессы в акустических системах аналогичны процессам в электрических; в последних, по выходе за прямолинейную часть характеристики возникают высшие гармонические, что может служить признаком того, что достигнуто конечное стационарное состояние <sup>101</sup>.

Вопросам направленного действия голоса посвящены работы Тренделенбурга <sup>102</sup>. Направленность человеческого голоса обуславливается, с одной стороны, экранирующим действием головы, а с другой стороны — рупорообразным действием рта и в некоторых случаях, при отдельных зву-

ках, как например шипящих плоскостным распределением звука. Теоретически охватить влияние этих различных особенностей органов речи чрезвычайно трудно. Экспериментальные исследования были проведены следующим образом.

Исследуемое лицо помещалось на вращающуюся станину, на которой был закреплен микрофон, регистрировавший амплитуду давления на оси и середине рта во время движения.

В комнате находился еще другой микрофон, воспринимавший „сторонне“ излучаемый при вращении станины звук. Микрофонные токи записывались осциллографически. Сравнение осциллограмм

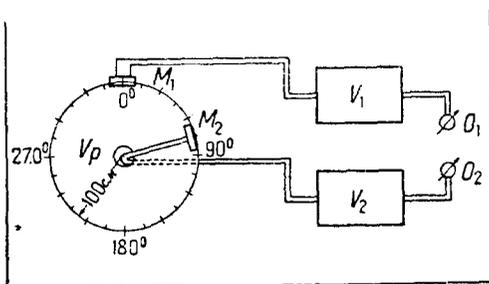


Рис. 47. Схема исследований направленности человеческого голоса.

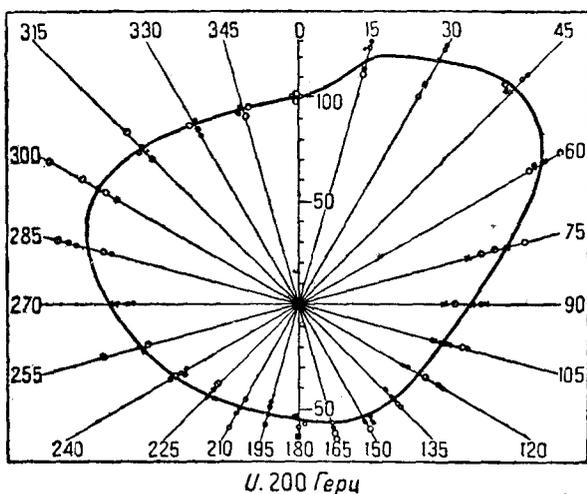
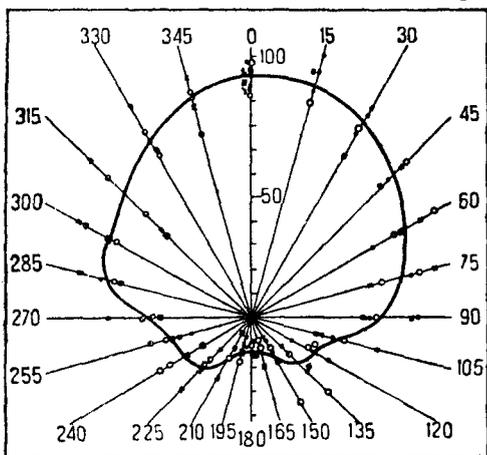


Рис. 48а. Направленное действие голоса при  $U$ .

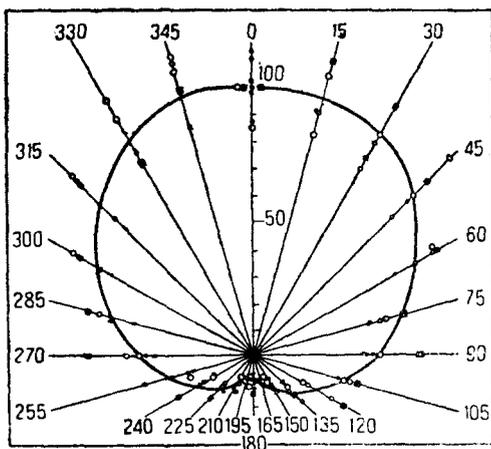
давало диаграмму направленного действия (рис. 48 а, б, с). Направленность действия мала при  $U$  (область частот около 200 герц), несколько больше при  $I$  (3000 герц) и особенно

резко заметна при *S* (форманты в области 5000—6000 герц). Из рис. 48с видно, что при *S* амплитуда давления позади головы составляет лишь



*J* 3300 (220) Герц

Рис. 48b. Направленное действие голоса при *I*.



*S* 5-6000 Герц

Рис. 48с. Направленное действие голоса при *S*.

10% давления на нормали к середине рта. Таким образом назад идет лишь около 1% энергии звука. Далее, из диаграммы видно, что более или менее равномерная область идет на 45% от средней нормали. Если приемник звука находится за пределами этого угла, то внятность речи уменьшается, причем особенно исчезают высшие форманты шипящих звуков.

Людер<sup>104</sup> исследовал методом октавного анализа распределение средних и максимальных значений звуков речи по областям различных октав акустического спектра. Некоторые результаты его исследований приведены на рис. 49—50. Интересен тот факт, что низкие частоты в речи содержатся лишь в незначительной мере и особенно сильно выра-

жена область в 800 герц. Наиболее существенной составной частью немецкой речи является форманта *A*. Наблюдения

других исследователей, в частности исследования Штумпера, Вагнера, Крэндалла, Тренделенбурга и других подтверждают эти результаты. В наиболее высокой октаве (от 6400 до 12000 герц) лежат по большей части компоненты  $S$ ,  $Z$ ,  $f$  и  $ch$ .

Аналогичные исследования были проведены Сивьяном<sup>105</sup>. При этом были получены интересные результаты. При увеличении силы голоса основная масса различных компонент перемещается к высоким частотам. Это имеет особое значение для неестественно громких искусственных передач; в таких передачах тембр звука становится глухим, что в естественном голосе не имеет места ввиду вышеуказанных объективных изменений.

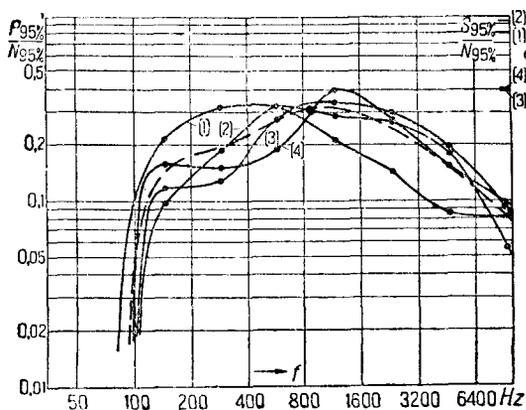


Рис. 49а. Распределение звуков человеческого голоса по Людеру (мужские голоса четырех лиц с различной высотой голоса). Спектр максимальных значений.

