

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 ( $\approx 1$  с) и далее с повышением частоты медленно увеличивается.

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 1 с.

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  $\mathcal{E}_1$ , образованной волнами, идущими от источника в точку приема по кратчайшему пути, и плотности энергии  $\mathcal{E}_2$ , возникающей за счет волн, дошедших в точку приема в результате многократных отражений. Допустим, что источник звука создает сферические звуковые волны и имеет акустическую мощность  $\mathcal{P}_a$ . В этом случае плотность энергии

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

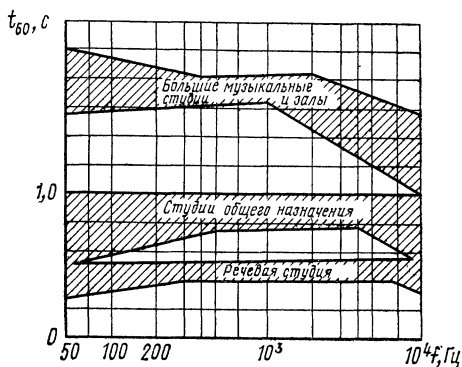


Рис. VII.2.2

Здесь  $\mathcal{E}_1 = \mathcal{P}_a / (4\pi r^2 c)$ ;  $\mathcal{E}_2 = \mathcal{P}_a / (Ac)$ , где  $A$  — коэффициент поглощения.

Отношение плотности акустических волн диффузного поля  $\mathcal{E}_2$  к плотности энергии прямой волны  $\mathcal{E}_1$  называют *акустическим отношением*  $R$ :

$$R = \frac{\mathcal{E}_2}{\mathcal{E}_1} = \frac{4\pi r^2}{A}, \quad (\text{VII.3.1})$$

где  $r$  — расстояние от источника до точки приема.

Полная плотность акустической энергии в точке приема

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 = \mathcal{E}_1 (1 + R) = \mathcal{E}_2 \frac{1 + R}{R}. \quad (\text{VII.3.2})$$

Если акустическое отношение значительно больше единицы, то плотность акустической энергии поля  $\mathcal{E} \approx \mathcal{E}_2$ . Иначе говоря, при большом акустическом отношении звук, воспринимаемый в точке приема, определяется резонансными и реверберационными свойствами помещения. Наоборот, если акустическое отношение значительно меньше единицы, то воспринимаемый сигнал характеризуется только свойствами источника звука, а не свойствами помещения.

Согласно (VII.3.1), акустическое отношение пропорционально квадрату расстояния до излучателя. Поэтому с увеличением расстояния от источника звука увеличиваются эффекты реверберационных искажений излучаемого звука.

Так, например, при восприятии звучания громкоговорителя, расположенного вдали от слушателя, всегда имеются ярко выраженные реверберационные эффекты помещения. Эти эффекты значительно ослаблены, если слушатель находится вблизи громкоговорителя.

Особенно большое значение имеет учет акустического отношения при организации вещания с помощью каналов усиления. Если диктор (или оркестр) находится вблизи микрофона, то на звуковые сигналы, передаваемые по радиоканалу, реверберационные свойства помещения студии не оказывают влияния. При увеличении расстояния от диктора до микрофона акустическое отношение увеличивается и звук, передаваемый из студии, содержит реверберационную окраску.

Для количественной оценки явления реверберации с учетом акустического отношения вводят понятие *эквивалентной реверберации*.

Допустим, что стационарный сигнал выключается в момент времени  $t = 0$  (рис. VII.3.1). Вдали от источника звука ( $R \gg 1$ ) уровень послезвучания уменьшается по прямой  $A$  на 60 дБ спустя время  $t_{60}$ . Вблизи источника начальный уровень сигнала имеет 60 дБ:

$$10 \lg \frac{\mathcal{E}}{\mathcal{E}_0} = 10 \lg \frac{\mathcal{E}_2}{\mathcal{E}_0} + 10 \lg \frac{1 + R}{R} = 60$$

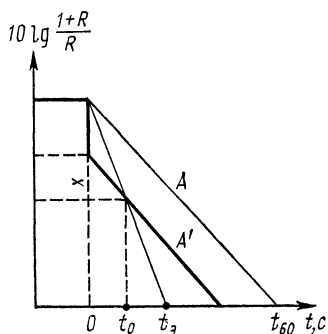


Рис. VII.3.1

и в момент выключения звука мгновенно уменьшится на  $10 \lg \frac{1+R}{R}$  дБ, поскольку исчезнут прямые сигналы. С уровня  $60 - 10 \lg \frac{1+R}{R}$  сигнал уменьшается по прямой  $A'$ . Ее наклон совпадает с  $A$ , поскольку наклон кривой определяется объемом и полным коэффициентом поглощения помещения.

