СОВРЕМЕННОЕ РАЗВИТИЕ АРХИТЕКТУРНОЙ АКУСТИКИ *

Верн О. Кнудсен.

Содержание. § 1. Введение. § 2. Ранний этап развития архитектурной акустики. § 3. Современная эра архитектурной акустики. § 4. Нарастание и затухание звука в закрытых помещениях. Общие соображения § 5. Теория реверберации Сэбина и Егера. § 6. Последние видоизменения формулы реверберации. § 7. Резонанс помещений. § 8. Реверберационные измерения в небольших помещениях. Определение коэфициентов поглощения строительных материалов. § 9. Определение коэфициентов поглощения прямым отражением. § 10. Поглощение звука пористыми материалами. § 11. Оптимальное время реверберации для разговорных и музыкальных помещений. § 12. Изменение времени реверберации с частотой для разговорных и музыкальных помещений. § 13. Передача звука через строительные материалы. § 14. Расчет звукоизоляции и ослабление шума в зданиях.

§ 1. Введение

Архитектурная акустика уж больше не окутана тайной: она прочно обоснована физическими фактами и принципами, которые были разработаны трудами относительно небольшого числа физиков и инженеров. Без этих работ, проделанных главным образом физиками в течение последних тридцати пяти лет, архитектурная акустика была бы еще чисто эмпирической наукой, основанной на обобщениях геометрической акустики и немногих качественных наблюдений по отражательным и поглотительным свойствам строительных материалов и внутренней меблировки. Практические достижения, полученные в результате последних исследований по архитектурной акустике, представляют яркий пример ценности привлечения физиков и их методики к разработке пренебрегаемых и неразвитых отраслей техники, даже при современном повышенном интересе к атомной физике. Тридцать пять лет назад акустическое проектирование зданий, если оно вообще имело место, сводилось не более как к попытке, часто неудачной, имитировать известные конструкции, заслужившие одобрение публики, и избегать других, пользующихся плохой репутацией. В настоящее время акустическое проектирование основано на надежных формулах и числовых данных в отношении звукопоглощающих и

---

* Recent Developments in Architectural Acoustics, Vern O. Knudsen' University of California of Los-Angelos. — Reviews of Modern Physics, 1,1 January 1934. Перевод с английского Я. А. Копиловича.

звукоизоляционных свойствах строительных материалов, так же как и формы помещения, таким образом, что акустика здания может быть определена до постройки; или, что еще более важно, любые данные акустические требования могут быть практически осуществлены в законченном здании.

Архитектурная акустика приближается таким образом к состоянию прикладного искусства и находится на пути к тому, чтобы стать равноправной отраслью техники. К несчастью, однако, в нашей образовательной системе акустической технике все еще не уделяется должного внимания и поэтому, хотя ряд больших объединений, заинтересованных в производстве и продаже акустических инструментов или материалов, дали очень многое, особенно в части разработки инструментов для исследования акустических свойств помещений, непосредственное развитие архитектурной акустики зависит в основном от исследований физиков. До тех пор пока архитектурная акустика не станет установленной и поощряемой дисциплиной в наших технических школах, крайне желательно не только, чтобы физики, работающие уже в настоящее время в данной области, продолжали свои исследования, но и чтобы, кроме того, еще дополнительные работники были привлечены к разрешению многих незаконченных и многообещающих задач, ждущих заинтересованного и квалифицированного исследователя.

Ввиду вышеизложенного, целью настоящей статьи будет не только рассмотрение последних достижений, полученных в результате применения инструментов и методов современной физики к акустике помещений, но и постановка незаконченных или неразрешенных еще проблем, обещающих дать важные по своему значению результаты.

§ 2. Ранний этап развития архитектурной акустики

Автор дал в другом месте[1] обзор эволюции аудитории и ранних начинаний в области архитектурной акустики в XIX в. Хотя многочисленный ряд основных проблем акустики греческих и римских театров добросовестно разобран в известных „Десяти книгах по архитектуре“ Витрувия, только в XIX в. акустическим проблемам архитектурных помещений стали уделять серьезное внимание, причем эти исследования носили только качественный характер. Наиболее замечательными среди исследователей XIX в. были: 1) Дж. Б. Уфам[2], исследовавший реверберационные свойства главной аудитории бостонского мюзик-холла в течение окончания его постройки, отделки и меблировки и рекомендовавший применение дополнительной обивки или даже полотна на стенах в качестве средства для уменьшения реверберации; 2) Джозеф Генри[3], четко определивший факторы, влияющие на реверберацию и эхо, и спроектировавший на основе собственных теорий и экспериментов новый лекционный зал Смитсоновского уни-

верситета, обладающий чрезвычайно удовлетворительными акустическими свойствами и 3) Т. Роджер Смит[4], английский архитектор, строго определивший различные акустические требования для разговорных и музыкальных помещений. Необходимо также упомянуть работы лорда Рэлея[5], осознавшего возможность контроля реверберации в помещениях помощью ковров, драпри и мебели. Все это носило, однако, только качественный характер.

§ 3. Современная эра архитектурной акустики

Количественному развитию архитектурной акустики было положено начало У. К. Сэбином в 1895 г., когда он предпринял исследование акустики Фоговского лекционного зала в Гарвардском университете[6]. Он установил, что реверберация является наиболее важным фактором, влияющим на акустическое качество помещения, и посвятил, соответственно, большую часть остальной своей жизни (он умер в 1918 г.) количественному изучению нарастания и затухания звука в закрытом помещении. Он вывел уравнение и определил коэфициенты поглощения строительных материалов, что сделало возможным вычисление реверберационных свойств помещения как до, так и после постройки, и дал лучшее объяснение основных факторов, влияющих на акустические свойства помещений. Сэбин заслуженно считается основателем архитектурной акустики; его работа сделала возможным не только проектирование, постройку или сообщение формы помещениям таким образом, чтобы обеспечить их хорошими акустическими свойствами, но и привлекла также внимание других исследователей, которые продолжили незаконченную им работу, улучшили его формулу реверберации и сделали ряд других важных открытий в отношении изоляции звука, усиления звука, резонанса помещений и оптимальной реверберации для разговорных и музыкальных помещений. Все эти факторы имеют важное значение для акустики помещений, но самым основным из них, однако, является проблема, так просто и красиво разрешенная У. К. Сэбином, — проблема нарастания и затухания звука в закрытых помещениях.

§ 4. Нарастание и затухание звука в закрытых помещениях. Общие соображения

Очевидно, что строгое рассмотрение нарастания и затухания звука в закрытом помещении должно быть основано на общей теории колебаний в ограниченном трехмерном континууме. Исторически, однако, популярны были значительно более простые, приближенные рассмотрения. Но даже эти приближенные теории при применении их с осторожностью и пониманием, удовлетворительно служили для практических целей акустического проектирования и будут продолжать также служить до тех пор, пока не будут заменены более точными теориями.

Эти приближенные теории были основаны на неверной предпосылке, эквивалентной допущению, что звук, возникающий в некоторой точке в помещении, распространяет кванты или лучи колебательной энергии равномерно во всех направлениях; что эти лучи частично отражаются границами помещения, и что даже после прекращения действия источника эти лучи сохраняют свою первоначальную частоту, но становятся слабее после каждого отражения, подобно большому числу бильярдных шаров, перемещающихся с постоянной скоростью на бильярдном столе, но сокращающихся в величине после каждого отражения до тех пор, пока они не становятся бесконечно-малыми. Таким образом в этих приближенных теориях, по крайней мере, в позднейших, принимается, что звуковая энергия продолжает оставаться в лучах или пучках, что в течение затухания звуковая энергия в помещении остается постоянной в этих лучах или пучках в продолжение короткого интервала времени, равного времени, необходимому лучу для прохождения среднего расстояния между последовательными отражениями, называемым „средним свободным путем", а затем внезапно падает на известное количество, определяемое „средним" коэфициентом поглощения границ помещения; и что этот процесс поглощения отдельными ступенями продолжается до тех пор, пока вся звуковая энергия не перейдет в теплоту. Формулы, к которым могут привести эти приближенные теории, достаточно ценны для всех практических целей в помещениях, ограниченных материалами, обладающими одинаковым коэфициентом поглощения. В помещениях, однако, ограниченных материалами, обладающими широко различными коэфициентами поглощения, что обычно и имеет место в действительности, формулы получают практическое значение только в тех случаях, когда затухающий в помещении звук приближается к состоянию совершенного рассеяния. Следует точно установить поэтому, что формулы, которые мы сейчас будем выводить, должны применяться с осторожностью и пониманием, особенно в отношении среднего коэфициента поглощения в помещениях, ограниченных частью высокоотражающими, а частью высокопоглощающими материалами.

§ 5. Теория реверберации Сэбина и Егера

Ранние опыты У. К. Сэбина[7] показали, что время реверберации в помещении, т. е. время, необходимое для уменьшения звуковой интенсивности на 60 *дб*, или до одной миллионной ее начального значения в течение свободного затухания, прямо пропорционально объему помещения и обратно пропорционально общему поглощению, обеспечиваемому границами помещения, а именно $\Sigma\alpha s$, где α — коэфициент звукопоглощения любой части границы, имеющей площадь s, и где произведение относится ко всей границе помещения. Рядом остроумных опытов в различных помещениях Сэбин получил возможность определить постоянную пропорциональности k

между временем реверберации t_{60} и объемом V, разделенным на общее поглощение a, и дать архитекторам и строителям простое, но чрезвычайно ценное уравнение:

$$t_{60} = \frac{kV}{a} \tag{1}$$

Значение k, определенное опытным путем Сэбином для большого числа помещений различных форм и размеров, при нормальной комнатной температуре равнялось 0,05 в английских единицах и 0,164 при V выраженном в $м^3$ и a — в $м^2$.

Несколько лет спустя Егер получил то же уравнение, исходя из теоретических соображений на основе метода, показавшего себя чрезвычайно плодотворным применительно к кинетической теории газов. Он получил уравнение для скорости, с которой рассеянная звуковая энергия в закрытом помещении ударяется о единицу площади границы, а именно $\frac{\rho c}{4}$, где ρ — средняя объемная плотность звуковой энергии в помещении, а c — скорость звука. Он принял далее, что скорость поглощения звуковой энергии границами помещения равна $\frac{\rho c}{4}\Sigma\alpha s$ — вполне вероятное допущение при условии, что звуковая энергия совершенно рассеивается в течение затухания и при условии, что ρ изменяется непрерывно*. (Это будет приблизительно иметь место, если затухание происходит медленно, т. е. если границы помещения настолько высокоотражающие, что для деградации звуковой энергии в теплоту требуется большое число отражений). Егер приравнивает затем скорость изменения звуковой энергии в помещении $V\frac{d\rho}{dt}$ разности между скоростью излучения звуковой энергии от источника E и скоростью поглощения звуковой энергии границами помещения, т. е.

$$V\frac{d\rho}{dt} = E - \left(\frac{\rho c}{4}\right)\Sigma\alpha s.$$

Решение этого уравнения введением соответствующих граничных условий, и помня, что $a = \Sigma\alpha s$, дает для нарастания звуковой энергии

$$\rho = \rho_0\left(1 - e^{\frac{act}{4V}}\right); \tag{2}$$

для затухания звуковой энергии:

$$\rho = \rho_0 e^{-\frac{act}{4V}}; \tag{3}$$

* Сравните с формулой Клаузиуса для скорости, с которой молекулы газа в закрытом сосуде ударяются об единицу площади границы, а именно $\frac{nc}{4}$, где n — число молекул на $см^3$, а c — средняя скорость их.