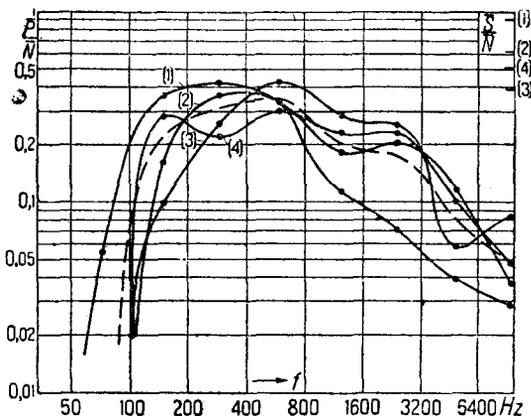


Рис. 49б. Распределение звуков человеческого голоса по Людеру (мужские голоса четырех лиц с различной высотой голоса). Спектр средних значений.

## VI. АРХИТЕКТУРНАЯ АКУСТИКА И АКУСТИКА ПОМЕЩЕНИЙ

### I. О Т Р А Ж Е Н И Е

Исследования отражения звуковых волн от стен помещений раньше производились, по большей части, на модели

уменьшенного масштаба или графически на плане здания. Развитие объективных методов записи звука с помощью

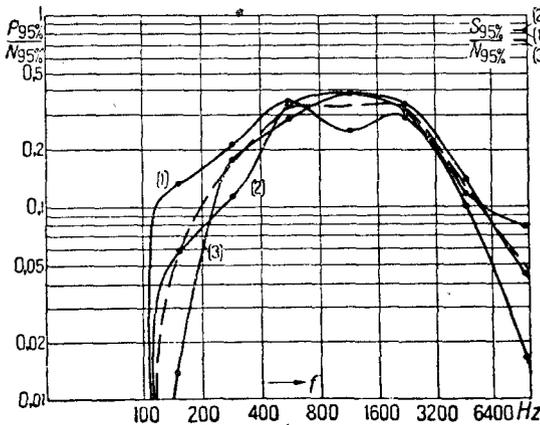


Рис. 50а. Распределение звуков человеческого голоса по Людеру (три женских голоса различной высоты). Спектр максимальных значений.

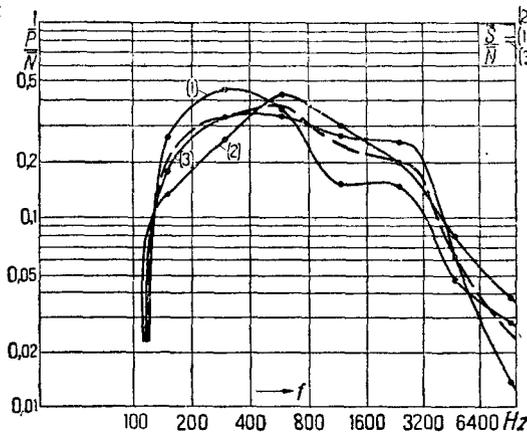


Рис. 50б. Распределение звуков человеческого голоса по Людеру (три женских голоса различной высоты). Спектр средних значений.

микрофона и осциллографа дало возможность производить подобные исследования другими способами. Шиндлин<sup>107</sup> исследовал различные способы таких измерений; в некоторых случаях записывался осциллографически отраженный звук револьверного выстрела (испытание коротким импульсом), в других — отражение периодически повторяющегося короткого тона, даваемого громкоговорителем (испытание тоном). Шарштейн исследовал этими способами вестибюль Высшей технической школы в Мюнхене — помещение приблизительно 5,90 м вышины и с радиусом кривизны потолка равным 10,72 м. На рис. 51 дан ход лучей в этом

помещении, полученный построением. На рис. 52 дана соответствующая осциллограмма. Звуковые лучи в этом случае распределяются после первого отражения по всей ком-

нате, затем отражаются от пола и отразившись еще раз собираются на потолке, в точке, симметричной по отношению к исходной точке. Таким же образом они возвращаются назад к исходной точке. Общий путь лучей составлял около 46 м. Рис. 52 показывает весьма отчетливо эхо (обозначенное на рис. точкой 4); точкой 8 отмечено эхо, наступающее после двукратного пробега этого пути, т. е. после прохождения расстояния около 92 м; точке 2 соответствует эхо, вызванное боковыми лучами.

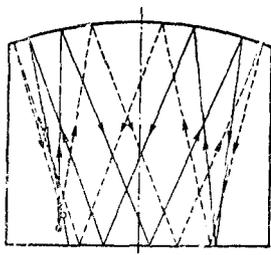


Рис. 51. Сечение залы Мюнхенской высшей технической школы.

Исследования, проведенные в большой физической аудитории Высшего технического училища в Мюнхене, показали-

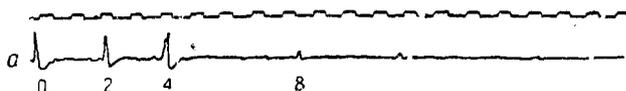


Рис. 52. Явления эхо (по Шарштейну).

что при возбуждении короткого импульса возникают „тона отражения“ (Reflexionstöne), звук, отраженный от первого ряда скамеек  $d$  и следующие за ним отражения от других

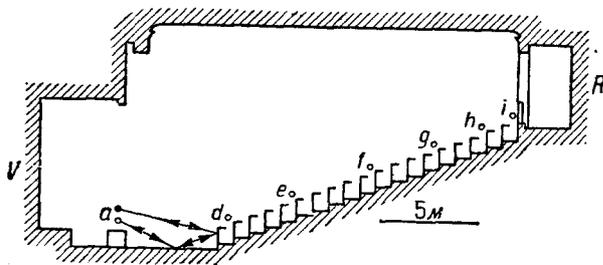


Рис. 53. Сечение новой физической аудитории Мюнхенской высшей технической школы.