Как показывает опыт, затухание послезвучания  $A'$  со скачком уровня в начальный момент и затухание без скачка оцениваются слухом, как эквивалентные по гулкости, если оба процесса послезвучания достигают одного и того же уровня через время  $t_0 \approx 0,2$  после выключения источника. Время, в течение которого уровень сигнала в эквивалентном процессе уменьшается на 60 дБ, называют *эквивалентным временем реверберации*. На основании построений, приведенных на рис. VII.3.1, составим два уравнения:

$$\frac{x}{t_0} = \frac{60}{t_{60}}, \quad \frac{x + 10 \lg [(1+R)/R]}{t_0} = \frac{60}{t_3}.$$

Исключая из уравнений  $x$ , находим формулы эквивалентного времени реверберации:

$$\frac{1}{t_3} = \frac{1}{t_{60}} + \frac{1}{60} \lg \frac{1+R}{R}, \quad (\text{VII.3.3})$$

$$t_3 = \frac{t_{60}}{6t_0 + t_{60} \lg [(1+R)/R]},$$

из которых следует, что при изменении акустического отношения можно уменьшить эквивалентное время реверберации.

В частности, при  $R \gg 1$ , т. е. на больших расстояниях от источника  $t_3 \approx t_{60}$ , а вблизи источника, где  $R \approx 0$ , оно приблизительно равно нулю. На других расстояниях, для которых  $0 < R < \infty$ , эквивалентное время реверберации может иметь значения в пределах от 0 до  $t_{60}$ . Например, при  $t_{60} = 1,5$  с и  $R = 1$

$$t_3 = \frac{1,5}{6,02 + 1,5 \lg 2} = 1,1 \text{ с.}$$

Для микрофона, обладающего направленностью, формула эквивалентного времени реверберации имеет вид

$$\frac{1}{t_3} = \frac{1}{t_{60}} + \frac{1}{6t_0} \lg \frac{\Phi + R}{R},$$

где  $\Phi = \Phi(\theta)$  — функция направленности микрофона, которая выражается отношением чувствительности микрофона для прямых звуков  $E_1$ , к чувствительности для звуков диффузного поля  $E_2$ :

$$\Phi(\theta) = \left( \frac{E_1}{E_2} \right)^2.$$

**Коэффициент четкости.** Качество звучания источника в отдельных местах помещения большей частью бывает различным. Для количественной оценки этой величины используют коэффициент четкости. В реверберационном сигнале можно выделить полезную часть. Условно считают, что она имеет длительность не больше 50 мкс. *Коэффициентом четкости* называют отношение средней плотности акустической

энергии полезной части реверберационного сигнала к средней плотности акустической энергии полного реверберирующего сигнала:

$$D = \frac{\frac{1}{50} \int_0^{\tau_0=50} \mathcal{E}(t) dt}{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \mathcal{E}(t) dt}.$$

Наблюдения субъективных эффектов, вызываемых у слушателей явлениями реверберации, показывают, что реверберационный сигнал неоднороден. Полное время послезвучания делится на две части: время от начала послезвучания до  $t_0 = 50$  мкс, в течение которого эффект реверберации создает ощущение четкости звукового сигнала, и время от 50 мкс до  $\infty$ , в течение которого последующие сигналы воспринимаются с фоном предыдущих реверберационных сигналов, причем этот фон является помехой и ухудшает разборчивость. Чем ниже коэффициент четкости  $D$ , тем слабее четкость. Допустимые значения коэффициента четкости лежат в пределах от 70 до 30%.

