В акустике принято измерять время реверберации как время, прошедшее с момента выключения источника до момента, когда уровень плотности звуковой энергии уменьшается на 60 дБ или когда плотность акустической энергии в данной точке помещения уменьшается в 10^6 раз. Это время называют *стандартным временем реверберации*.

§ VII.2. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ РЕВЕРБЕРАЦИИ

Мощность источника и плотность энергии диффузного поля. Составим уравнение энергетического баланса акустической энергии в помещении, где действует источник звука и на границе имеется поглощение.

Обозначим акустическую мощность источника $\mathcal{P}_a$, поток поглощенной мощности ΔI_g, плотность акустической энергии $\mathcal{E}$, объем помещения V.

Акустическая энергия, которая излучается за время Δt источником звука, равна приращению акустической энергии всего объема помещения и той энергии, которая поглощается границами объема за это же время:

$$\mathcal{P}_a(t)\,\Delta t = \Delta(V\mathcal{E}) + \Delta W_g\,\Delta t. \qquad \text{(VII.2.1)}$$

Заменив в (VII.2.1) мощность ΔW, теряемую на границах помещения, на A и I_g $\left(\Delta W_g = AI_g = A\dfrac{\mathcal{E}c}{4}\right)$, получим дифференциальное уравнение относительно плотности энергии:

$$\frac{d\mathcal{E}}{dt} + \frac{Ac}{4V}\mathcal{E} = \frac{1}{V}\mathcal{P}_a(t). \qquad \text{(VII.2.2)}$$

Его решают с помощью интегрирующего множителя $e^{Act/(4V)}$:

$$e^{\frac{Act}{4V}}\frac{d\mathcal{E}}{dt} + \frac{Ac}{4V}e^{\frac{Act}{4V}}\mathcal{E} = \frac{1}{V}e^{\frac{Act}{4V}}\mathcal{P}_a(t). \qquad \text{(VII.2.3)}$$

Левая часть (VII.2.3) представляет собой производную от $\mathcal{E}e^{\frac{Act}{4V}}$:

$$\frac{d}{dt}\left(\mathcal{E}e^{\frac{Act}{4V}}\right) = \frac{1}{V}e^{\frac{Act}{4V}}\mathcal{P}_a(t).$$

Таким образом,

$$\mathcal{E}(t) = \frac{1}{V}e^{-\frac{Act}{4V}}\int_{-\infty}^{t} e^{\frac{Ac\tau}{4V}}\mathcal{P}_a(\tau)\,d\tau. \qquad \text{(VII.2.4)}$$

Формула (VII.2.4) показывает, что плотность звуковой энергии помещения определяют не только акустической мощностью в данный момент времени, но и зависимостью мощности от времени в прошлом. Зависимость $\mathcal{E}(t)$ от мощности, которую имел источник в предыдущие моменты времени, существенна только для интервала времени начиная с $t_1 = -4V/(AC)$. Исследуем несколько частных случаев формулы (VII.2.4).

Допустим, что источник звука включен в момент времени $t=0$ и действует постоянно. Пусть акустическая мощность $\mathcal{P}_а(\tau)$ источника при $\tau>0$ меняется значительно медленнее, чем $\exp[Ac\tau/(4V)]$. Запишем эти условия в виде

$$\mathcal{P}_а(\tau)=\begin{cases} 0 & \text{при} \quad -\infty<\tau\leqslant 0, \\ \mathcal{P}_а(\tau) & \text{при} \quad 0<\tau\leqslant t_0. \end{cases}$$

Кроме того, $\frac{d\mathcal{P}(\tau)}{d\tau}\leqslant\frac{Ac}{4V}e^{Ac\tau/(4V)}$. При этих условиях в (VII.2.4) пределы интегрирования ограничивают областью $0<\tau\leqslant t_0$. Функцию $\mathcal{P}_а(\tau)$, как медленно изменяющуюся, можно вынести за знак интеграла:

$$\int_0^{t_0} e^{Ac/(4V)}\mathcal{P}_а(\tau)\,d\tau=\mathcal{P}_а(t)\int_0^{t} e^{Ac\tau/(4V)}\,d\tau.$$

Для плотности энергии получаем

$$\mathcal{E}(t)=$$

$$=\frac{1}{V}\mathcal{P}_а(t)\frac{4V}{Ac}\left(e^{Act/(4V)}-1\right)e^{-Act/(4V)}=\frac{4\mathcal{P}(t)}{Ac}\left(1-e^{-Act/(4V)}\right). \qquad \text{(VII.2.5)}$$

Процесс установления звука, описываемый формулой (VII.2.5), определяют временем, прошедшим после включения источника сигнала и достаточным для нарастания плотности энергии звука от 0 до $4\mathcal{P}(t)(1-e^{-1})/(Ac)$:

$$t_1=\frac{4V}{Ac}. \qquad \text{(VII.2.6)}$$

Пусть за время от 0 до t_0 источник звука остается включенным. В этом случае при достаточно большом t_0 второй член в формуле (VII.2.5) очень мал, поэтому

$$\mathcal{E}(t)=\frac{4\mathcal{P}_а(t)}{Ac}, \qquad \text{(VII.2.7)}$$

т. е. при достаточно большом времени t_0 плотность акустической энергии пропорциональна мощности источника звука и обратно пропорциональна коэффициенту поглощения A.