и для среднего значения уравновешенного состояния плотности энергии ρ_0:

$$\rho_0 = \frac{4E}{ca}. \tag{4}$$

Если уравнение (3) решить относительно t при $\frac{\rho}{\rho_0} = 10^{-6}$, результат даст время реверберации t_{60}, а именно:

$$t_{60} = \frac{kV}{a}, \tag{5}$$

а значение k, которое зависит от скорости звука, будет ра но при нормальной комнатной температуре 0,049 в английских единицах и 0,161 в метрических единицах, что находится в очень хорошем соответствии с опытными значениями, полученными Сэбином [см. уравнение (1)]. Это соотношение дало такое убедительное подтверждение эмпирического уравнения Сэбина, что оно применялось в течение почти 30 лет для вычисления времени реверберации как проектируемых, так и законченных помещений. Даже ложное заключение, к которому приводит уравнение для помещения с абсолютно поглощающими поверхностями, а именно, что $t_{60} = \frac{kV}{S}$ вместо нуля (где S — общая поверхностная площадь помещения) не принималось во внимание и не было достаточным для того, чтобы поколебать веру в ценность уравнения Сэбин-Егера, до самого последнего времени. Уравнение это практически удовлетворительно для частот между приблизительно 200 и 1000 герц в громадном большинстве помещений, в которых скорость затухания звука небольшая, т. е. уравнение относится к „живым" помещениям при условии, что частоты, достаточно высокие, значительно выше основной резонансной частоты помещения, но недостаточно высоки для того, чтобы оказалось необходимым принимать во внимание ослабление в среде.

§ 6. Последние видоизменения формулы реверберации

Более удовлетворительная формула реверберации может быть получена принятием, что затухание звука имеет место прерывно, при интервал х времени, равных времени, необходимому звуку для прохождения среднего свободного пути. Очевидно, что этот прерывный процесс поглощения соответствует более точно действительным условиям, чем беспрерывный процесс, поскольку каждый звуковой луч проходит конечное расстояние (равное обычно среднему свободному пути) без поглощения, а затем испытывает конечное поглощение при каждом отражении. Согласно данным Сэбина[6] и Егера[7] средний свободный путь для помещения равен $4\frac{V}{S}$. Строго говоря, средний свободный путь зависит от формы

помещения и расположения источника, особенно в течение первых нескольких отражений, но для большинства помещений обусловленной формы он не разнится от $4\frac{V}{S}$ больше, чем на $\pm 8{,}0\%$*. Ниже мы будем принимать средний свободный путь равным $4\frac{V}{S}$.

Пусть Δt будет временем, необходимым звуку для прохождения расстояния, равного среднему свободному пути, т. е. $\Delta t = \frac{4V}{Sc}$, и предположим, что затухание достаточно медленное и равномерное, таким образом, что средняя плотность звуковой энергии в течение каждого интервала времени Δt представляет собой арифметическое среднее начальной и конечной плотностей — предположение, достаточно оправданное для скоростей затухания, встречаемых на практике. В начале затухания плотность равна ρ_0, т. е. среднему уравновешенному состоянию. После интервала Δt, т. е. после первого отражения, принимая все длины путей равными среднему свободному пути, плотность уменьшится приблизительно до $\rho_0(1-\bar{\alpha})$, где $\bar{\alpha} = \frac{\Sigma\alpha s}{S}$ представляет собой арифметическое среднее коэфициентов поглощения всех границ помещения. Тогда средняя плотность в продолжение первого интервала Δt будет $\frac{1}{2}[\rho_0 + \rho_0(1-\bar{\alpha})]$. Поэтому количество звуковой энергии, поглощенной при первом интервале Δt, будет равно приближенно

$$\Sigma\alpha s\Delta t \cdot \frac{1}{2}[\rho_0 + \rho_0(1-\bar{\alpha})]\frac{c}{4}.$$

Следовательно, более правильное значение плотности энергии в конце первого интервала времени будет равно

$$\rho_0 - \frac{[\rho_0 + \rho_0(1-\bar{\alpha})]\,c}{8V}\Sigma\alpha s\Delta t,$$

или

$$\rho_0 - \frac{1}{2}[\rho_0 + \rho_0(1-\bar{\alpha})]\,\bar{\alpha},$$

где $c\Delta t$ — средний свободный путь, т. е. $4\frac{V}{S}$.

Приближенное значение плотности энергии после последовательных интервалов времени Δt, $2\Delta t$ и т. д. дано в табл. 1.

Через промежуток времени t, $n = \frac{t}{\Delta t}$ и поэтому

---

* Для крестообразного типа помещения с высоким потолком средний свободный путь равен $4{,}24\frac{V}{S}$; для большого прямоугольного конторского помещения с низким потолком он равен $3{,}75\frac{V}{S}$ [9].

ТАБЛИЦА 1

t	ρ
0	ρ_0
Δt	$\rho_0 - \left[\frac{\rho_0 + \rho_0(1-\alpha)}{2}\right]\alpha$.
$2\Delta t$	$\rho_0 - \left[\frac{\rho_0 + \rho_0(1-\alpha)}{2} + \frac{\rho_0(1-\alpha) + \rho_0(1-\alpha)^2}{2}\right]\alpha$.
⋮	⋮
$h\Delta t$	$\rho_0 - \left[\frac{\rho_0 + \rho_0(1-\alpha)}{2} + \ldots \frac{\rho_0(1-\alpha)^{h-1} + \rho_0(1-\alpha)^h}{2}\right]\alpha$.

значение ρ при этом времени t равно:

$$\rho = \rho_0 \left\{ 1 - \alpha \left[\frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{n=\frac{Sct}{4V}} (1-\alpha)^n - \frac{(1-\alpha)^{\frac{Sct}{4V}}}{2} \right] \right\}. \quad (6)$$

Для скорости затухания, встречаемой в большинстве помещений, практически во всех помещениях за исключением ограниченных материалами с коэфициентом поглощения, почти равным единице, первый и третий члены в скобках малы по сравнению со вторым членом, и они имеют значение только в том случае, если затухание составляется из очень небольшого числа отражений. Поэтому приблизительно:

$$\rho = \rho_0 \left\{ 1 - \alpha \sum_{n=1}^{n=\frac{Sct}{4V}} (1-\alpha)^n \right\} =$$

$$= \rho_0 \left\{ 1 - \alpha \frac{1-(1-\alpha)^{\frac{Sct}{4V}}}{1-(1-\alpha)} \right\} =$$

$$= \rho_0 (1-\alpha)^{\frac{Sct}{4V}}. \quad (7)$$

Этот же результат может быть получен рядом методов, самый простой из которых предполагает, что плотность энергии уменьшается на то же дробное количество α после каждого отраже-

ния, т. е. после каждого интервала времени Δt, таким образом, что плотность энергии после времени Δt, $2\Delta t \cdots n\Delta t$ равна

$$\rho_0(1-\alpha),\ \rho_0(1-\alpha)^2 \cdots \rho_0(1-\bar{\alpha})^n,$$

соответственно *. Или вообще:

$$\rho = \rho_0(1-\alpha)^{\frac{Sct}{4V}}. \tag{7'}$$

Если мы примем $(1-\alpha) = c$, уравнение (7) становится похожим на уравнение (3), а именно:

$$\rho = \rho_0 e^{\operatorname{Sin}(1-\alpha)\frac{ct}{4V}}, \tag{8}$$

и приводится к уравнению (3), когда α очень мало, т. е когда границы помещения высокоотражающие. Оба уравнения (3) и (8) представляют собой только приближенные формулы. Уравнение (3) удовлетворительно только для очень живых помещений, в то время как уравнение (8) отвечает практическим требованиям как для живых, так и для „мертвых" помещений при условии, что поглощающие материалы в помещении не сконцентрированы на одной или двух поверхностях помещения. Для частот выше 1000 герц как уравнение (3), так и уравнение (8) не представляют ценности.

Уравнения (3) и (8) основаны на принятии, что все поглощение звуковой энергии в помещении имеет место у границ, т. е. что поглощение в воздухе настолько мало, что им можно пренебречь. Стокс, Кирхгоф и Рэлей вычислили поглощение звука в воздухе вследствие вязкости и теплопроводности и нашли, что для частот до 6 000 или даже 8 000 герц поглощение настолько мало по сравнению с поверхностным поглощением в действительных помещениях, что им можно совершенно пренебречь. Опытным путем, однако, это было опровергнуто [10]. Поглощение звука в воздухе не только значительно больше, чем согласно классической теории Стокса, Кирхгофа и Рэлея, но и зависит от температуры и влажности так, что эту зависимость можно объяснить только поглощением, получающимся в результате столкновений между молекулами газа [11] [12]. Проведенные недавно опыты по поглощению звука в воздухе показывают, что коэфициент поглощения порядка от 10 до 100 раз больше, чем предсказано классической теорией, так что для высоких частот (10 000 герц, например) поглощение в воздухе в помещении может быть больше поверхностного поглощения, особенно в больших помещениях. Кривые рис. 1

* Этот метод был предложен Р. Норрисом на заседании Американского акустического общества 11 мая 1929 г. Допущение, что плотность энергии уменьшается на то же дробное количество после каждого отражения, конечно, присуще выводу уравнения (6), но понятие беспрерывного поглощения частично сохранено при выводе уравнения (6), в то время как это не имеет места в случае уравнения (7).

дают коэфициент поглощения m на фут (или на сантиметр) для плоских волн в воздухе при 20°С и при относительных влажностях, показанных абсциссой для частот в 1 500, 3 000, 6 000 и 10 000 герц. Коэфициент m определяется $\rho_x = \rho_0 e^{-mx}$, где ρ_0 — плотность энергии в плоской волне при $x = 0$ и ρ_x — плотность после того, как волна прошла расстояние x. Из кривых рис. 1 видно, что m в максимуме при известной концентрации паров воды, различно для каждой частоты. Далее, величины этих максимумов пропорциональны первой степени частоты, а не второй степени, как требует классическая теория поглощения. Обращает внимание, например, что при относительной влажности в 18% m равно 0,020 фут$^{-1}$ для частоты в 10 000 герц, от-

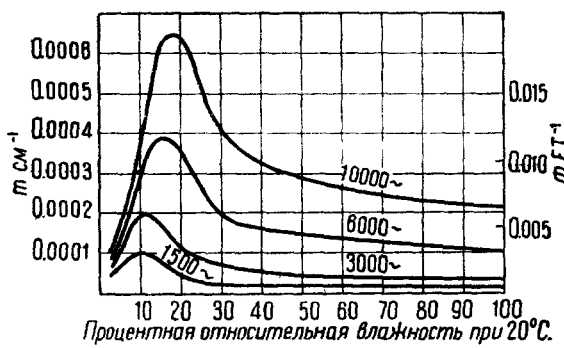

Рис. 1. Коэфициент поглощения звука в воздухе, содержащем различные количества водяных паров, для частот в 1 500, 3 000, 6 000 и 10 000 герц.

куда интенсивность (или плотность энергии) такой волны после прохождения расстояния $\left(\frac{1}{0{,}020}\right.$ или 50 футов$\left.\right)$ будет уменьшена до $\frac{1}{e}$ своего начального значения. Это эквивалентно скорости затухания в 96 *дб/сек*, что значительно превышает наиболее желательную скорость затухания для музыкальных помещений.