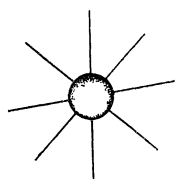


Рис. VII.3.2

**Коэффициент диффузности, или индекс диффузности поля.** Мерой количественной оценки диффузности звукового поля в помещении является индекс диффузности. Эту величину экспериментально определяют в некоторой точке объема помещения следующим способом. В помещении возбуждают сигнал переменной частоты (воющий тон) и в исследуемом

месте зала помещают микрофон с острой характеристикой направленности. Сигналы, принятые микрофоном при его ориентации в пределах изменения телесного угла  $0 - 4\pi$ , наносят на пространственную полярную диаграмму и получают систему отрезков, сходящихся в одной точке.

На рис. VII.3.2 приведена схематическая диаграмма пространственного распределения интенсивности звука для закрытого помещения.

Длины отрезков пропорциональны интенсивности звука, принятого со стороны направления  $\Omega, \Omega + \Delta\Omega$ . В пределах угла  $4\pi$  ср

средняя интенсивность звука  $I = \frac{1}{n} \sum_i^n I_i$  ( $I_i$  — интенсивность по  $i$ -му

направлению;  $n$  — число взятых направлений). Абсолютное отклонение от среднего значения  $\Delta I_i = I_i - \bar{I}$ , а среднее абсолютное отклонение

$\Delta I = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta I_i$ . Относительное отклонение интенсивности, усредненное по всем направлениям,  $m = \Delta I / \bar{I}$ . Индекс диффузности звукового поля в помещении равен

$$i_d = 1 - m/m_0,$$

где  $m_0$  — относительное отклонение интенсивности от среднего, изме-

ренное в реверберационной камере, т. е. в помещении с заглушенными границами.

При полной заглушенности помещения ( $m = m_0$ ) индекс диффузности равен нулю. Наоборот, если  $m = 0$ , то индекс диффузности равен единице и поле абсолютно диффузно.

Для большего числа залов проведенные измерения величины  $i_d$  дают ее среднее значение  $\approx 65\%$ . С увеличением объема помещения ( $V > 10\,000\text{ м}^3$ )  $i_d$  уменьшается. Увеличение индекса диффузности достигается при установке звукорассеивающих колонн, рельефов, расчленяющих элементов и т. д.

#### § VII.4. РЕЗОНАНСНЫЕ СВОЙСТВА ЗАМКНУТОГО ОБЪЕМА

В результате многократного отражения звуковых волн от границ помещения возникает замкнутое трехмерное волновое поле. Обычно линейные размеры помещения значительно больше длины звуковых волн. Замкнутый объем помещения представляет собой колебательную систему со спектром собственных частот, при этом каждой собственной частоте соответствует свой декремент затухания. Если источник звука создает звуковые сигналы с меняющимся спектральным и амплитудным распределением, то эти сигналы возбуждают колебания воздуха в помещении с частотами, близкими к резонансным, и по мере изменения спектра будут возникать все новые и новые моды собственных колебаний замкнутого объема, которые, накладываясь на ранее возникающие и имеющие уровни выше порога слышимости, в большей или меньшей степени исказят начальный сигнал. Поскольку декремент затухания составляющих спектра частот различен, то каждая из составляющих частот имеет свое время реверберации.

Изучение волновой теории реверберации начнем с собственных частот замкнутого объема в предположении, что границы помещения отражают звук без поглощения и что поглощением в объеме можно пренебречь.

**Фундаментальные функции и собственные частоты закрытых помещений.** В зависимости от формы помещения в замкнутом объеме могут возникнуть собственные колебания с различным набором собственных частот, соответствующих плоским, цилиндрическим или сферическим волнам. Рассмотрим подробно фундаментальные функции и резонансные частоты прямоугольного объема. Для этого необходимо найти решения уравнения Гельмгольца:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + \frac{\omega^2}{c^2} \psi = 0, \quad (\text{VII.4.1})$$

удовлетворяющего граничным условиям

$$-\frac{\partial \psi}{\partial x} \Big|_{x=0}^{x=l_x} = 0, \quad -\frac{\partial \psi}{\partial y} \Big|_{y=0}^{y=l_y} = 0, \quad -\frac{\partial \psi}{\partial z} \Big|_{z=0}^{z=l_z} = 0. \quad (\text{VII.4.2})$$

Нетрудно показать, что такими решениями будут частные решения вида

$$\psi_{mnp} = A_{mnp} \cos \frac{m\pi x}{l_x} \cos \frac{n\pi y}{l_y} \cos \frac{p\pi z}{l_z}. \quad (\text{VII.4.3})$$