рядов, записывались микрофоном, находившимся в точке  $a$  (рис. 53). Вычисляя из расстояния между скамьями высоту тона, получаем 212 герц, что хорошо совпадает с осцилло-

графической записью (рис. 54 точки 1, 2, 3, 4). Чрезвычайно наглядны исследования, произведенные Шарштейном и Шинделином<sup>109</sup> в актовом зале Фрейбургского уни-



Рис. 54. Образование тонов отражения от ряда скамеек аудитории (по Шарштейну).

верситета, отличающегося особо плохой акустикой. Эти исследования дают пример того, какие искажения могут возникнуть в зале, поверхности которого обладают фокусами.

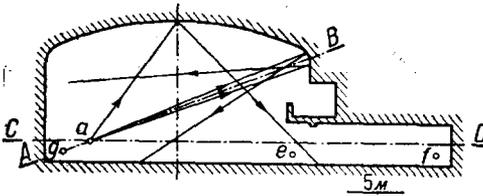


Рис. 55. Продольное сечение актового зала Фрейбургского университета.

На рис. 55 дано продольное сечение актового зала, на рис. 56 план его основания и на рис. 57 — косое сечение, имеющее форму эллипса. Пюпитр оратора помещается приблизительно в фокусе эллипса; звуковые лучи, идущие от пюпитра в плоскости сечения, собираются в другом фокусе и после двукратного отражения вновь собираются в исходной точке. Осцилло-

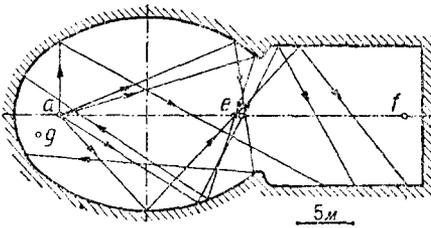


Рис. 56. План основания актового зала Фрейбургского университета в Брейслау.

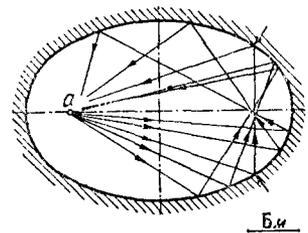


Рис. 57. Косое сечение зала.

граммы рис. 58 отчетливо показывают как эхо возвращается к пюпитру с интенсивностью, весьма незначительно ослабленной по сравнению с первоначальной.

В рассмотренных выше случаях отражения от стен помещения весьма заметны для субъективного наблюдения. Эхо возвращалось к исходной точке через сравнительно большой промежуток времени и с большой силой; промежуток времени при этом был настолько велик, что эхо наступало после того, как был начат новый слог, в результате отдельные слога смешивались самым невообразимым образом <sup>110</sup>.

Работы, рассмотренные выше, занимались исключительно вопросами искажающего действия отражения, но существует ряд работ, относящихся к вопросам использования отражения для улучшения акустики зданий. Нюйенс и Филлиппи <sup>111</sup> рассчитали звуковой рефлектор, отражающий звуковые лучи, исходящие из точечного источника, таким образом, что они излучались цилиндрически симметрично. Рефлектор представлял собою

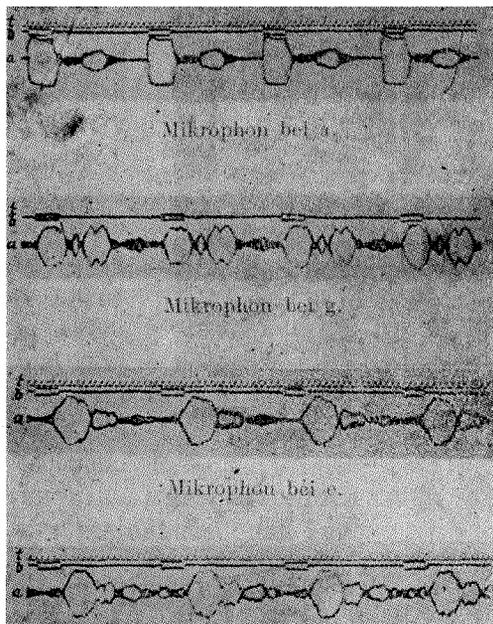


Рис. 58. Ход звукового процесса в актовом зале (по Шарштейну и Шинделину).

поверхность четвертого порядка с уравнением

$$\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = \sqrt{(x+a)^2 + y^2} - b.$$

Звуковое возбуждение лежит преимущественно в поверхности, проходящей через источник звука и перпендикулярной к оси параболоида. Если различные слушатели находятся в одной плоскости, то это изменение звукового поля бывает чрезвычайно выгодным <sup>112</sup>.

Конструкция подобного звукового рефлектора была опи-

сана Фоккером. На рис. 59 изображена готовая модель такого рефлектора. Практические исследования с рефлекторами были проведены в соборе St. Bavo в Гаарлеме; в этих опытах была получена хорошая внятность речи на значительных расстояниях от рефлектора <sup>114</sup>.

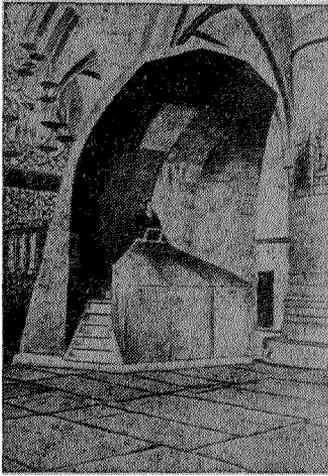


Рис. 59. Звуковой рефлектор (по Фоккеру).

На рис. 60 (пунктирными линиями) указаны зоны достаточной внятности речи при звуковых рефлекторах, установленных: один — при входе на хоры, другой — на церковной кафедре, находящейся в четвертом простенке (на рис. точка *P*). Из рис. 60 видно, как выгодно, с точки зрения улучшения внятности речи, применять излучающую систему, которая концентрировала бы звук в той плоскости, где находятся слушатели. Таким способом можно значительно

улучшить внятность речи в залах; но необходимо отметить, что для получения направленности, с помощью ли рефлекторов

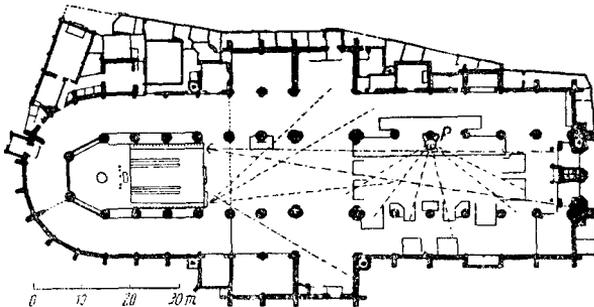


Рис. 60. Внятность речи в соборе St. Bavo в Гаарлеме (пунктирные линии указывают, на каком расстоянии речь является еще понятной).