Допустим, что источник звука изменяет акустическую мощность по закону

$$\mathcal{P}_а(t)=\begin{cases} \mathcal{P}_а(t) & \text{при} \quad -\infty<\tau\leqslant t_0, \\ 0 & \text{при} \quad t_0<\tau<t, \end{cases}$$

где $\mathcal{P}_а(t)$ — слабо изменяющаяся функция времени.

В этом случае

$$\int_{-\infty}^{t} e^{Ac\tau/(4V)}\mathcal{P}_а(\tau)\,d\tau=\mathcal{P}_а(t)\int_{-\infty}^{t_0} e^{A_0\tau/(4V)}\,d\tau=\mathcal{P}_0(t_0)\frac{4V}{Ac}e^{Act_0/(4V)}. \qquad \text{(VII.2.8)}$$

Подставив это выражение в формулу плотности акустической энергии, найдем

$$\mathscr{E}(t) = \mathscr{P}_{\text{а}}(t_0)\frac{4}{Ac}\,\mathrm{e}^{-Ac(t-t_0)/(4V)}. \qquad \text{(VII.2.9)}$$

Выбрав в качестве начала отсчета времени момент включения источника ($t_0=0$), получим

$$\mathscr{E}(t) = \mathscr{P}_{\text{а}}(t)\frac{4}{Ac}\,\mathrm{e}^{-Act/(4V)}. \qquad \text{(VII.2.10)}$$

Если в помещении действует источник, у которого зависимость мощности от времени имеет характер прямоугольного импульса, то плотность акустической энергии помещения после включения источника нарастает до некоторого значения и к моменту выключения уменьшается до нуля, причем ее подъем и спад подчиняются экспоненциальной зависимости от времени. Время уменьшения плотности звуковой энергии в n раз называют *временем реверберации*.

Стандартное время реверберации. Формула Сэбина. Время реверберации для $n=10^6$ называют *стандартным*. Найдем формулы зависимости стандартного времени реверберации от свойств помещения. Подобно тому, как это принято для интенсивности, плотность энергии звукового поля в помещении выражают в децибелах. За нулевой порог или нулевой уровень плотности звуковой энергии принята плотность энергии, соответствующая нижнему порогу слышимости. Плотность энергии послезвучания (VII.2.10) определяют в децибелах

$$N = 10\lg\frac{\mathscr{E}(t)}{\mathscr{E}_0}, \qquad \text{(VII.2.11)}$$

где $\mathscr{E}(t)$ — величина, определяемая формулой (VII.2.10); $\mathscr{E}_0 = 10^{-9}$ эрг/см^3 — плотность энергии нижнего порога слышимости.

Подставим в (VII.2.11) выражение для плотности акустической энергии $\mathscr{E}(t)$ (VII.2.10) и, выполнив необходимые преобразования, получим

$$N = 10\lg\frac{4\,\mathscr{P}_{\text{а}}(t)}{Ac} + 90 - 4{,}34\frac{Act}{4V}. \qquad \text{(VII.2.12)}$$

Уровень послезвучания изменяется по линейному закону (VII.2.12). Поэтому разность $N(t) - N(t+t_{60})$ равна

$$60 = 4{,}34\frac{Ac}{4V}t_{60}.$$

Следовательно, стандартное время реверберации

$$t_{60} = 60\frac{4}{4{,}34c}\frac{V}{A},$$

где V — объем помещения, м^3; A — коэффициент поглощения, м^2.

Если принять скорость звука в воздухе $c=330$ м/с, то $60\frac{4}{4{,}34c} = 0{,}162$ с/м. В результате стандартное время реверберации выразится формулой Сэбина

$$t_{60}=0{,}162\,\frac{V}{A},\ \text{с}. \qquad \text{(VII.2.13)}$$

Метод мнимых источников. Формула Эйринга. Формула (VII.2.13) выполняется точно, если имеется диффузное поле, т. е. если в помещении будет достаточно большое число волн. Если средний коэффициент отражения больше, чем 0,2, то формула (VII.2.12) приводит к несоответствию с данными эксперимента.