Такое чрезмерное поглощение звука в воздухе делает необходимым введение соответствующего фактора ослабления в уравнение (8), и уравнение затухания принимает вид:

$$\rho = \rho_0\, e^{-mct}\left[e^{\ln(1-\bar{\alpha})\cdot\frac{Sct}{4V}}\right];$$

$$\rho = \rho_0\, e^{\left[(\ln(1-\bar{\alpha})\cdot\frac{S}{4V} - m\right]ct}. \qquad \textbf{(8a)}$$

Время реверберации t_{60} получается решением уравнения (8а) для t при $\frac{\rho_0}{\rho} = 10^{-6}$. Так,

$$t_{60} = \frac{55{,}3V}{c\,[4mV - S\ln(1-\alpha)]}. \tag{9}$$

При комнатной температуре помещения 21° С, $c = 1\,125$ фут/сек таким образом, что для большинства рабочих условий:

$$t_{60} = \frac{0{,}049\,V}{4mV - S\cdot\ln\,[(1-\bar{\alpha})]} \tag{10}$$

в английских единицах, или

$$t_{60} = \frac{0{,}161\,V}{4mV - S\cdot\ln(1-\bar{\alpha})}, \tag{11}$$

где V и S выражены в $м^3$ и $м^2$ соответственно. Для частот, ниже примерно 1 000 герц, m настолько мало, что первым членом знаменателя уравнений (9), (10) или (11) можно пренебречь, т. е. поглощение в воздухе незначительно, в то время как при высоких частотах (выше 10 000 герц) этот член может стать больше второго члена (поверхностного поглощения). При достаточно высоких частотах (выше звукового диапазона) второй член станет настолько малым, что им можно будет пренебречь, в каковом случае скорость затухания, а следовательно, и время реверберации, не будет зависеть от величины помещения.

Предыдущая формула реверберации, уравнение (9), достаточно ценна для практических целей при условии, что звук в помещении абсолютно рассеян в течение затухания. Это условие осуществляется для частот выше приблизительно 250 герц во всех помещениях, за исключением очень небольших, при условии, что все границы помещения обладают приблизительно одинаковой поглощаемостью, или при условии применения соответствующих вращающихся лопастей или „вибрирующих тонов“ для перемешивания“ звука в помещении. Соответствующие предосторожности, аналогичные только что упомянутым, могут быть предприняты при производстве измерений в акустических лабораториях. Во многих помещениях, встречаемых на практике, поглощающий материал может быть сконцентрирован на одной поверхности, как в том случае, когда ковер, обитые сидения и аудитория размещены на полу, а все другие поверхности в помещении высоко отражающие. В таких случаях, в особенности если противоположные стены параллельны и не слишком отдалены, затухание звука не будет соответствовать приблизительно экспоненциальному затуханию уравнения (9), а будет состоять: 1) из большой скорости затухания, когда звук относительно рассеянный, и 2) из значительно более медленного затухания, составленного главным образом из горизонтального потока

звуковой энергии между параллельными и высокоотражающими стенами. Время реверберации в таком помещении будет больше вычисленного посредством уравнения (9) с арифметическим средним для $\bar{\alpha}$. Это показывается некоторыми осциллограммами скорости затухания, полученными в небольшом помещении $8' \times 8' \times 9{,}5'$ (высоком) с полом, покрытом материалом с коэфициентом поглощения в 0,60 при 512 герцах и стенами и потолком, покрытыми окрашенным бетоном. Первая часть затухания (15 до 17 *дб*) прошла относительно быстро (95—100 *дб/сек*). За этим последовало значительно более медленное затухание 38—40 *дб/сек*. Если использовать первую часть затухания для вычисления времени реверберации t_{60} при поглощаемости материала пола $m\alpha$, мы получим $t_{60} = 0{,}61$ сек. и $\alpha = 0{,}55$. При использовании последней части $t_{60} = 1{,}54$ сек. и $\alpha = 0{,}22$. Первая часть затухания, когда звук относительно рассеянный дает значение для α, которое находится в довольно хорошем соответствии с теоретическим значением в 0,60 и, следовательно, довольно хорошо отвечает требованиям уравнения (9), в то время как последняя часть затухания, состоящая главным образом из горизонтального потока (или резонанса) звуковой энергии между параллельными высокоотражающими поверхностями проходит значительно более медленно.

К счастью, однако, для лучшего акустического качества помещения поглощающий материал должен быть размещен на всех поверхностях помещения таким образом, чтобы скорость затухания была, по крайней мере, приблизительно одинаковой во всех направлениях; при каковых условиях уравнение (9) даст результаты, которые, как правило, не будут отличаться более чем на 10% от наблюденных значений. Более того, в очень больших помещениях, например, театрах и школьных аудиториях, наблюдается весьма малая тенденция к двухмерной реверберации, даже когда большая часть поглощающего материала сконцентрирована на полу и потолке, во-первых, потому что размеры помещения, большие по сравнению с длинами волн звука, и, во-вторых, потому что архитектурная обработка больших помещений включает, обычно, структурные формы и орнаментации, стремящиеся рассеять звук в течение свободного затухания. В таких помещениях при условии отсутствия изогнутых поверхностей, вызывающих концентрацию звука, затухание первых 30 *дб* (или немного более) очень близко соответствует уравнению (9), а эта именно часть затухания наиболее существенна для акустического качества речи и музыки в помещениях. Другими словами, скорость затухания после первых 30 *дб* имеет наибольшее значение, поскольку в артикулируемой речи или музыке такие остаточные звуки настолько слабы, что совершенно замаскировываются первичными (и значительно более громкими) звуками, следующими за ними. Очевидно, следовательно, что уравнение (9) представляет собой удовлетворительную ценность для практических вычислений реверберации в большинстве помещений.

§ 7. Резонанс помещений

Казалось бы, что теория реверберации, описанная в двух предыдущих параграфах, не может быть верна для того случая, когда длина звуковой волны не является малой по сравнению с размерами помещения, поскольку при таких условиях один или более из низкочастотных видов колебаний помещения может быть резко выражен, и присутствие этих колебаний исключило бы возможность рассеянного состояния звука. В действительности, однако, независимо от того, будет ли длина волны большой или малой, реверберация в помещении должна рассматриваться как свободные затухающие колебания столба воздуха, заключенного в помещении, как было указано Стратом[13] и Вэцманом и Шустером[14]. Автор показал, что по крайней мере при низких частотах реверберация представляет собой как раз эти свободные демпфированные колебания воздуха в помещении[15]. Собственные частоты прямоугольного помещения легко получаются включением в волновые уравнения соответствующих граничных условий[18]. Частоты n выражаются уравнением:

$$n = \frac{c}{2}\left[\frac{p^2}{l_1^2} + \frac{q^2}{l_2^2} + \frac{r^2}{l_3^2}\right]^{\frac{1}{2}}, \qquad (12)$$

где l_1, l_2 и l_3 — размеры помещения и p, q, r—целые числа 0, 1, 2, 3... Основной тип колебаний в направлении l_1 получается при $p = 1$ и $q = r = 0$; т. е. $n_{1,0,0} = c/2l_1$, что соответствует основной частоте колебаний трубы длиной l_1, открытой или закрытой с обоих концов. Так, для прямоугольного помещения, в котором $l_1 = 12{,}5$ фута, $n_{1,0,0} = H25/25 = 45$. Если 12,5 фута представляет собой самое длинное измерение помещения, то самый низкий тип колебаний будет иметь частоту в 45 герц. Вообще, однако, будут иметь место три бесконечных ряда обертонов. Первые двадцать характеристических частот помещения $8' \times 8' \times 9{,}5'$, вычисленных согласно уравнению (12) были легко определены, во-первых, их резонансным влиянием на интенсивность установившегося тона медленно изменяющейся частоты (интенсивность тона значительно увеличивалась всякий раз, когда частота тона совпадала с одной из собственных частот помещения) и, во-вторых, осциллографическим исследованием затухания низких тонов в помещении[17]. При исследовании автором резонанса в помещениях было найдено, что частота реверберирующего тона никогда не бывает равна частоте возбуждающего тона, за исключением того случая, когда возбуждающий тон строго настроен на одну из характеристичных частот помещения. Частота (или частоты) реверберирующего тона всегда состоит из одного или больше свободных видов колебаний помещения. Так, одной из наиболее выделяющихся из свободных колебаний в небольшом помещении было основное колебание в горизонтальном направлении с частотой в 71 герц. Когда тон любой частоты между 66 и 76 герц возбуждался в помещении, а затем прекращался, зату-

хающее колебание оказывалось тоном частотой в 71 герц. Рис. 2 содержит ряд осциллограмм, ясно показывающих резонансный характер реверберации в небольшом помещении. Частота тона при установившемся состоянии показана под каждой осциллограммой. Несмотря на то, что были применены семь различных простых тонов с частотой от 90,8 до 100,6 герц, затухание в каждом отдельном случае состоит, как показано, главным образом из двух характеристичных частот помещения, а именно 92,8 и 99,8 герц, двух собственных частот,

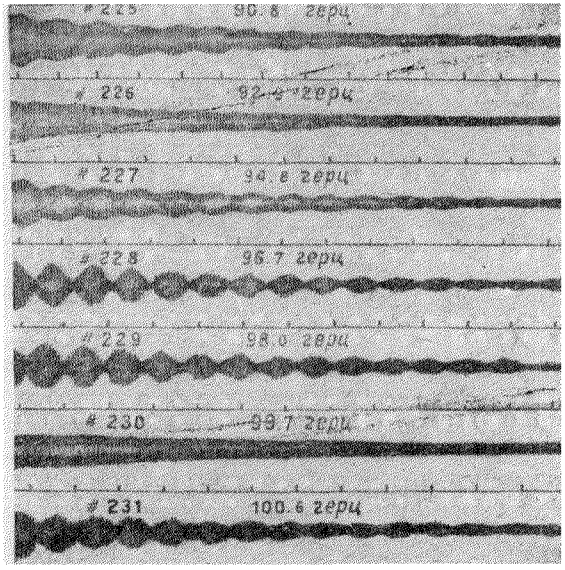

Рис. 2. Осциллограммы затухания звука в небольшом прямоугольном помещении, показывающие, что затухание звука состоит из затухающих свободных колебаний помещения.

наиболее близких к наложенной частоте. В каждом случае ясно различима частота биений в 7 герц. Ряд других осциллограмм, полученных в этом и других помещениях, подтверждают заключение, что реверберация всегда составляется из свободных затухающих колебаний воздуха в помещении. Эти соображения подтверждают теоретические предположения Вэцмана и Шустера и Страта, и, следовательно, теория реверберации должна обязательно учитывать резонансные колебания трехмерного ограниченного пространства. Однако, как показал Страт[15], формальный закон, определяющий свободные затухающие колебания трехмерного континуума, приближается асимптотически к простому закону реверберации Сэбина и Егера, когда длина волны возбуждающего звука становится малой по сравнению с длиной волны наиболее низкочастот-

ных колебаний помещения. Так, в помещении с наиболее длинным измерением в 10 футов (что представляет собой помещение минимальной величины, в котором акустика является значимым фактором) длина волны наиболее низкочастотного вида колебаний равна 20 футам. В таком помещении звук с длиной волны в одну десятую основной, а именно 2,0 фута, был бы достаточно коротким для того, чтобы удовлетворять закону Сэбина. Другими словами, если помещение заполнено звуком с длиной волны, короче 2,0 футов, т. е. частотой, больше приблизительно 560 герц, возбуждаемые типы колебаний так многочисленны, а частоты так близки одна к другой, что звук в помещении существенно рассеян и поэтому требования приближенных теорий реверберации, описанных в двух предыдущих параграфах выполнены, особенно, если поглощающий материал распределен равномерно по всем границам помещения, или если предусмотрены некоторые устройства для смешения или рассеяния звука в течении затухания. Кроме того высота затухающего тона неразличима от высоты тона в продолжение уравновешенного состояния, — условие, не осуществляемое при наиболее низкочастотных видах колебаний. В помещениях, например, концертных залах, школьных аудиториях и театрах, наиболее низкие колебания находятся, обычно, в неслышимом диапазоне частот так, что элементарная теория реверберации относится в них с достаточной точностью ко всем частотам выше 100 герц, и влиянием резонанса помещения можно, обычно, пренебречь.