или громкоговорителей соответствующей конструкции, необходимо применять поверхности, размеры которых велики по

сравнению с длиной волны звука. Такие сооружения в залах сильно бросаются в глаза и потому часто отклоняются из соображений чисто архитектурных. Таким образом архитектурные и акустические требования находятся здесь в неразрешимом пока противоречии.

## 2. Поглощение.

Чрезвычайно важные способы определения коэффициентов поглощения звука были даны Сабинном: коэффициент поглощения звука различных материалов устанавливается из изменения реверберации в помещении, поглощение которого известно. Этот прием особенно выгоден тем, что значение коэффициента определяется в условиях, имеющих место в обычной практике. Звуковые волны при этих измерениях идут так же, как это имеет место почти во всех практических случаях, в различных направлениях, задаваемых статистически. Так как поглощение звука, вообще говоря, зависит от угла падения звуковой волны на поверхность (угол берется по отношению к нормали к поверхности), то этот метод имеет принципиальное преимущество по сравнению с другими методами, в которых звуковые волны распространяются в определенном направлении.

В последнее время с развитием осциллографических методов измерения реверберации, особенно со введением приборов, автоматически измеряющих реверберацию, метод Сабина получил большое применение. В Германии этот метод принят больше всего в „зале эхо“ Института Герца<sup>117</sup>; в Америке этим методом пользуется Бюро стандартов<sup>118</sup>.

Перед обсуждением результатов, полученных в различных работах, необходимо сделать еще некоторые замечания относительно принципиальной зависимости между поглощением звука, временем реверберации и объемом помещения; соотношение между этими величинами имеет большое значение как для определения искомой величины коэффициента поглощения звука, так и для проблемы реверберации.

Если выполнены условия полной беспорядочности движения звука в помещении, т. е. одинакового распределения звука по всем направлениям и отсутствия концентраций

звука, обусловленной полыми, вогнутыми поверхностями или чем-либо аналогичным этому, то, согласно Сабину, действительны следующие соотношения:

$$E = E_0 e^{-2at} = E_0 e^{-\frac{ca_m F}{40} t},$$

$$E_0 = \frac{4L}{ca_m F}, \quad \delta = \frac{ca_m F}{8V}, \quad T = 0,163 \frac{V}{a_m F},$$

где  $L$  — мощность источника звука,  $E$  — мгновенная плотность энергии,  $E_0$  — энергия в стационарном состоянии,  $a_m$  — средний коэффициент поглощения,  $F$  — площадь поверхности, ограничивающей помещение,  $V$  — объем помещения,  $T$  — время реверберации и  $c$  — скорость звука.

К. Шустер и Э. Ветцман дали точный расчет реверберации в помещении определенной формы; вычисление времени реверберации формулировалось как краевая задача распространения звуковой волны. Для кубического пространства заглушение получалось как

$$\delta_{\text{кубич.}} = \frac{ca'_m F}{4\sqrt{3}V},$$

для цилиндрического пространства, у которого диаметр равен высоте,

$$\delta_{\text{цилиндрич.}} = \frac{ca'_m F}{6\sqrt{2}V},$$

и для шара

$$\delta_{\text{шар.}} = \frac{ca'_m F}{12V},$$

отсюда видно, что значение, приведенное выше:

$$\delta = \frac{ca'_m F}{8V},$$

лежит между значениями для куба и цилиндра.

В аналогичных работах обсуждались вопросы оптимального времени реверберации. С. Лифшиц пришел к эмпирической формуле для оптимального времени реверберации, предполагая, что в помещении любых размеров  $T_0 \lg E_0$  постоянно ( $T$  означает время действительной реверберации, т. е. время между выключением возбуждения и уменьше-

нием плотности энергии до значения порога слышимости); при этом оказалось, что время оптимальной реверберации возрастает с объемом помещения. Шустер и Ветцман<sup>120</sup> критически обсуждали этот вопрос, причем оказалось, что нельзя предполагать мощность звука независимой от величины помещения, так как практически в больших помещениях применяется большая мощность звука. Предполагая, что  $L$  возрастает с  $\sqrt[3]{V}$ , оказывается, что в противоположность условиям Лифшица<sup>121</sup>, оптимальное время реверберации возрастает с объемом лишь весьма незначительно.

В дальнейшем мы обсудим вопрос о том, действительно ли согласно предположению Лифшица,  $T_0 \lg E_0$

постоянно, или  $E_0$  изменяется как  $\sqrt[3]{V}$ , а  $T_0$  постоянно; в последнем случае оптимальная реверберация от объема зависят весьма мало. Наконец, будет выяснено, как складываются соотношения в присутствии мешающего фона, уменьшающего эффективную реверберацию. В случае, когда благодаря наличию фона конечный уровень соответствует интенсивности в 10 раз большей, нежели в тихом помещении, то оптимальная реверберация опять несколько возрастает с увеличением объема помещения. На рис. 61 представлены значения оптимальной реверберации по предположению Лифшица (кривая 1) и по трем другим предположениям, приведенным ниже (кривые 2—4). Вообще, чрезвычайно трудно судить о правильности того или иного представления и особенно трудно это сделать для понятия, столь зависящего от субъективных моментов, как реверберация.

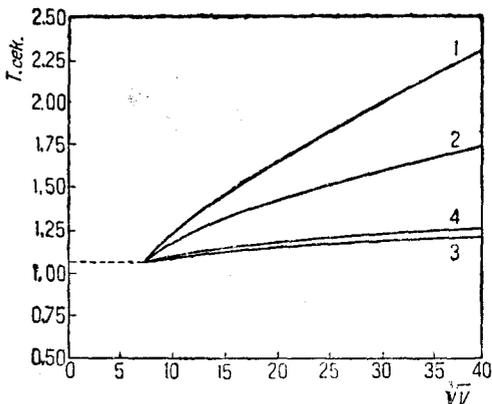


Рис. 61. Зависимость времени оптимальной реверберации от объема помещения, при различных предположениях (по Шустеру и Ветцману).