Более строгая теория разработана Эйрингом. Она основана на применении методов геометрической оптики. Согласно этой теории, звуковое поле, создаваемое в помещении точечным источником звука, можно представить как звуковое поле множества мнимых источников, возникающих в результате зеркального отражения звуковых пучков от границ помещения.

Система некоторого числа мнимых источников, полученных в результате зеркального отражения точечного источника O от плоских границ помещения, представлена на рис. VII.2.1.

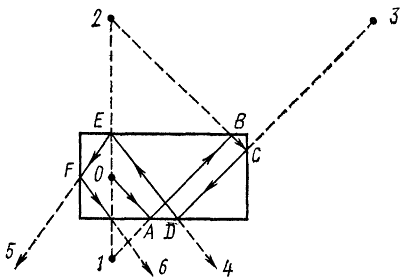

Рис. VII.2.1

Здесь 1 — изображение источника O, полученное в результате первого отражения; 2 — изображение, полученное в результате второго отражения, и т. д.; отрезки OA, AB и BC и т. д. — расстояния пробега звукового пучка между двумя последовательными отражениями. Для расчетов введем среднюю длину $\langle l\rangle$ свободного пробега пучка. Для помещения прямоугольной формы средний путь пробега $\langle l\rangle = 4V/S$ (где S — суммарная площадь границ).

Средняя длина свободного пробега звукового пучка связана со средним временем свободного пробега соотношением $\tau=\langle l\rangle/c$ (c — скорость звука).

Поле мнимых источников обладает двумя важными свойствами. Одно из них состоит в том, что при внезапном включении источника звука мнимые источники появляются последовательно друг за другом. После выключения источника звука мнимые источники исчезают в той же (начальной) последовательности.

Другой особенностью поля мнимых источников является свойство, согласно которому акустическая мощность каждого мнимого источника зависит от коэффициента отражения и кратности отражения. Очевидно, акустическая мощность мнимого источника, возникшего после первого отражения,

$$\mathscr{P}_{\text{a}1}=\mathscr{P}_{\text{a}}\,\frac{I_{g1}}{I_g}=\mathscr{P}_{\text{a}}q.$$

Акустическая мощность второго мнимого источника

$$\mathscr{P}_{\text{a}2}=\mathscr{P}_{\text{a}1}\,\frac{I_{q1}}{I_q}=\mathscr{P}_{\text{a}1}q=\mathscr{P}_{\text{a}}q^2.$$

Наконец, акустическая мощность n-го мнимого источника

$$\mathcal{P}_{\text{a}n} = \mathcal{P}_{\text{a}} q^n. \qquad \text{(VII.2.14)}$$

Плотность акустической энергии, запасенной объемом помещения за некоторое время действия основного источника, можно представить как сумму энергий, вносимых в объем всеми мнимыми источниками. С учетом (VII.2.14)

$$\mathcal{E} = \frac{\mathcal{P}_{\text{a}} t}{V} = \frac{\mathcal{P}_{\text{a}} \tau}{V} q + \frac{\mathcal{P}_{\text{a}} \tau}{V} q^2 + \ldots = \frac{\mathcal{P}_{\text{a}} \tau}{V} q (1 + q + q^2 + \ldots + q^n).$$

Спустя время t после выключения основного источника мнимые источники первых номеров замолкнут, останутся лишь источники, соответствующие номеру $n = t/\tau$. К этому моменту плотность акустической энергии

$$\mathcal{E}(t) = \frac{\mathcal{P}_{\text{a}} \tau}{V} (q^n + q^{n+1} + \ldots) = \frac{\mathcal{P}_{\text{a}} \tau}{V} q^n (1 + q + q^2 + \ldots) = \frac{\mathcal{P}_{\text{a}} \tau}{V} q^n \frac{1}{1-q}.$$

Представляя число q в виде $q = \text{e}^{\ln q}$, получаем

$$\mathcal{E}(t) = \frac{\mathcal{P}_{\text{a}} \tau}{V(1-q)} \text{e}^{-n \ln (1/q)}.$$

Введем в это выражение коэффициент поглощения $\alpha = 1 - q$ и, кроме того, кратность отражения $n = tc/l$. Учитывая выражение для средней длины свободного пробега $l = 4V/S$, имеем

$$\mathcal{E}(t) = \frac{4\mathcal{P}_{\text{a}}}{S\alpha c} \text{e}^{-\frac{cS}{4V} t \ln (1-\alpha)}.$$

Уровень плотности акустической энергии

$$N = 10 \lg \frac{4\mathcal{P}_{\text{a}}}{\alpha c S} + 90 - 4{,}34 \frac{cS}{4V} \ln (1 - \alpha) t. \qquad \text{(VII.2.15)}$$

Отсюда для стандартного времени реверберации получаем *формулу Эйринга*

$$t_{60} = -\frac{0{,}161 V}{S \ln (1-\alpha)}, \qquad \text{(VII.2.16)}$$

где V — объем помещения; S — площадь поверхности, ограничивающей помещение; α — средний коэффициент поглощения покрытий границ.