§ 8. Реверберационные измерения в небольших помещениях. Определение коэфициентов поглощения строительных материалов

Точные измерения реверберации в небольших помещениях представляют первостепенное значение, потому что они применялись и применяются почти исключительно со времени первой работы в данной области У. К. Сэбина в качестве практического метода для определения коэфициентов звукопоглощения строительных материалов и отделок и особенно таких материалов, как акустические войлоки, черепица и штукатурка. Общее поглощение помещения, например, реверберационной комнаты, определяется измерением скорости затухания или времени реверберации, во-первых, когда помещение содержит известную площадь акустического материала, а затем когда акустический материал удален из помещения. Значение $\bar{\alpha}$ и, следовательно, и общего поглощения $\bar{\alpha} S$ можно вычислить при помощи уравнений (8а) и (9). Поглощение акустического материала в помещении принимается равным разнице между поглощением помещения с материалом в нем и поглощением помещения при удаленном материале. Это эквивалентно допущению, что $\bar{\alpha}$ представляет собой арифметическое среднее всех поглощающих поверхностей в помещении, что оправдывается при условии, если звук в помещении поддерживается тщательно рассеянным в те-

чение стационарного состояния и затухания. Для исследования с тонами, ниже 500 герц, должны применяться вибрирующие тона шириной, по крайней мере, в 100 герц и частотой вибрации не менее 4 или 5 в секунду; кроме того для исследований с тонами всех частот должны применяться большие вращающиеся лопасти. Опытные тона должны быть простыми. При принятии этих предосторожностей скорость затухания будет удовлетворительно соответствовать теоретическому значению уравнения (8а) и, если опытная площадь будет величиной порядка 72 кв. фута, различие между скоростями затухания при акустическом материале и без него в помещении будет достаточно большим, чтобы дать коэфициенты поглощения, точные приблизительно до ± 0,03 для частот до 2 000 герц*. При более высоких частотах поглощение в воздухе, которое может изменяться в течение времени, необходимого для окончания испытания, представляет собой такой большой фактор, что ошибки порядка ± 0,10 неизбежны, если только реверберационная комната не обеспечена специальным оборудованием, поддерживающим определенное состояние воздуха. Даже в таком помещении точность неудовлетворительна при частотах выше 4 000 герц, потому что поглощение в воздухе представляет собой такую большую величину, что различие между скоростями затухания в присутствии акустического материала в помещении и без него — незначительно, если только опытная площадь не слишком большая.

Этот источник ошибок при производстве измерений поглощаемости акустических материалов при высоких частотах настолько серьезен, что автор подготовляет экспериментальную камеру, которая может быть наполнена вместо воздуха непоглощающим газом, например, азотом. В азоте при комнатной температуре поглощение лишь немногим больше поглощения вследствие вязкости и теплопроводности и, следовательно, может почти не приниматься во внимание для частот до 8 000 герц. Предварительные опыты показывают, что этот способ значительно увеличит точность измерений поглощения для частот выше 2 000 герц.

Скорость затухания измеряется каким-либо реверберометром, который обычно состоит в основном из: 1) соответствующего источника постоянных или вибрирующих тонов, катодного генератора, электрического низкочастотного фильтра, усилителя высокой частоты и электродинамического громкоговорителя; 2) высококачественного микрофона и усилителя; 3) электрического аттенюатора для регулировки усиления и 4) или рекордера, беспрерывно регистрирующего на движущемся бумажном графике или светочувствительной пленке графическую запись затухания, или какого-либо типа индикатора, обычно реле и хронографа, посредством которого может быть определена скорость затухания.

Лабораториями Белла разработан автоматический рычажный ре-

---

* Гунд[16] показал, что частота вибрирующего тона должна изменяться в пределах приблизительно 20%; см. также Мейер и Юст[17].

кордер с реагированием, пропорциональным логарифму, приводящему его в действие тока, причем прибор так отрегулирован, что запись дается непосредственно при перемещении бумажной ленты с постоянной скоростью; скорость затухания звука дана в децибелах в секунду. Если затухание следует экспоненциальному закону, кривые будут представлять собой прямые линии. Однако, поскольку затухание состоит из нескольких смежных частот в непосредственной близости к частоте возбуждающего тона, между этими частотами (каждая из которых может затухать экспоненциально) будет иметь место некоторая интерференция таким образом, что результирую-

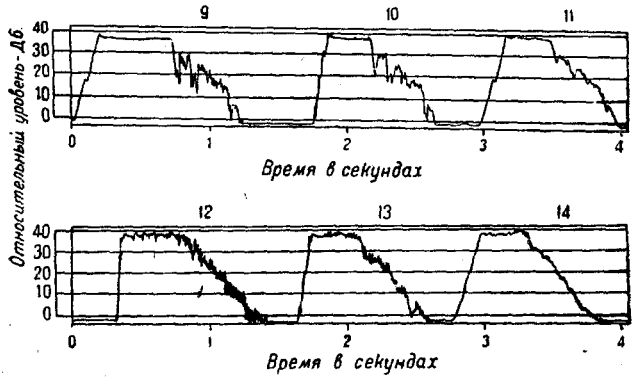

Рис. 3. Кривые, показывающие затухание звука в закрытых помещениях, полученных на автоматическом рекордере, разработанном лабораториями Белла. Кривые *9, 10* и *11* — для простого тона при рекордере, отрегулированном к скоростям в 240, 120 и 50 *дб/сек.* соответственно. Кривые *12, 13* и *14* были получены с соответствующими скоростями, но при вибрирующих тонах.

шая кривая затухания будет вообще неправильной. Типовые кривые затухания, полученные с помощью этого прибора в реверберационной комнате Electrical Research Products в Нью-Иорке, воспроизведены на рис. 3*. Как эти записи показывают, затухание не строго экспоненциально, за исключением малых колебаний, которые могут быть отнесены за счет явления резонанса или интерференции, разобранных в предыдущем параграфе, общее течение затухания соответствует весьма удовлетворительно экспоненциальному закону в пределах диапазона в 40 *дб*; и если приложить прямую линию к записанной кривой затухания, наклон этой линии даст скорость затухания с достаточной для практических целей точностью.

Кривые, отмеченные *9, 10* и *11*, были произведены простым тоном, воспринятым одним микрофоном, и записаны рекордером, отрегулированным таким образом, чтобы „следовать" максимальным

* Эти записи предоставлены нам С. К. Вольфом.

скоростям затухания в 240, 120 и 60 *дб/сек* соответственно. В кривой *9*, например, рекордер в состоянии следовать действительному затуханию значительно более точно, чем в *11*, где записаны только более медленные изменения затухания. Кривые *12*, *13* и *14* были записаны при тех же скоростях рекордера соответственно, но вместо одного простого тона применялся вибрирующий тон. Преимущество вибрирующего тона для реверберационных измерений очевидно.

В индикаторном типе реверберометра, применяющегося в большинстве акустических лабораторий США, аттенюатор последовательно регулируется для различного количества аттенюации в уси-

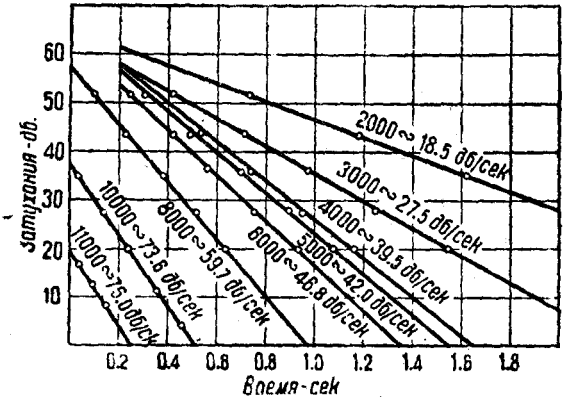

Рис. 4. Кривые затухания в 6 фут. кубической камере, показывающие, что затухание экспоненциально, и что скорость затухания увеличивается с частотой. Увеличение скорости затухания при более высоких частотах объясняется поглощением в среде, а не каким-либо значительным увеличением поглощения границ.

лительном контуре. Тогда для каждой установки аттенюатора время, необходимое для затухания для достижения известного предопределенного уровня, такого, какой, например, необходим для приведения в действие реле и дачи показания на хронографе, или только для вспышки неоновой лампы, измеряется отдельно для каждой установки аттенюатора. Тогда, если показания аттенюатора (который обычно калиброван в децибелах) будут нанесены в виде функции этих наблюденных отрезков времени, результирующая кривая даст типичную кривую затухания. Рис. 4 показывает ряд кривых затухания, полученных этим методом (с неоноламповым индикатором) в шестифутовой стальной кубической камере в Калифорнийском университете в Лос-Анжелосе.* Схема расположения прибора для получения этих кривых затухания показана на рис. 5. Уста-

* См. примечание.[11]

новка рычага L на циферблате определяет время после начала затухания, при котором неоновая лампа на выходе усилителя. Для каждой установки аттенюатора (которая определяет ординаты на рис. 4) рычаг L регулируется до тех пор, пока лампа не вспыхивает, когда контакты у B замыкаются вращающейся латунной вкладкой. Это определяет абсциссы на рис. 4. Большое увеличение в скорости затухания при более высоких частотах (показаны на рис. 4) является следствием почти исключительно увеличенного поглощения в воздухе при более высоких частотах. Если бы камера была наполнена непоглощающим газом (азотом, например), скорость затухания была бы почти постоянной для всех частот и

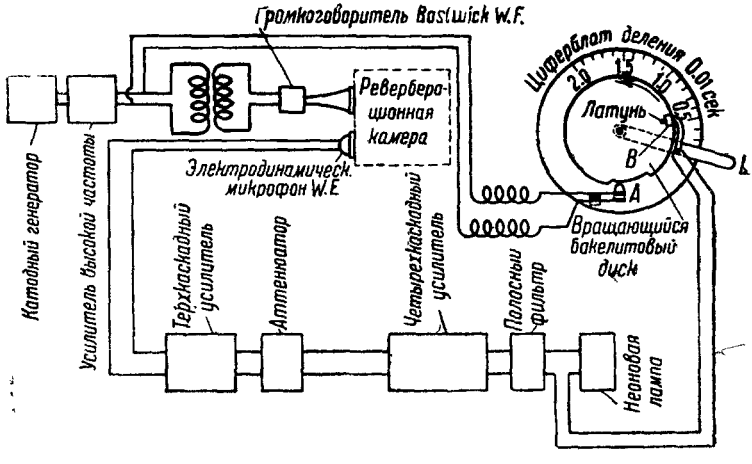

Рис. 5. Схема расположения аппаратуры в Калифорнийском у-те в Лос-Анжелосе для измерения скорости затухания звука в небольших камерах.

не больше скорости для тона в 2 000 герц, т. е. не больше 18 *дб/сек*. Кривые затухания рис. 4 были получены при помощи простых тонов, но с использованием большой вращающейся лопасти для поддержания звука в камере тщательно рассеянным.

Реверберометры могут быть использованы не только для определения коэфициентов звукопоглощения акустических материалов в реверберационной камере, но и одинаковым образом полезны также для определения реверберационных свойств всех помещений. Вообще реверберометр должен быть в состоянии производить измерения при всех частотах примерно от 128 до 4 096 герц. В специальных случаях, как, например, в музыкальных помещениях и театрах, может оказаться желательным производить измерения при частотах до 8 192 герц. В большинстве помещений, однако, совершенно достаточно произвести измерения только при низкой, средней и высокой частотах, например, 128, 512 и 2 048 герц.