Мейер и Юст регистрировали с помощью микрофона, усилителя и быстро устанавливающегося крутильного гальванометра процесс реверберации, создаваемой громкогово-

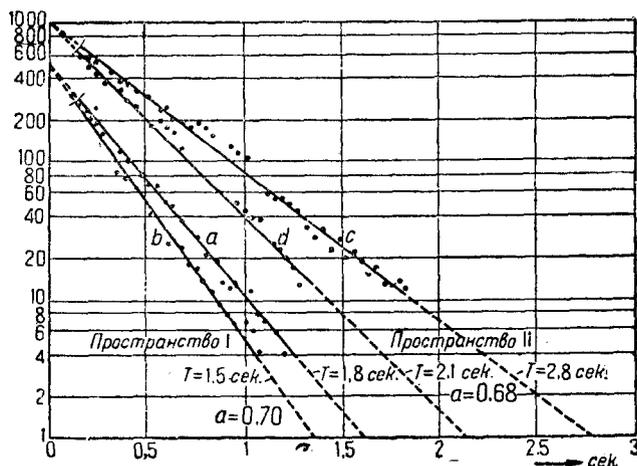


Рис. 62. Кривые реверберации звуковой смеси (по Мейеру).

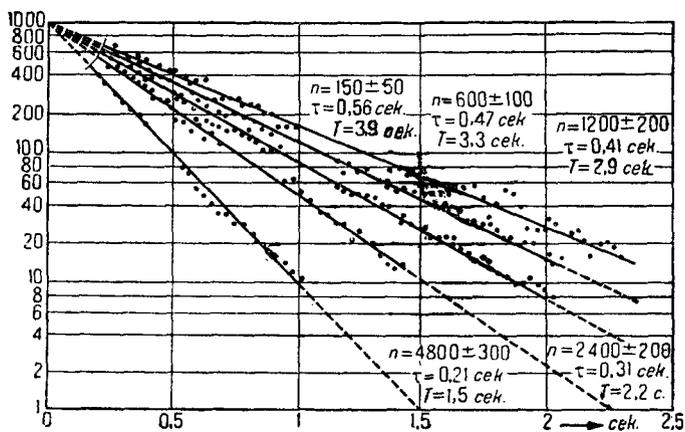


Рис. 63. Измерения абсорбции звука различными людьми (по Мейеру).

рителем в помещении объемом в  $120 \text{ м}^3$ . Во избежание интерференции громкоговоритель возбуждался воющими тонами. Нанося полученные кривые на сетку, где давления откладываются в логарифмическом масштабе, получаем —

как этого и требует теория реверберации — прямые линии; рис. 62 дает „прямые реверберации“ при воющих тонах в различных областях частот. Прямые реверберации пересекают параллель оси абсцисс, построенную для давления, равного  $10^{-3}$  первоначального, в точках, соответствующих „времени реверберации“ Сабина; таким образом время реверберации можно определить графически из чертежа. Из рисунка видно, что в данном случае поглощение звука имеет максимум при 4800 герц и минимум при 150 герц.

Рис. 63 дает прямые реверберации двух различных помещений перед входом трех исследуемых лиц и после их входа; кривая *a* — прямая реверберации помещения *I* до входа в него исследуемого лица, кривая *b* — то же, но после входа лица; кривые *c* и *d* соответственно то же для помещения *II*. Между временем реверберации  $T_1$  перед внесением звукопоглощающего вещества, объемом помещения  $V$ , звукопоглощением  $a$ , временем реверберации по внесении звукопоглощающего вещества  $T_2$  и результирующим поглощением звука  $a_1$ , существуют следующие соотношения:

$$aT_1 = k - V,$$

$$(a + a_1)T_2 = kV,$$

отсюда, вычисляя поглощение, производимое исследуемыми лицами в вышеупомянутых опытах, — получается 0,70 для помещения *I* и 0,68 для *II* — два хорошо совпадающих значения. Далее оказалось, что поглощение звука людьми сильно зависит от частоты; некоторые значения даны на следующей таблице.

Поглощение на чловека . . . . .	$150 \pm 50$	$300 \pm 100$	$600 \pm 100$
ε . . . . .	0,04	0,1	0,7
Поглощение на чловека . . . . .	$1200 \pm 200$	$2400 \pm 200$	$4800 \pm 300$
ε . . . . .	0,8	1,4	1,4

На поглощение звука сильно влияет то, находится ли звукопоглощающее вещество непосредственно на стенах комнаты или на расстоянии от них. В первом случае звукопоглощающее вещество находится в узле скорости, и поглощение мало; во втором оно сдвигается ближе к пучности скорости и поглощение увеличивается. Результаты таких исследований, относящиеся к пористым веществам, представлены на следующей таблице.

	Плотность	10 см	Среднее
150 ± 50	0,05	0,25	0,35
300 ± 100	0,2	0,4	0,5
600 ± 100	0,2	0,65	0,65
1200 ± 200	0,5	0,7	0,65
2400 ± 200	0,7	0,7	0,7
4800 ± 300	0,6	0,6	0,75

Зависимость поглощения звука от угла падения звуковой волны (о чем уже упоминалось выше) была исследована в работах Рейля, Крайслера и Снайдера<sup>124</sup>. Результаты исследований приведены в следующей таблице.

Вещество	Угол падения	Частота	
		512	1024
Стекло . . . . .	0°	0,038	0,018
	45	0,033	0,014
	60	0,036	0,035
Масонит . . . . .	0°	0,13	0,19
	45	0,10	0,14
	60	0,12	0,20
Целотекс ВВ . . .	0	0,25	0,34
	45	0,18	0,25
	60	0,22	0,35
Акустолит . . . .	0	0,28	0,33
	45	0,20	0,22
	60	0,23	0,28

Исчерпывающие исследования по влиянию звукопоглощающего материала в акустических трубопроводах были проведены Тишнером<sup>125</sup> с помощью метода компенсационного микрофона, о котором уже говорилось выше \*.

\* См. У. Ф. Н., 11, стр. 661, 1931

Располагая различным образом звукопоглощающий материал вдоль трубы оказалось, что эффект заглушения зависит в значительной мере от места, в котором находится материал. Максимальный эффект имеет место тогда, когда вещество находится в пучности скорости стоячей волны. Положение вещества относительно поперечного сечения не играет существенной роли. Эффект заглушения сильно возрастает с частотой. Действие вещества, расположенного поперек оси трубы, определяется двумя величинами, значение которых приведены в нижеследующей таблице сопротивления инерции массы  $\omega M$  и активного сопротивления  $R$ .