Оптимальное время реверберации. Изменяя в данном помещении отношение A/V по своему усмотрению, можно построить зал с тем или иным временем реверберации. Выбор времени реверберации во многом определяется субъективным восприятием процессов нарастания и спадания уровня интенсивности. Например, если время реверберации велико, то при воспроизведении речи или музыки остаточный звук может перекрыть последующие элементы звучания. Вследствие этого звучание музыки будет нечетким, речь неразборчивой. При малом времени реверберации сигнал воспринимается четко, но без своеобразной фоновой окраски.

Относительно того, какое время реверберации оптимально, нет единого мнения. В основу определения оптимального времени реверберации различные авторы положили те или иные постулаты. Так, например, Кнудсен исходил из требования, по которому время реверберации должно быть таким, чтобы все частотные компоненты звучания одновременно достигали порога слышимости. Однако его условие приводит к тому, что оптимальное время реверберации больше для низких частот, чем для высоких. Согласно Дрейзену, для выбора оптимального времени реверберации необходимо ограничивать флуктуации процесса затухания звука в таких пределах, чтобы при всех частотах эти флуктуации находились на равном уровне физиологического восприятия.

Если строить график зависимости оптимального времени реверберации от частоты, положив в основу те или другие постулаты [18], то получаются кривые, которые показывают, что оптимальное время реверберации на низких частотах (50 Гц) имеет значение $\approx 1{,}8$ с и $\approx 2{,}8$ с, затем уменьшается. На частотах 200 — 1500 Гц оптимальное время реверберации остается постоянным (≈ 1 с) и далее с повышением частоты медленно увеличивается.

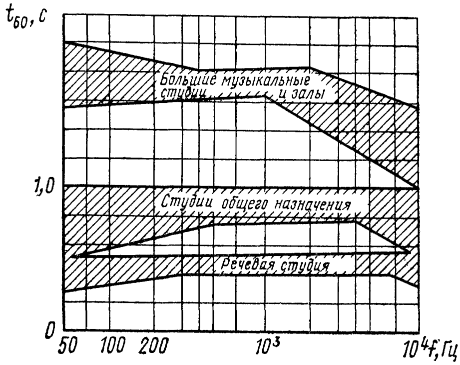

Рис. VII.2.2

При строительстве залов и студий не всегда строго руководствуются рекомендациями об оптимальном времени реверберации. Время реверберации хороших в акустическом отношении помещений приведено на рис. VII.2.2. Эта диаграмма времени реверберации получена в результате обследования большого числа залов. Кривые дают полное представление о времени реверберации действующих залов и студий верхних и нижних частот. Из рассмотрения диаграммы видно, что реальное время реверберации зависит от объема помещения и характера передач.

Для речевых студий значение времени реверберации на нижних и верхних частотах лежит в пределах 0,3 — 0,5 с, на средних — 0,4 и 0,5 с. Малое время реверберации в речевых студиях связано с необходимостью четкого восприятия речи диктора.

В студиях общего назначения время реверберации на низких и высоких частотах лежит в пределах 0,5 — 1 с, на средних — 0,78 — 1 с. Музыкальные студии и залы для низких частот имеют время реверберации в пределах 1,6 — 2 с; для средних — 1,65 — 1,8 с; для высоких — в пределах от 0,5 до 1с.

Согласно основным принципам получения оптимального времени реверберации, принадлежащим различным авторам, оптимальное время реверберации должно уменьшиться при переходе к средним частотам. Например, по Дрейзену, время реверберации на частоте 100 Гц примерно 1,4 с; на средних частотах — 1 с [18].

§ VII.3. ХАРАКТЕРИСТИКИ АКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОМЕЩЕНИЙ

Акустическое отношение и эквивалентная реверберация. Плотность звуковой энергии в помещении можно представить в виде плотности энергии $\mathscr{E}_1$, образованной волнами, идущими от источника в точку приема по кратчайшему пути, и плотности энергии $\mathscr{E}_2$, возникающей за счет волн, дошедших в точку приема в результате многократных отражений. Допустим, что источник звука создает сферические звуковые волны и имеет акустическую мощность $\mathscr{P}_а$. В этом случае плотность энергии

$$\mathscr{E} = \mathscr{E}_1 + \mathscr{E}_2.$$