§ 9. Определение коэфициентов поглощения прямым отражением

Метод реверберации для измерения коэфициентов звукопоглощения является косвенным методом, подверженным ошибкам и ограничениям, упомянутым в предыдущих параграфах. Более того, полученные таким образом коэфициенты действительны для произвольных углов падения; однако в некоторых случаях, представляющих как практический, так и теоретический интерес желательно знать коэфициент при любом данном угле падения. Очевидно, наиболее простое средство производства таких измерений состояло бы в направлении плоского параллельного луча звука на образец акустического материала и измерения интенсивностей падающего и отраженного лучей.* Практические трудности применения этого метода таковы: 1) необходимо наличие отражающих поверхностей, больших по сравнению с длиной звуковой волны (даже для частоты в 512 герц отражающая поверхность должна быть по крайней мере $12' \times 12$); 2) отражений от других поверхностей в опытной комнате не должно быть, т. е. все другие поверхности в помещении должны быть так отдалены или быть такими неотражающими, чтобы отражения от этих поверхностей не сообщали бы значительного дополнительного количества звука лучу, отраженному от испытуемого образца и 3) микрофон или детектор должен быть небольшим по сравнению с длиной звуковой волны, т. е. таким, чтобы не ввести искажений в звуковое поле, в которое помещен прибор. Если эти трудности достаточным образом предусмотрены, коэфициент поглощения α дается

$$\alpha = 1 - (\overline{P}_r \overline{P}_i)^2, \tag{13}$$

где $\overline{P}_i$—измеренная амплитуда среднего эффективного давления в падающем луче, $\overline{P}_r$—в отраженном луче.

Если акустический импеданс z отражающего материала известен**, легко вывести простую формулу, дающую коэфициент отражения (или поглощения) для любого угла падения. Так, пусть отражающая поверхность будет в плоскости $x = 0$ и пусть плоская параллельная звуковая волна (от параболического зеркала, большого по сравнению с длиной звуковой волны) падает на эту поверхность под углом падения θ. Для падающих волн, распространяющихся в направлении $+x$, скоростной потенциал Φ_i может быть представлен:

$$\Phi_i = A_e^{jk(ct - x\cos\theta + y\sin\theta)}, \tag{14}$$

* Ватсон[18] применил этот метод для измерения как отражения, так и передачи звука строительными материалами и перегородками. Недавно Кюль и Мейер[19] разработали этот метод для измерения коэфициентов звукопоглощения.

** Для измерения акустического импеданса материала было разработано несколько методов. См., например, Гронталь[20] и Кюль и Мейер[19].

и скоростный потенциал для отраженных волн Φ

$$\Phi_r = B e^{ik(ct + x\cos\theta + y\sin\theta)} \tag{15}$$

где A и B пропорциональны амплитудам давления (скоростные амплитуды служили бы таким же образом, но большинство микрофонов является индикаторами давления); k — функция длины волны $\frac{2\pi}{\lambda}$, где λ — длина волны, а c — скорость звука в свободном воздухе. Результирующий скоростный потенциал связан со скоростью частицы уравнениями:

$$u = \frac{\partial\Phi}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial\Phi}{\partial y}, \quad w = \frac{\partial\Phi}{\partial z}, \tag{16}$$

где u, v и w представляют компоненты скорости частицы. Также мы можем написать уравнение для силы:

$$\delta p = -\rho_0 \frac{\partial\Phi}{\partial t}, \tag{17}$$

где ρ_0 — нормальная плотность воздуха.

Акустический импеданс отражающей среды определяется как отношение мгновенного изменения давления δp к скорости объемного смещения в направлении x, т. е.

$$z = \delta p \left(\frac{\partial q}{\partial t}\right)_x = \frac{\delta p}{u} = -\left(\frac{\rho_0}{u}\right)\frac{\partial\Phi}{\partial t} \tag{18}$$

Отсюда, у поверхности отражающей среды

$$u = \partial(\Phi_i + \Phi_r)/\partial x = -\left(\frac{\rho_0}{z}\right)\partial(\Phi_i + \Phi_r)/\partial t. \tag{19}$$

Заменяя Φ_i и Φ_r согласно уравнениям (14) и (15) соответственно в уравнении (19) и решая для z, получим:

$$z = \frac{\rho_0 c\,(A + B)}{(A - B)\cos\theta}. \tag{20}$$

Откуда

$$\frac{B}{A} = \frac{P_r}{P_i} = \frac{z\cos\theta - \rho_0 c}{z\cos\theta + \rho_0 c}, \tag{21}$$

и, поскольку

$$\alpha = 1 - \left(\frac{P_r}{P_i}\right)^2,$$

получаем

$$\alpha = 1 - \left(\frac{z\cos\theta - \rho_0 c}{z\cos\theta + \rho_0 c}\right)^2. \tag{22}$$

Коэфициент поглощения зависит, таким образом, от угла падения характерным образом, и если z в основном действителен, что обычно имеет место для многих пористых материалов, коэфициент поглощения имеет максимум при $\cos\theta = \frac{\rho_0 c}{z}$. Для большинства акустических материалов, например, войлоков, черепиц или штукатурок z порядка от 60 до 200 *см/сек* единиц, и $\rho_0 c$ равно приблизительно 41 при комнатной температуре. Отсюда коэфициент поглощения обычно имеет максимум и приближается к единице для некоторого угла падения между 50 и 80° и уменьшается до нуля при касательном падении [19, 21]. Обычно, однако, следует принимать во внимание как действительную, так и мнимую компоненту z, что в результате показывает, что на α влияет ряд факторов, как например, пористость, частота, угол падения, толщина отражающей среды и уступчивость. Вообще α весьма мало (обычно ниже 0,20 для большинства помощающих акустических материалов) для частот в 100 герц или менее и увеличивается примерно до 0,80 или 0,90 при частотах выше 2 000 герц; α обычно увеличивается с увеличением угла падения от 0 до 70 или 80°, а затем уменьшается до 0 при падении в 90°.

§ 10. Поглощение звука пористыми материалами

Теорией поглощения звука пористыми материалами Рэлей занимался вначале [22] и в конце своей научной деятельности [23]. Последняя работа Рэлея была продолжена и расширена Крэндаллем, получившим рабочую формулу для материала с сотовым строением, с малыми порами или каналами, проходящими перпендикулярно внутрь от незащищенной поверхности [24]. Эта формула, примененная к такой структуре, как волосяной войлок, принимая поры близко лежащими и круговыми с диаметром в 0,02 *см*, дает результаты, находящиеся в довольно хорошем соответствии с измеренными для частот выше 400 герц. Кюль и Мейер [19], строго следуя анализу Рэлея, получили формулы для коэфициентов поглощения как конечных, так и бесконечно толстых пористых сред. Для бесконечно толстой пористой среды поглощение представляет собой простую функцию пористости P (определенной как отношение объема пустот к общему объему поглощающего материала), а именно

$$\alpha = 1 - \left(\frac{\cos\theta - P}{\cos\theta + P}\right). \qquad (23)$$

Кюль и Мейер проверили ценность этого уравнения производством измерений методом луча на сложенной в кучу гофрированной бумаги, пористость которой изменялась приложением различного давления поперечно канавкам в бумаге. Рис. 6 показывает четыре кривые, вычисленные по уравнению (23) для четырех пористостей, а именно 0,01, 0,10, 0,20 и 0,50, и две экспериментальные кривые,

полученные Кюлем и Мейером для гофрированной бумаги пористостью в 0,20 и 0,68.

Эта теория расширена Цвиккером[25] и Кремером для применения к пористым материалам не только типа, рассмотренного Кюлем и Мейером, но также и к материалам, в которых поры расположены в большем или меньшем беспорядке, как, например, в акустической черепице, войлоке или штукатурке. Кремер показывает, что для среды с правильно расположенными порами, т. е. порами, простирающимися только перпендикулярно к поверхности поглощающей среды, коэфициент поглощения увеличивается с увеличением угла падения, достигает максимума, а затем уменьшается до нуля при угле падения в 90° (что соответствует заключениям Рэлея, Пэриса, Кюля и Мейера). Далее для правильного расположения пор

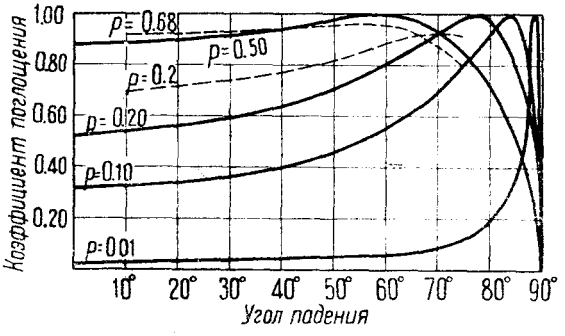

Рис. 6. Сплошные кривые показывают теоретические значения коэфициента поглощения пористых материалов для различных углов падения и для пористостей в 0,01, 0,10, 0,20 и 0,50. Пунктирные кривые представляют экспериментальные значения, полученные Кюлем и Мейером для гофрированной бумаги пористостью в 0,20 и 0,68.

угол падения, при котором имеет место максимум, увеличивается с уменьшением пористости, а также и с уменьшением частоты. Значение максимума не зависит от пористости и приближается к 1,00 при высоких частотах и уменьшается до 0,83 при низких частотах.

Для неправильного расположения пор Кремер показывает, что для низких частот поглощение зависит от угла падения, аналогично правильному расположению, но при высоких частотах коэфициент поглощения не зависит от угла падения; кроме того поглощение увеличивается с пористостью. Далее для низких частот коэфициент при нормальном падении ниже коэфициента, полученного методом реверберации, который дает коэфициент для среднего или произвольного падения, в то время как для высоких частот коэфициент при нормальном падении практически равняется полученному методом реверберации. Полная экспериментальная проверка этих заклю-

чений еще не проведена, хотя Пэрис, а также и Кюль и Мейер получили по меньшей мере подтверждающие доказательства.

Пенман и Ричардсон[26] проверили недавно опытным путем теорию Рэлея для поглощения пористыми материалами при нормальном падении и суммируют свои заключения утверждением, что проведенные ими эксперименты испытания подтверждают общий характер теории Рэлея, но что „до того, как ожидать количественного соответствия, должны быть найдены другие источники затухания звуковых волн в узких трубках“.

§ 11. Оптимальное время реверберации для разговорных и музыкальных помещений

Реверберационные свойства помещений настолько существенны в определении акустического качества как разговорных, так и музыкальных помещений, что стало обычным оценивать эти помещения временем реверберации в них. Исторически чрезмерное значение придавалось времени реверберации при одной частоте, — 512 герц, в действительности, когда говорят, что время реверберации помещения равно стольким-то секундам, всегда подразумевают, что это время реверберации было вычислено или измерено для частоты в 512 герц. Очевидно, однако, что, поскольку речь и музыка составляются из частот приблизительно между 30 и 150 000 герц, необходимо рассматривать реверберационные свойства помещения по всему этому очень широкому диапазону частот. Но, как было упомянуто в § 8, обычно достаточно ограничиваться диапазоном между 128 и 4 096 герц. Это особенно верно в разговорных помещениях, поскольку частоты вне этого диапазона имеют только очень малое влияние на качество речи. К счастью, если время реверберации отрегулировать наиболее применяемыми поглотителями, включая аудиторию, до наиболее благоприятного времени для частоты в 512 герц, время реверберации при других частотах будет вполне удовлетворительным. Отсюда можно, по крайней мере с практической точки зрения, рассматривать реверберацию в помещениях при этой одной частоте в 512 герц при условии, что применяемые поглощающие материалы такой природы, чтобы обеспечить надлежащее уравновешение поглощения между низкими, средними и высокими частотами. В непосредственно следующих за этим параграфах мы ограничим рассмотрение времени реверберации этой одной частотой; позднее мы рассмотрим наиболее благоприятное соотношение между временем реверберации и частотой.