	$M \omega \cdot 10^{-3} \text{ г. см}^{-2}$	$R \text{ в см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$
Мессинский газ очень плотный . . .	0	0,00855
Мессинский газ очень тонкий . . .	0,150	0,150
Шелковый тюль . . . . .	0	0,107
Японский шелк . . . . .	0,274	1,75
Фланель . . . . .	4,15	10,70
Полотно (непромокаемое) . . . . .	17,3	12,0
Вата . . . . .	0,452	2,06
Вата прессованная . . . . .	0,452	3,22
Бумага обыкновенная . . . . .	21,00	8,00

Таким образом оказывается, что для тканей активное сопротивление приблизительно пропорционально весу единицы поверхности; то же самое справедливо и для эффективной массы.

### 3. ЗВУКОПРОНИЦАЕМОСТЬ

Дэвис и Литтлер <sup>126</sup> провели измерения звукопроницаемости различных веществ и строительных материалов, в зависимости от частоты. Звуковой луч от громкоговорителя направлялся из одного помещения (заглушенного), через отверстие, в другое (также заглушенное). В последнем находился микрофон, которым определялась интенсивность  $E_1$  при открытом отверстии и интенсивность  $E_2$  при закрывании отверстия перегородкой из испытуемого вещества. Если

обозначить отношение  $\frac{E_2}{E_1}$  как звукопроницаемость (англ. transmission ratio), то обратное значение  $\frac{E_1}{E_2}$  будет коэффициент ослабления звука (англ. reduction factor). Чрезвычайно важно отметить тот факт, что звуковые лучи могут передаваться также и через поперечные колебания промежуточной перегородки. Значения коэффициента ослабления звука в зависимости от частоты даны на следующей таблице (при основании логарифмов равном 10).

Вещество	Толщина в дюймах	Вес фунтов кв. фут	Герц				
			300	500	700	1000	1000
Войлок один слой . . . . .	0,6	0,6	—	0,6	0,65	0,65	0,6
"  два слоя . . . . .	1,2	1,2	—	1,05	1,15	1,15	1,2
"  три " . . . . .	1,8	1,8	—	1,40	1,65	1,75	2
"  четыре слоя . . . . .	2,4	2,4	—	1,85	2,05	2,30	2,65
Парусина . . . . .	0,037	0,14	0,45	0,85	—	1,45	1,5
Шероховатая бумага для рисования . . . . .	0,088	0,031	0,05	0,15	—	0,20	0,35
Фибровая пластинка № 2 . . . . .	0,46	0,66	1,40	1,90	1,90	2,70	3,20
"  "  № 4 . . . . .	0,42	0,57	—	1,65	2,0	2,60	2,60
Двойная фибровая пластинка с воздушным промежутком (№ 2 и № 4, воздушный зазор 23") . . . . .	—	—	2,80	4,0	3,8	4,9	5,9
Цементированная кирпичная стена . . . . .	4,5	4,1	3,85	4,15	5,15	5,90	5,50

Таблица показывает, что звукоизоляция тем лучше, чем больше масса разделяющей стенки; далее, она показывает, что особенно хорошо изолируют звук двойные стенки с воздушным промежутком. В бюро стандартов измерения звукоизоляции производились несколько другим способом: для измерения брались две сильно отражающие комнаты, соединившиеся отверстием. В одной из комнат создавалась громкоговорителем некоторая определенная плотность энергии  $E_s$ ; в другой же микрофоном наблюдалась плотность энергии  $E_h$ ; закрывая отверстие перегородкой из исследуемого мате-

риала, энергии становились  $E'_s$  и  $E'_h$ . Мерой ослабления звука является отношение:

$$\frac{E'_h}{E'_s} \cdot \frac{E_s}{E_h}$$

Исследование Крайслера и Снайдера<sup>127</sup>, проведенные этим методом, показали, что логарифмический коэффициент ослабления звука возрастает с массой разделяющей перегородки (при условии ее однородности). Это было подтверждено для всевозможных перегородок, начиная от тонкого картона до толстых кирпичных стен.

Мейер и Юст<sup>128</sup> исследовали звукопроницаемость одним из описанных выше методов (см. У. Ф. Н. 1931, вып. 4, стр. 667). Звук воспринимался одним микрофоном в том помещении, где звук возбуждался, а другим — в помещении, куда звук проникал из первого помещения через перегородку; громкости, даваемые обоими микрофонами, уравнивались субъективным сравнением помощью аттенюатора. Величина активного сопротивления являлась мерой ослабления звука.

Обозначая заглушение в неперах через  $b$ , имеем  $e^{-b} = \frac{p_n}{p_s}$  (равно отношению среднего давления в помещении, где звук производится, к среднему давлению в помещении, куда звук проникает через перегородку).

Определение коэффициента ослабления звука не однозначно, как это показывают исследования. Для  $b$  получают следующие значения.

	150	300	600	Герц 1200	2400	4000
Легкая стена . . . . .	2,0	2,1	1,9	2,0	2,0	2,3
Массивная стена . . . . .	3,7	4,1	5,1	5,1	5,6	—
	5,2	5,8	6,1	6,7	7,1	8,6

Мейер<sup>129</sup> вывел из этого, что отношение энергии, излучаемой испытуемой перегородкой в помещение, где производятся испытания, к общей энергии, падающей на перего-

родку, можно определить как звукопроницаемость. Цифровые значения звуковой изоляции должны давать натуральный логарифм обратного значения звукопроницаемости. Для того чтобы сравнивать звукопроницаемость, определенную таким способом, с звукопроницаемостью, полученной одним из упомянутых выше способов, необходимо вносить поправку на поглощение помещения, где производятся исследования.

Укажем еще на то, что определение звукопроницаемости, согласно предложению  $A E F$ , несколько изменилось в лучшую сторону; согласно этому предложению шкала громкости должна строиться по десятичным логарифмам. Если  $E_1$  и  $E_2$  суть силы звука, измеряемые физическими приборами, то слышимые громкости будут  $10 \lg_{10} \frac{E_1}{E_2}$  фонов <sup>130</sup>, или относя к амплитудам давления  $P_1$  и  $P_2$ , имеем:  $20 \lg \frac{P_1}{P_2}$  „фонов“ \*.

Для того чтобы значения таблицы на стр. 284 выразить в этих единицах, необходимо их умножить на 10; значения таблицы на стр. 285 необходимо умножить на 8,67.

Коснемся еще кратко вопроса звукопроницаемости светоотражающих экранов, употребляемых в звуковых кинотеатрах, где громкоговорители помещаются за экраном. При применении для экранов тонких звукопроницаемых тканей получается значительная потеря яркости. Гопкинс <sup>131</sup> нашел, что для звукового кино вполне пригодны экраны, покрытые небольшими отверстиями, общая площадь которых не превышает 5% поверхности экрана; при этом не получается значительных потерь громкости, яркость же меняется весьма незначительно.

---

\* В американской и в нашей литературе термину „фон“ соответствует одинаково определяемая логарифмическая единица уровня громкости — децибел. Прим. перев.

ЛИТЕРАТУРА

80. J. Tröger, *Phys. Z.*, 31, 26, 1930. См. также West, „Measurements of the acoustic impedance of Human ears“, *Past, Off. Electr. Eng. J.* 2', 293, 1929.

81. См. Успехи Физич. Наук, 11, 661, 1931.

82. Сильное изменение чувствительности уха с частотой не может быть объяснено только зависимостью сопротивления барабанной перепонки от частоты; очевидно, в этом играют роль процессы в звукопроводящей части уха, а может быть и процессы в улитке и в нервной системе.

83. По вопросам характеристики направленности слуха вследствие экранирующего действия головы см. F. A. Firestone und D. L. Rich, *Phys. Rev.* (2), 33, 634, 1929, и измерения B. Langenbeck в статье Experimentelles und theoretisches zur Hörschwellenbestimmung, *Pflügers Archiv*, 226, 11, 1930. Необходимо отметить, что для направленности слуха имеет большое значение тот факт, что звук при косом угле падения, достигает ушей с некоторой разностью времени. Об этом см. Z. Hochfreq. 28, 88, 1926, E. M. v. Hornbostel und M. Wertheimer. См. также H. v. Békésy, *Phys. Z.*, 31, 824, 57, 1930.

84. Вопросов трансформации давления слуховыми косточками мы в этом схематическом обзоре касаться не будем.

85. H. v. Helmholtz, *Die Lehre von den Tonempfindungen*, 6 Aufl. S. 639, Braunschweig 1913.

86. См. H. Held und F. Kleinknecht, *Pflügers Archiv*, 216, 1, 1927; там же имеются подробные указания литературы.

87. По этим вопросам и дальнейшим см. Gildemeister, *Probleme und Ergebnisse der neueren Akustik*, Z. Hals-, Nasen- u. Ohrenheilkunde, 27, 299, 1930.

88. См. E. Meyer *Handbuch d. Physik*, von H. Geiger u. K. Scheel, Bd. VIII, S. 527 ff. Berlin 1927.

89. В последнее время H. Fletcher рассчитал колебания основной мембраны в лимфатической жидкости, *Journ. Acoust. Soc. of Amer.*, 18, 311, 1930.

90. J. R. Ewald, *Pflügers Archiv*, 76, 147, 1899; 93, 485, 1903; 131, 188, 1910.

91. См. указанную работу M. Gildemeister (прим. 88), S. 319.

92. G. v. Bekesy, *Phys. Z.*; 23, 793, 1928.

93. Кратко укажем на работы G. v. Békésy, подтверждающие его результаты и дающие дальнейшие разъяснения. В указанной работе колебания основной мембраны изучались на анатомическом препарате (см. работу, указанную выше — прим. 93, стр. 806 ff). Проводились работы и по исследованию влияния усталости уха и статически действующего на барабанную перепонку давления на способность уха различать громкость звука (*Phys. Z.*, 30, 115, 1929); были работы, занимавшиеся теорией колебаний и амплитудными и частотными заменениями тонов

Phys. Z., 30, 721, 1929). Результаты исследований подтверждают изложенное выше.

94. Н. Koch, Z. f. Sinnesphysiol., 59, 15, 1928. На теоретич. работу Н. Fletcher указания были сделаны выше (прим. 90).

95. См. Gildemeister (прим. 87), стр. 299.

96. Кв. Kupfmüller, Fachber. der 31. Jahresvers. V. D. E., S. 87, 1926.

97. W. Janovsky, E. N. T., 6, 421, 1929.

98. О том, что гортань и полость рта представляют связанные системы см. J. B. Grandall. Bell. Syst. Techn. Journ. 6, 100, 1927; также Z. Hochfr., 32, S. 204, 1928.

99. R. L. Wegel, Bell. Syst. Techn. Journ., 9, 207, 1930.

100. При пении какой-либо ноты артистом изменение интенсивности компенсируется изменением напряжения голосовых связок. При разговорных звуках эта зависимость обуславливает своеобразный процесс выравнивания высоты тона между отдельными звуками.

101. Сильнее всего заметна эта зависимость в нижнем регистре, где в течение некоторого промежутка времени голосовые связки бывают сомкнуты; колебания при этом особенно бывают богаты обертонами. Если голосовые связки расходятся лишь на небольшой промежуток времени — малый по сравнению с длительностью периода, то полость рта во время каждого периода получает возбуждение импульсом. Электрически этот процесс удобно воспроизводить, употребляя для получения колебаний вместо электронной лампы — лампу с тлеющим разрядом, о чем см. F. Trautwein, Elektrische Musik, Berlin 1930, Bd. 1, der Veröff. der Rundfunkversuchsstelle bei der Staatl. Akad. Hochschule f. Musik.

102. F. Trendelenburg, Z. f. techn. Phys., 10, 558, 1929.

103. См. вычисления G. W. Stewart, Phys. Rev., 93, 467, 1911.

104. Н. Lueder, Wiss. Veröff. a. d. Siemens-Konzern, Band. IX/2, 167, 1930; см. также ссылки в У. Ф. Н.

105. L. J. Sivian, Bell. Syst. Techn. Journ. 8, 646, 1929.

106. В. Н. Baskhaus und F. Trendelenburg, Wiss. Veröff. aus d. Siemens-Konzern, Bd. IV/I, 205, 1925.

107. W. Schindelin, Ann. d. Phys. (5), 2, 129, 1929.

108. E. Scharstein, Ann. d. Phys. (5), 2, 163, 1929.

109. E. Scharstein u. W. Schindelin, Ann. d. Phys. (5), 2, 194, 1929.

110. Дальнейшие примеры искажений, возникающих вследствие действия эхо, приведены в следующих работах: E. Michel, Zentralbl. fl. Bauverwaltg., 48, 486, 1928; F. R. Watson, The Architectural Forum, März 1929, S. 441; W. Linsck, Ann. d. Phys. (5), 4, 1017, 1930; W. Kuntze, Ann. d. Phys. (5), 4, 1059, 1930.