Известная величина реверберации желательна в разговорных помещениях, во-первых, потому, что она увеличивает громкость, что является условием первостепенной важности в больших помещениях, и, во-вторых, потому что наш слух хорошо воспринимает эффект смешения такой величины реверберации, которая соединяет отдельные звуки речи в художественно-артикулированное целое.

Рассмотрим этот первый фактор, имеющий физическую природу и могущий быть оценен количественно. Интенсивность звука в помещении для постоянного звукового источника обратно пропорциональна величине поглощения в помещении [уравнение (4)], а поэтому почти пропорциональна времени реверберации [уравнение (9)]. Интенсивность средней речи в больших помещениях равняется приблизительно только одной сотой необходимой для наиболее четкой слышимости речи. Так, измерения средней интенсивности речи в типовых аудиториях показывают, что уровень речи для среднего оратора не превышает 50 *дб* [27], в то время как этот уровень должен быть равен приблизительно 70 *дб* для обеспечения наиболее благоприятных условий слышимости [28] (рис. 7). Любой выигрыш в громкости речи, какой только может быть получен, например, от увеличения времени реверберации, крайне желателен. Следует иметь в виду, однако, что при слишком большом увеличении реверберации вредные эффекты смешения последовательных слов речи сводят этот выигрыш к нулю или даже к отрицательной величине.

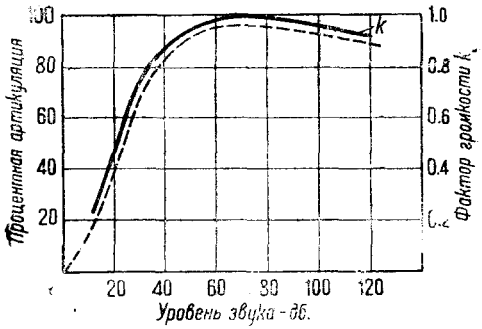

Рис. 7. Пунктирная кривая дает процентную артикуляцию речи при различных уровнях громкости, согласно Флетчеру и Штейнбергу. Сплошная кривая дает фактор громкости для различных уровней звука.

Если мы сможем вывести функциональную зависимость между громкостью и четкостью речи и между временем реверберации и четкостью, то весьма просто определить оптимальное время реверберации для любой указанной громкости или, что то же самое, оптимальное время реверберации для любой указанной величины помещения. Эти соотношения были найдены экспериментальным образом, и результаты показали не только оптимальное время реверберации для разговорных помещений указанной величины, но также количественно указали, насколько хорошо средняя речь может быть слышна в помещении указанной величины и времени реверберации.

Пунктирная линия на рис. 7 дает результаты, полученные Флетчером и Штейнбергом при исследовании влияния громкости на слышимость речи. Сплошная кривая на рис. 7 называется кривой фактора ослабления громкости; ему дается произвольное значение 1,0 при оптимальном уровне звука в 70 *дб* (когда артикуляция равна 96%) и его значение при любом другом уровне звука представляет собой отношение ординаты пунктирной кривой при этом уровне к ординате при уровне 70 *дб*. Так, при отсутствии мешаю-

щего действия шума, эхо или реверберации процентная артикуляция речи будет равна просто 96 K_l, где K_l — фактор ослабления громкости, данный сплошной кривой на рис. 7.

Рис. 8 дает вероятную мощность речи в микроваттах среднего оратора в аудиториях величиной от 6 000 куб. футов до более 10^6 куб. футов. Соответственно это подтверждается практикой, в больших помещениях, где оратор повышает свой голос в стремлении обеспечить достаточную для отчетливой слышимости громкость. Вообще, однако, такой оратор не достигает своей цели. В табл. 2 сведены данные для 8 ораторов в аудитории объемом 6 790 $м^3$ (240 000 куб. футов). Средний уровень* звука был измерен звукоизмерительной установкой (микрофоном, усилителем и

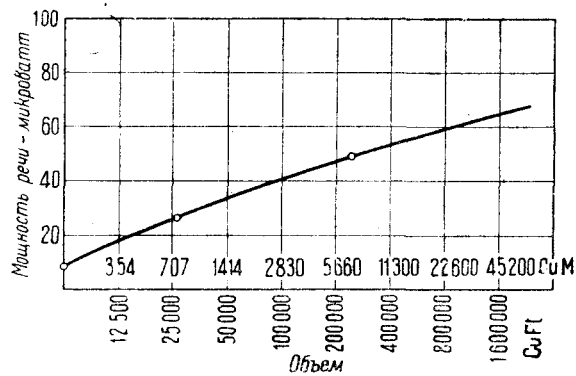

Рис. 8. Вероятная мощность речи в микроваттах для средних ораторов в аудиториях.

электростатическим вольтметром), причем микрофон помещался вблизи центра аудитории. Средняя мощность голоса оратора была вычислена по данным порога слышимости, среднего уровня речи и уравнения (4). Интересно отметить широкое расхождение в отдаче

ТАБЛИЦА 2

Оратор	Наблюденный средний уровень звука (*дб*)	Общее поглощение в помещении ($м^2$)	Средняя мощность голоса оратора (*мв*)
1 мужч	49,4	335	65,5
2 „	45,6	335	27,5
3 „	46,1	413	37,8
4 женщ.	43,0	632	28,4
5 мужч.	43,5	531	26,8
6 „	51 0	502	142,0
7 „	42,7	560	23,4
8 женщ.	44 3	629	38,2
Среднее	45,7		48,9

* Уровень речи в 50 *дб* означает, что интенсивность на 50 *дб* выше интенсивности едва слышимой речи. Термины „уровень звука", „уровень шума" и т. д. будут применяться нами аналогичным образом.

мощности отдельных ораторов. Это объясняет часто наблюдаемую неразборчивость речи многих ораторов, особенно в больших аудиториях. С помощью рис. 8 и данных, аналогичных таковым табл. 2, можно вычислить вероятный уровень звука среднего оратора в помещении известной величины и времени реверберации.

Экспериментальные данные по влиянию реверберации на слышимость речи суммированы на рис. 9. Пунктирная кривая дает процентную артикуляцию для средней речи, усиленной без искажений до уровня звука в 70 *дб*, в больших аудиториях (около 300 000 куб. футов) с различным временем реверберации между 0,5 и 8,0 сек. Артикуляция уменьшается приблизительно на 7% на каждую дополнительную секунду реверберации между 1,0 и 5,0 сек. По-

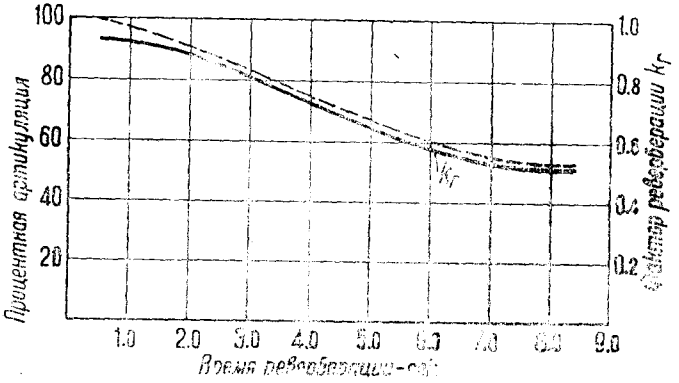

Рис. 9. Пунктирная кривая дает процентную артикуляцию речи для различного времени реверберации в больших аудиториях при уровне речи в 70 *дб*. Сплошная кривая дает величину фактора реверберации для различных значений реверберации.

скольку для удовлетворительной слышимости необходима артикуляция в 75%, реверберация не должна превышать 4,0 сек. даже при уровне звука, достигающем 70 *дб* и при отсутствии мешающего действия шума. Сплошная кривая рис. 9 дает реверберационный фактор ослабления K_r, получаемый аналогично K_l. Значение K_r произвольно принимается равным 1,0 для времени реверберации в 0,5 сек., но оправдывается с практической точки зрения, поскольку мешающее действие такой малой реверберации почти пренебрегаемо мало.

Теперь, если уровень звука менее 70 *дб* и реверберация дольше 0,5 сек. оказывают свое сложное влияние на речь, процентная артикуляция дается 96 K_lK_r, и как K_l, так и K_r могут быть определены с помощью рис. 7 и 9 для помещения известной величины и времени реверберации. Вследствие наличия в аудиториях неизбежного шума имеется также шумовой фактор ослабления громкости, который может быть определен способом, аналогичным только

что описанному для громкости и реверберации. Для относительно тихого помещения шумовой фактор ослабления громкости K_n равен приблизительно 0,96, таким образом, что процентная артикуляция в таких помещениях равна 92 $K_l K_r$. Кривые рис. 10 были вычислены помощью этого отношения, а значения K_l и K_r даны на рис. 7 и 9 соответственно. Эти кривые дают вероятную процентную артикуляцию для среднего оратора в аудиториях различной величины и с различным временем реверберации и предоставляют, таким образом, средство для количественного определения акустических качеств, проектируемых или законченных разговорных помещений. Ограничения, которые должны быть наложены на конструкцию разговорных помещений в отношении как величины, так

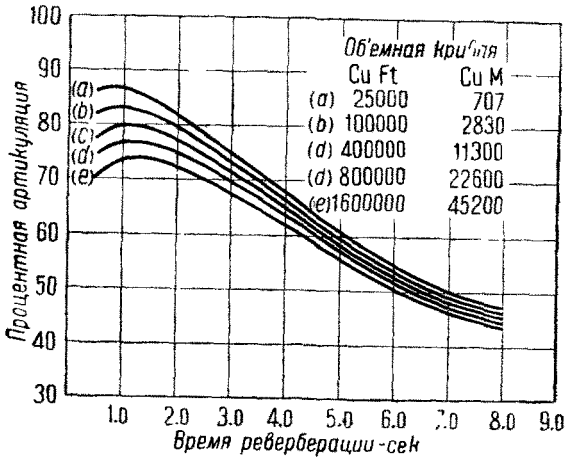

Рис. 10. Кривые, показывающие вероятную процентную артикуляцию речи в помещениях различной величины с различным временем реверберации.

и времени реверберации, ясно показаны этими кривыми. Так, средняя неусиленная речь никогда не может быть слышна удовлетворительно в помещении объемом, например, в 45 200 $м^3$ (1 600 000 куб. футов), независимого от того, какое время реверберации будет обеспечено для помещения, просто потому, что средний оратор не обладает достаточным запасом мощности. Соответствующее усиление речи в больших аудиториях является, следовательно, неизбежным условием для хорошей акустики.

Точка перегиба каждой из кривых на рис. 10 дает оптимальное время реверберации для разговорного помещения соответствующей величины. Оптимальное время для небольших помещений немного менее 1,0 сек. и увеличивается с величиной помещения, достигая примерно 1,5 сек. для очень больших помещений. Максимумы в этих кривых, однако, довольно широкие, таким образом отклонение на $\pm 0{,}25$ сек. от оптимального времени имеет небольшое

значение. Это дает известную свободу для удовлетворения второго фактора, влияющего на время реверберации и упомянутого в начале этого параграфа, а именно, что наша привычка к слушанию речи в помещениях приучила нас (или развила в нас чувство предпочтения) к известному количеству реверберации, достаточному для поддержания приятной длительности и гладкости потока артикулируемой речи. Имеющиеся теоретические и опытные данные [29], казалось бы, показывают, что культивированный вкус предпочитает время реверберации приблизительно от 0,3 до 0,5 дольше указанного максимумами на рис. 10. К счастью, можно удовлетворить это эстетическое требование без серьезных жертв со стороны оптимальных условий для слушания звуков речи. Если сделать компромисс добавлением 0,2 сек. к значениям оптимального времени, показанным на рис. 10, результирующие значения реверберации будут служить удовлетворительным критерием для проектирования акустики разговорных помещений.