111. M. Nuyens u. G. t. Phillippi, Physik 10, 19, 1930. О звуковых рефлекторах см. также F. R. Watson (прим. 111). Об акустиче-

ских опытах в залах, имеющих параболическую форму, и где, благодаря этому, действие отражения может оказаться благоприятным, см. F. M. Osswald, Schweizer Bauhütte, 95, 3, 1930.

112. См. например: E. Trenchelenburg, E. T. Z., 48, 1685, 1927. Преимущества использования направленного действия исчерпывающе изложены у C. Zwickler, Der Ingenieur E. Elektrotechnick, 5, 39, 1929.

113. A. D. Fokker, Archives du Musée Teyler Haarlem, 7, 73, 1930.

114. A. D. Fokker und M. I. O. Strutt, Archives du Musée Teyles Haarlem, 7, 77, 1930.

115. Кафедра при этом была прикрыта звуковым экраном, чтобы уменьшить нежелательное излучение звука в верхнюю часть собора.

116. W. C. Sabine, Collected Papers on Acoustics, S. 13, 1923. См. также новую работу P. E. Sabine, Journ. Franklin Inst., 207, 341, 1929. Таблицы коэффициентов поглощения таких материалов, как акустолит, целотекс, сабинит и др.

117. E. Meyer, Z. d. V. d. J., 74, 273, 1930.

118. См., например: V. L. Chrissler und W. f. Snyder, Bureau of Stand. Journ. of Research, 5, 957, 1930; V. L. Chrisler, Jour. of acoust. Soc. Amer., 1, 418, 1930.

119. Необходимо упомянуть, что дальнейшим условием справедливости настоящего уравнения является, чтобы  $a_m \ll 1$ . Если это соотношение не выполняется, то  $a_m$  надо положить  $a_m = \ln(1 - a_m)$  K. Schuster und E. Waetzmann<sup>120</sup>.

120. K. Schuster und E. Waetzmann, Ann. d. Phys. (5), 1, 671, 1929; K. Schuster, там же S. 696. См. также вычисления C. E. Eyring, Journ. Acoust. Soc. Amer., 1, 217, 1930. О вопросах заглушения см. следующие работы: M. J. O. Strutt, Mag. 8, 236, 1929, и статью C. F. Eyring, Journ. of the Soc. of Motion Picture Eng., 15, 528, 1930.

121. С. Ли́фшиц, Phys. Rev., 25, 391, 1925; 27, 618, 1926.

122. Укажем еще на работу W. A. Мос. Nair, касающуюся вопросов оптимальной реверберации (Bell. Syst. Techn. Journ., 9, 390, 1930). В этой работе оптимальное время реверберации рассматривается в предположении, что отголосок, еще воспринимаемый по выключении источника звука, одинаков для всех частот, тогда при вычислении получается, что для 80 герц реверберация вдвое больше, чем для 1000 герц. Далее укажем на интересные статистические исследования Vern O., Knudsen (Journ. Acoust. Soc. Amer. 1, 56, 1929), касающиеся связи между внятностью речи, временем реверберации и объемом помещения.

G. v. Békésy указывает в краткой работе (Ann. d. Phys. (5), 8, 851, 1931) на важность одного, известного из психологии, явления для оценки процессов реверберации: процессы могут быть рассматриваемы как единые лишь в течение определенного, чрезвычайно короткого промежутка времени — времени наличия (Präsenzzeit). Длительность этого промежутка времени достигает, примерно, 0,8 сек. Подставляя в формулу реверберации это значение, а также и значение средней мощности звука, излу-

чаемого оркестровыми инструментами и голосами, можно определить величину оптимальной реверберации в зависимости от величины помещения.

123. Meyer und P. Just, L. N. T. 5, 293, 1928.

124. P. R. Reyl, V. L. Chrisler und W. F. Snyder. Bur. of Stand. Journ. of Research, 4, 289, 1930. P. R. Reyl указывает в одном из примечаний (Nature, 126, 350, 1930) на то, что результаты теоретических вычислений E. T. Paris [Proc. Roy. Soc. London (A) 115, 407, 1927] и J. Lagmor [Proc. Cambr. Phys. Soc. (2), 27, 231, 1930] ведут к противоположным результатам. Lagmor нашел, что при падении по касательной поглощение бесконечно велико, согласно Paris оно должно равняться нулю. P. R. Reyl считал не вполне оправданным предположение, что при поглощении и отражении имеет место лишь потенциальный поток; в слое воздуха, прилегающем непосредственно к поглощающему и отражающему веществу могут возникать и турбулентные течения. E. T. Paris объясняет указанное противоречие (Nature, 12, 880, 1930) тем, что в работе J. Lagmor были сделаны недопустимые упрощения.

125. H. Tischner, E. N. T., 7, 236, 1930. Измерения поглощения звука наблюдением акустических процессов (в трубах, были проведены также A. H. Davis und E. J. Evans, Proc. Roy. Inst., 127, 89, 1930. См. также измерения L. Casper u G. Sommer в скором времени должно появиться в Wiss. Veröff. a. d. Siemens-Konzern).

126. A. H. Davis und T. I. Littler, Phil. Mag. (7), 7, 1050, 1929. Далее см. работу P. E. Sabine, Journ. Acoust. Soc. Amer., 1, 203, 1930, а также исследования A. E. Knowler, Phil. Mag. 10, 342, 1930.

127. V. L. Chrisler und W. F. Snyder, Bur. of Stand. Journ. of Res. 2, 541, 1929.

128. E. Meyer und P. Just, die Schalltechnik, 2, 33, 1929, Heft 3; E. Meyer, Z. d. V. D. I, 74, 273, 1930.

129. E. Meyer, Die Schalltechnik, 3, 23, 1930, Heft 2.

В краткой работе (Berl. Ber. 1931, S. 166) E. Meyer приводит дальнейшие рассуждения о вопросах звукоизоляции. В ходе этих исследований были измерены амплитуды вынужденных колебаний разделяющей перегородки как непосредственно, так и по методу конденсаторного зонда (см. примеч. 44). Исследования Мейера установили, что звук передается с помощью колебаний разделяющей перегородки. Численные значения звуковой изоляции и логарифм веса стенки находятся в линейной зависимости. Необходимо отметить, что основная работа по вопросам звукоизоляции, диссертация, вышла новым изданием R. Berger (München 1911) Berlin, Verlag v. J. Birkenfeld.

130. Не смешивать с ранее употреблявшейся единицей при основании или с барггаузеновским „фоном“ (при основании 2).

131. H. F. Hopkins, ref. Kinotechnik, 12, 534, 1930.