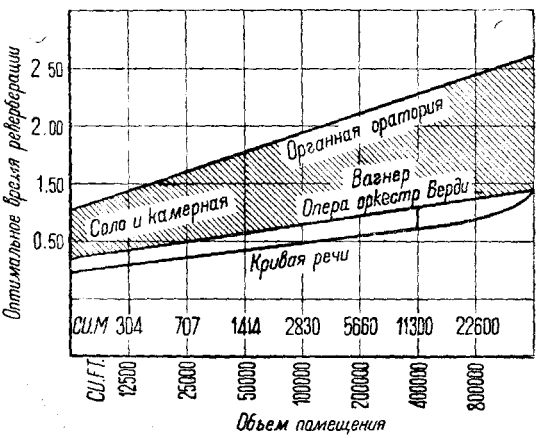

Рис. 11. Заштрихованная площадь дает сводку значений оптимального времени реверберации для музыкальных помещений. Оптимальная кривая для разговорных помещений показана сплошной линией.

Общепризнано, что музыка требует более долгой реверберации, чем речь, и что различные виды музыки требуют различной величины реверберацию. Значения, указанные на графике рис. 11, суммируют наблюдения и заключения исследователей и могут служить практическим руководством при проектировании музыкальных помещений *. Генрих Бенеке [31] определяет оптимальное поглощение для помещений, исходя из значений оптимального времени реверберации, рекомендованных Лифшицом и Ватсоном. Он заключает, что поглощение в помещении должно быть таково, чтобы „время нарастания" (время, необходимое для

* Г. Багеналь дает ценные указания по этому вопросу, основанные на изучении европейских концертных зал. См. [30]. Он приходит к оптимальному времени реверберации для музыкальных помещений, исходя из „Präsenz-Zeit" (интервал времени, в течение которого изменяемое звуковое явление, например, затухание звука в помещении, воспринимается как целое). Он приходит к заключению, что время реверберации должно равняться приблизительно 1,0 сек. в небольших музыкальных помещениях, увеличиваясь до 1,4 сек. в больших концертных залах.

нарастания звука до 0,63 значения уравновешенного состояния) равнялось 0,06 сек.

На последнем заседании Американского акустического общества 4 XII 1933 г. Дж. П. Максфильд прочел доклад по акустике помещений для записи звука, в котором показал, что отношение интенсивностей прямого звука и общего отраженного или реверберирующего звука представляет собой величину, имеющую большое значение в определении акустического состояния помещения.

§ 12. Изменение времени реверберации с частотой для разговорных и музыкальных помещений

В предыдущем параграфе мы представили результаты опытов и индуктивного мышления, определяющие значения оптимального времени реверберации для разговорных помещений при частоте в 512 герц. Процесс получения этих значений прост, прям и ограничен в точности только ошибками экспериментальной техники. Далее правильность этих оптимальных значений подтверждается одобрением публики акустики разговорных помещений со временем реверберации, соответствующим им. В настоящем параграфе мы рассмотрим более трудную проблему определения, каким образом время реверберации должно изменяться с частотой для того, чтобы обеспечить лучшее акустическое условие для слушания речи или музыки. Мы будем рассматривать это условие как „оптимальную реверберационную характеристику". Особенно интересно найти функциональную зависимость, какая должна существовать между временем реверберации и частотой в идеальном разговорном или музыкальном помещении.

Для определения оптимальной реверберационной характеристики было предложено несколько критериев, два из которых мы сейчас рассмотрим. Первый критерий, предложенный Мак Нэйром [32] *, гласит, что уровень громкости всех частотных компонент в разговорных и музыкальных помещениях должен затухать с одинаковой и постоянной скоростью; и второй критерий, предложенный автором [34] **, согласно которому все частотные компоненты сложного звука должны затухать с такой скоростью, чтобы все они достигли порога слышимости одновременно. При осуществлении первого критерия второй уже приближенно выполнен, по крайней мере, для частот до 2 000 герц. Оба критерия требуют времени реверберации при низких частотах (порядка 100 герц) приблизительно вдвое большего, чем при 512 герц. Согласно

---

* Громкость зависит от частоты весьма значительным образом. Так, тон в 100 герц 30 *дб* выше порога звучит таким же громким для среднего человека, как и тон в 1 000 герц 60 *дб* над порогом. См. Флетчер и Мунсон [33].

** Это в основном критерий, предложенный Лифшицом [29] для определения оптимального времени реверберации в помещениях различной величины.

первому критерию время реверберации должно оставаться приблизительно постоянным для частот выше 1 000 герц; согласно второму критерию оно должно увеличиваться для частот выше 2 000 герц. Первый критерий зависит от функциональной зависимости между громкостью, уровнем звука и частотой и одинаковый для речи, музыки или каких-либо других звуков. Второй зависит от „спектрального распределения" колебаний, составляющих речь или музыку, и поэтому различен для отдельных звуков. С практической точки зрения автору кажется желательным отдать предпочтение реверберационной характеристике, соответствующей второму критерию, основанному на среднем спектральном распределении речи и музыки, особенно потому, что этот критерий требует небольшого увеличения времени реверберации для частот выше 1 000 герц. Это благоприятствует выделению высоких частот, т. е. ча-

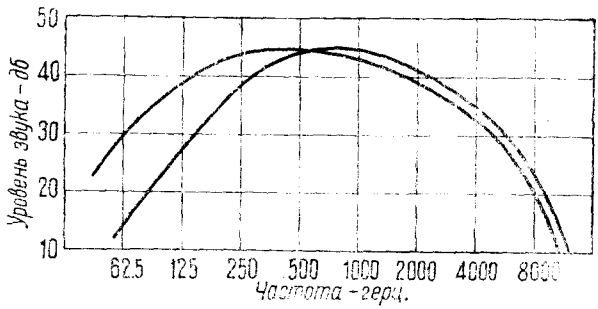

Рис. 12. Распределение энергии речи мужчин и женщин (по Флетчеру). Кривая слева — для мужчин, справа — для женщин.

стот, наиболее важных для правильного распознавания звуков речи и сохранения качественности музыки и претерпевающих наиболее вероятное чрезмерное ослабление при распространении через воздух.

Данные дающие приблизительное спектральное распределение речи мужчин и женщин, были получены Флетчером [35] и показаны в соответствующей форме на рис. 12. Уровень звука при различных частотах приблизительно таков, каким он был бы для неусиленной речи в большой аудитории. Уровень звука имеет максимум при 500—1 000 герц как для речи, так и для музыки и спадает весьма быстро как при низких, так и при высоких частотах. Если скорости затухания при различных частотах таковы, что все компоненты достигнут порога слышимости в то же мгновение, тогда, очевидно, скорость затухания (в децибелах в секунду) при известной частоте должна быть прямо пропорциональна уровню звука при данной частоте, т. е. пропорциональна ординатам, данным таким распределением, как показано на рис. 12 и 13. Или, поскольку время реверберации обратно пропорционально скорости затухания, критерий, предложенный нами, будет оправдан при условии $St = \text{const}$, где S — уровень звука при известной частоте

и t — время реверберации при этой частоте. Этот критерий должен рассматриваться только как временное рабочее правило, представляющее удовлетворительную реверберационную характеристику между частотами приблизительно от 100 до 4 000 герц, а не как закон, основанный на физических и физиологических принципах. При очень низких и очень высоких частотах, например, предложенный критерий потребовал бы время реверберации, бесконечно долгое. В этом отношении критерий, предложенный Мак Нэйром, а именно, что в течение затухания уровень громкости всех компонент должен уменьшаться с постоянной скоростью, является более приемлемым; но критерий $St = \text{const}$ предпочитается здесь главным образом потому, что он предусматривает увеличение времени реверберации при частотах, выше приблизительно

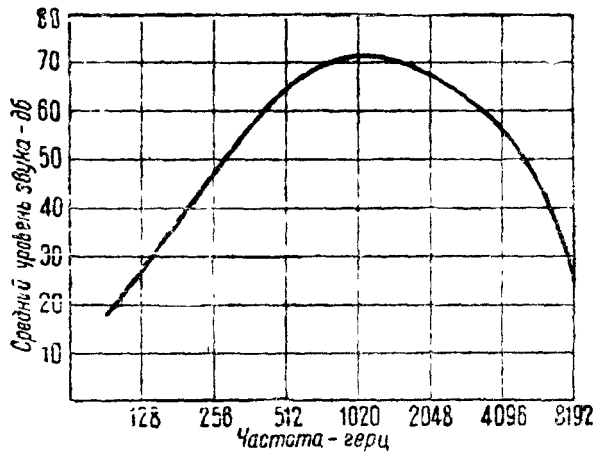

Рис. 13. Приблизительное распределение энергии музыки, исполняемой на пианино или оркестром.

1 000 герц. Венте [36] также обращает внимание на известные факты, которые должны благоприятствовать увеличению времени реверберации при высоких частотах. Он особенно подчеркивает необходимость: 1) сохранения или усиления высокочастотных компонент речи вследствие их значения в согласных и 2) подавления низкочастотных компонент вследствие их маскирующего эффекта на высокие частоты. Эти аргументы заслуживают внимания с практической точки зрения, особенно потому, что большая часть материалов, применяемых для поглощения звука в помещениях, обладает значительно большей поглощаемостью для высоких частот, чем для низких.

Рассмотренные здесь критерии предполагают, чтобы оптимальная реверберационная характеристика была такой, при которой время реверберации вдвое дольше при 128 герцах, чем при 512 герцах, уменьшаясь равномерно от 128 до 512 герц, остается постоян,

ным для частот от 1 000 до 2 000 герц; а затем снова увеличивается при более высоких частотах. Точно формулировать оптимальную реверберационную характеристику еще преждевременно: она может быть определена только дальнейшими серьезными и весьма долгими экспериментами, требующими сотрудничества акустиков, фонетиков, музыкантов и, возможно, эстетов *.

§ 13. Передача звука через строительные материалы

Из теории отражения и поглощения, рассмотренной в § 9, очевидно [уравнение (21)], что плоская звуковая волна, падающая на жесткий непористый материал, например, штукатурку, камень или дерево, почти целиком отражается, и что только очень малая часть

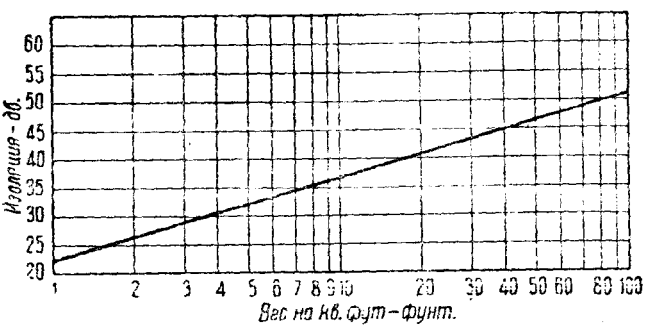

Рис. 14. Изоляция звука сплошными, непористыми перегородками. Потеря при передаче в *дб* прямо пропорциональна логарифму массы на кв. фут перегородки.

падающей звуковой волны продолжает распространяться в виде преломленного луча в новой среде. Акустический импеданс z большинства жестких материалов (данный произведением плотности среды на скорость звука в ней) очень большой по сравнению с акустическим импедансом воздуха, таким образом, что для жестких непористых материалов, образующих границы большинства помещений, не более одной миллионной падающей звуковой энергии, преломляется в граничащий материал. Это малое количество преломленной энергии не соответствует наблюденной значительно большей интенсивности звука, переданного через строительные перегородки и, действительно, следует искать других объяснений. Количество изоляции (измеренное в потере в децибелах), обеспечиваемое жесткой стеной, оказывается весьма точно пропорциональным логарифму массы на единицу площади стены (рис. 14), что пока-

* Опыт автора показывает, по крайней мере, для случая разговорных помещений, что реверберационная характеристика не является такой критической, как считают некоторые (см. примечание 35). М. Страт полагает, что искажение, вводимое селективным поглощением, не ухудшает серьезно восприятия звука.

зывает, что стена реагирует на переменную силу ударяющихся воздушных колебаний в основном так же, как масса. В действительности, Мейер [38] показал, что среднее квадратичное ускорение жесткой перегородки (от четвертьдюймовых деревянных панелей до тяжелых кирпичных или бетонных стен) прямо пропорционально переменному давлению падающего звука, по крайней мере, для частот, выше 100 герц. Основная частота жестких панелей, типа применяемых в зданиях, значительно ниже 100 герц (обычно порядка 20—50 герц), и следует ожидать поэтому, что реакция массы, пропорциональная частоте, будет доминирующей при частотах, значительно выше основной частоты перегородки. В случае тонких, гибких панелей жесткость, внутреннее демпфирование, величина панели и способ закрепления, — все это влияет на величину колебательной энергии, сообщаемой перегородке. Вообще необходимо принимать эти факторы во внимание только для низких частот, ниже приблизительно 200 герц для материалов или конструкций, применяемых в зданиях.

Совершенно другой вид передачи звука имеет место в очень пористых материалах, например, в свободной или спрессованной шерсти или хлопке, или в поддерживаемых панелях из пемзы, шлака и т. д. В пористой среде такого типа преломленный луч становится значительным, и потеря звуковой энергии получается в результате действия вязких сил внутри малых пор, трения волокон или других ингредиентов между собой и внутреннего демпфирования колебаний изгиба компонентных частей конструкции. Преломленный луч поэтому претерпевает большую аттенюацию, и общее ослабление (или изоляция) в децибелах будет пропорционально толщине пористой перегородки. Изоляция, обеспечиваемая войлочными материалами — порядка 3—5 *дб* на дюйм толщины для частоты в 512 герц. Как и следовало ожидать, аттенюация, а поэтому и изоляция, быстро увеличивается с увеличением частоты.

§ 14. Расчет звукоизоляции и ослабление шума в зданиях

Изоляция звука является очень важным фактором акустического проектирования зданий, которому почти никогда не уделяют должного внимания. Хотя удовлетворительная изоляция звука в зданиях часто несовместима с вентиляцией посредством открытых окон, многое может быть сделано для сокращения чрезмерного шума, наблюдаемого в большинстве городских помещений. Можно, по крайней мере, вычислить изоляционное значение любой предполагаемой конструкции и определить этим, какие элементы предполагаемого здания больше всего ответственны за плохую или недостаточную изоляцию.

Если уравнение (4) переписать в терминах средней интенсивности I, определенной средней скоростью потока звуковой энерги

на единицу площади границы, а именно $\rho_0 \frac{c}{4}$ в уравновешенном состоянии, тогда

$$I = \frac{E}{a}, \tag{24}$$

где E — скорость подачи звуковой энергии в помещение и a — общее поглощение в помещении. Предположим, что однокомнатная конструкция расположена таким образом, что ее стены и потолок окружены звуковым полем равномерной интенсивности I'. Тогда

$$E = I'(\tau_1 s_1 + \tau_2 s_2 + \ldots) = I' \Sigma \tau s, \tag{25}$$

где s_1, s_2 . . . — площади различных типов границ и τ_1, τ_2 . . . — соответствующие коэфициенты проницаемости (определенные отношением переданной к падающей звуковой энергии). Замещая уравнение (25) в уравнении (24) и определяя фактор ослабления шума как $\frac{I'}{I}$, где I — результирующая интенсивность в помещении, получаем

$$\frac{I'}{I} = \frac{a}{\Sigma \tau s}, \tag{26}$$

т. е. фактор ослабления шума, показывающий, во сколько раз интенсивность наружного шума уменьшается после передачи в помещение, прямо пропорционален количеству поглощения в помещении и обратно пропорционален общей проницаемости. Поскольку коэфициент поглощения и проницаемости большинства строительных материалов и конструкций известны, можно вычислить посредством уравнения (26) фактор ослабления шума для всех почти предполагаемых или законченных зданий или помещений. Обычно принято ослабление шума выражать в децибелах, в каковом случае уравнение (26) принимает вид:

$$\text{ослабление шума (в децибелах)} = 10 \lg_{10}\left(\frac{a}{\Sigma \tau s}\right). \tag{27}$$

Это уравнение с очевидными изменениями применимо не только для однокомнатных конструкций, но и для всех типов помещений, встречаемых на практике. Например, если два примыкающих помещения отделены сплошной перегородкой, за исключением двери, $\Sigma \tau s$ составляется только из $\tau_1 s_1 + \tau_2 s_2$, где τ_1 и s_1 относятся к перегородке, а τ_2 и s_2 — к двери. В большинстве помещений τ_2 будет превышать τ_1 на значительно большее отношение, чем s_1 превышает s_2 и, следовательно, большая часть передачи будет через дверь. В таком случае было бы безнадежно улучшать изоляцию перегородки без обеспечения еще большего улучшения изоляции двери. Другие примеры, например, передача через окна, отверстия, вентиляционные каналы и т. д., показывают необходимость производства вычислений звукоизоляции в связи со всей

конструкцией здания. К несчастью, это редко, если вообще когда-либо, делается. Следует признать, однако, что многие архитекторы и особенно изготовители звукопоглощающих материалов осознали значение числителя уравнения (27) и применяют соответственно поглощающие материалы для потолков (или как для потолков, так и стен) в учреждениях, больницах, ресторанах и других общественных зданиях для целей ослабления наружного, так же как и внутреннего шума. Посредством этого часто возможно ослабить шум в помещении на 7 или 8 *дб*, что, к счастью, при условиях, наиболее часто встречаемых на практике, воспринимается средним человеком соответствующим уменьшению громкости почти наполовину, а это часто представляет собой различие между удовлетворительными и неудовлетворительными акустическими условиями.

В заключение следует отметить, что если в районе предполагаемого для постройки участка были проведены соответствующие измерения шума, и если величина допустимого в здании шума точно определена или согласована, можно спроектировать это здание таким образом, чтобы заданные необходимые требования были полностью осуществлены без значительного увеличения стоимости здания.

ЛИТЕРАТУРА

1. V. O. Knudsen, Architectural Acoustics, John Wiley a. Sons, 1932; Bagenal a Wood Planning for Good Acoustics, Metnuen, 1931; P. E. Sabine, Acoustics and Architecture, Mc Graw. Hill. 1931.

2. J. B. Upham, A Consideration of Some of the Phenomena and Laws of Sound, Their Application in the Construction of Buildings, Designed especially for Musical Effects. Am. J. of Science and Art **65**, 215—226, 348—353; **66**, 21—23, 1853.

3. Joseph Henry, Acoustics Applied to Public Buildings, Smitsonion Reports 1854—1856.

4. T. Roger Smith, Acoustics of Public Buildings, 1861.

5. Rayleigh, Theory of Sound, V. II, p. 128, Mc Millan 1926.

6. Collected Papers on Acoustics, Harward University Press, 1922.

7. A. Jaeger. Zur Theorie des Nachhalls, Sitzungsber, d. Kais. Akad. d. Wiss. in Wien, Math.-Natur. Klasse, 120, 1911.

8. См., напр мер, Eyring, J. Acous. Soc. Am. 1, 127, 1930; Fokker Physica **7**, 198, 1927; Shutzer u. Waetzman, Ann. Phys. **1**, 671, 1929

9. V. O. Kundsen, Architectural Acoustics, p. 132—141, J. Willey a Sons, 1932.

10. V. O. Knudsen, J. Acous. Soc. Am. **3**, 126, 1931.

11. V. O. Knudsen, J. Acous. Soc. Am. **5**, 112, 1933.

12. H. O. Kneser, J. Acous. Soc. Am. **5**, 122, 1933.

13. M. J. O. Strutt, Z. ang. Mech. **10**, 360, 1930.

14. Schuster u. Wätzmann, Ann. Phys. **1**, 671, 1929.

15. V. O. Knudsen, J Acous. Soc. Am. **4**, 20, 1932.

16. F. V. Hunt, J. Acous. Soc. Am. **5**, 127, 1933.

17. Meyer & Just, E. N. T. **5**, 293, 1928; Barrow, J. Acous. Soc. Am **3**, 562, 1932.

18. F. R. Watson „Acoustics of Buildings" p. 102, J. Willey & Sons, 1930.
19. Kühl und Meyar, Berl. Akad. Ber. Math. Phys. Kl. **26**, 416, 1923; Gremer, E. N. T. **10**, 242; **19**, 302, 1933.
20. Grandell, Theory of Vibrating Systems and Sound, s. 100 Van Nostrand, 1926.
21. См. E. T. Paris, On the Reflection of Sound from a Porous Surface, Proc. Roy. Soc. A. **115**, 407, 1927.
22. Rayleigh, The Theory of Sound **11**, 328—333, 1896.
23. Rayleigh, The Resonant Reflection of Sound from a Perforated Wall, Phil. Mag. **39**, 225 1920.
24. Grandall, Theora of Vibrating Systems and Sound, pp. 186—191, Van Nostrand, 1926.
25. C. Zwikker, Gelindabsorptie door Porenze Wanden, de Ingenieur, 20, 1932.
26. Penman and Richardson, Absorption of Sound by Porous Materials at Normal Incidence, J. Acoust. Soc. Am. 4, 322, 1933.
27. V. O. Kunden, Architectural Acoustics, p. 377, J. Wiley & Sons 1932.
28. H. Fletcher, Speech and Hearing, p. 272, Van Nostrand 1929.
29. См., например, Lifschiz, Phys. Rev. 27, 618, 1926; Watson, J. Am. Inst. Arch **16**, 259, 1928.
30. Bagenal and Wood, Planing for Good Acoustics, Methuen, 1931; G. v. Bekesy, Ann. Physik **8**, 851, 1931.
31. Heinrich Benecke, Ann. Phys. **15**, 259, 1932.
32. W. A. Mac Nair, Op.imum Reverberation Time for Auditoriums J. Acoust Soc. Am. 1, 242, 1930.
33. Fletscher and Munson, J. Acous. Soc. Am. **5**. 82, 1933.
34. V. O. Knudsen, Acoustics of Music Rooms, J. Acoust. Soc. Am. **2**, 234, 1931.
35. H. Fletcher, Physical Characteristics of Speech and Music,. Bell. Sys. Tech. J. 10, 349, 1931; Rev. Mod. Phys. **3**, 258, 1931.
36. E. C. Wente, Am. Arch. August **20**, 1928.
37. M. J. O. Strutt, Rev d'Acoustique **2**, 1, 1933.
38. Meyer, Grundlegende Messungen zur Schallisolation von Einfachen Trennwänden, Sitzungsber. d. Preuss. Akad. d. Wiss. Phys.-Math. Klass, IX, 1931,