

С. Д. Ковригин  
*проф., докт. техн. наук*

# АРХИТЕКТУРНО- СТРОИТЕЛЬНАЯ АКУСТИКА

ДОПУЩЕНО  
МИНИСТЕРСТВОМ ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР  
В КАЧЕСТВЕ УЧЕБНОГО ПОСОБИЯ  
ДЛЯ СТУДЕНТОВ  
СТРОИТЕЛЬНЫХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ  
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ



МОСКВА «ВЫСШАЯ ШКОЛА» 1980

ББК 38.113  
К56  
УДК 534.8 : 624

Рецензенты:

кафедра строительной физики Московского архитектурного института (зав. кафедрой — докт. техн. наук, проф. *Н. М. Гусев*);

*М. С. Седов* — докт. техн. наук, проф. (Горьковский инженерно-строительный институт им. В. П. Чкалова).

**Ковригин С. Д.**

К56 Архитектурно-строительная акустика: Учеб. пособие для вузов. — М.: Высш. школа, 1980. — 184 с., ил.

30 к.

В учебном пособии излагаются основные вопросы архитектурно-строительной акустики: принципы акустического проектирования залов различного назначения, звукоизоляция ограждающими конструкциями, звукопоглощение, борьба с шумом инженерного и санитарно-технического оборудования, планировочные мероприятия по борьбе с производственным шумом и шумом в населенных местах.

Приводятся примеры акустических расчетов и необходимые справочные и нормативные данные, а также задания для учебно-исследовательской работы.

*Предназначается для студентов строительных специальностей вузов.*

К  $\frac{30204-246}{001(01)-80}$

113—80

3202000000

6С1  
ББК 38.113

## Предисловие

Улучшение условий труда и быта представляет важнейшую социальную задачу, поставленную XXV съездом КПСС перед советской наукой и техникой. Ее осуществление связано с решением многих научных проблем в области психологии и санитарной гигиены, научной организации труда и функциональной технологии, архитектуры и строительства и др.

Большое место в этом широком комплексе проблем принадлежит архитектуре и смежным с ней научным и техническим областям, поскольку ее основной задачей является создание оптимальной среды для осуществления людьми различных социальных процессов. Следовательно, среда, окружающая человека и ограниченная помещением, имеющим определенное функциональное назначение, должна иметь такие характеристики, которые наиболее полно отвечают работе человеческого организма при выполнении данной функции. Характеристика сред определяется условиями зрительного восприятия и видимости, освещением, микроклиматом, а также акустическим режимом, характеризуемым качеством восприятия звука, если оно обуславливается данным функциональным процессом, или уровнем мешающего шума, возникающего в помещении или проникающего в него. Данные вопросы являются предметом изучения строительной физики — прикладной области физики — дисциплины, тесно связанной с теорией проектирования зданий.

В пособии излагаются основные вопросы архитектурно-строительной акустики, рассматриваемые при изучении курса «Архитектура гражданских и промышленных зданий», а также в курсовом и дипломном проектировании жилых, общественных и промышленных зданий. Пособие отвечает действующей учебной программе курса для специальности «Промышленное и гражданское

строительство» инженерно-строительных вузов и факультетов.

Пособие состоит из четырех разделов, включающих архитектурную и строительную акустику и борьбу с шумом в градостроительстве.

Необходимость рассмотрения всего комплекса вопросов, начиная с основных определений и некоторых теоретических положений, обусловлена отсутствием для специальности 1202 пособий, а также важностью проблемы создания необходимого акустического комфорта в зданиях. Кроме того, необходимо, чтобы излагаемый материал мог быть использован для научно-исследовательской работы студентов в учебном процессе.

Автор глубоко признателен рецензентам: заслуженному деятелю науки и техники РСФСР, проф., докт. техн. наук Н. М. Гусеву; проф., докт. техн. наук М. С. Седову; доц., канд. техн. наук В. Н. Бобылеву, а также канд. техн. наук Л. И. Макриненко за замечания по улучшению содержания учебного пособия.

Пособие подготовлено в дополнение ко II тому «Основы проектирования» учебника «Архитектура гражданских и промышленных зданий» под общей редакцией заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, проф., докт. техн. наук В. М. Предтеченского.

*Автор*

## Введение

Основной задачей архитектурной акустики является исследование условий, определяющих слышимость речи и музыки в помещениях, и разработка архитектурно-планировочных и конструктивных решений, обеспечивающих оптимальные условия слухового восприятия. Пособие знакомит с принципами акустического проектирования зальных помещений с естественной акустикой и оборудованных электроакустическими системами.

Строительная акустика изучает вопросы звукоизоляции ограждающими конструкциями, снижение шума в зданиях. Обычно шумом называют всякий нежелательный для человека звук. Гигиена определяет шум как санитарную вредность. Влияние шума на человека не ограничивается его воздействием на слух, хотя имеются данные о том, что материальный ущерб от потери слуха, вызываемый шумом, в промышленности больше, чем от любого другого профессионального заболевания. Шум увеличивает кровяное давление, изменяет деятельность желудочно-кишечного тракта, влияет на психику людей, понижает работоспособность на 10—15%. Таким образом, борьба с шумом имеет не только санитарно-гигиеническое, но и большое технико-экономическое значение.

Совет Министров СССР в 1973 г. принял специальное постановление «О мерах по снижению шума на промышленных предприятиях, в городах и других населенных пунктах», где указывается на необходимость разработки и осуществления комплекса инженерно-технических и организационных мероприятий по снижению шума до величин, установленных санитарными нормами. Кроме основного пути борьбы с шумом, т. е. устранения шума в самом источнике, во многих случаях требуется использование всех других методов: звукоизоляции, звукопоглощения, мер индивидуальной защиты. Эффективность использования первых двух методов зависит от объемно-планировочных и конструктивных решений помещений и зданий в целом, т. е. непосредственно связана с архитектурным проектированием.

В городах наблюдается ежегодное возрастание уровня шума, связанное с повышением интенсивности и мощности транспортных средств, с увеличением шума

промышленных предприятий и внутриквартальных источников и их количества. Методы борьбы с городскими шумами и внешними шумами промышленных предприятий разделяют на методы борьбы в источнике, архитектурно-планировочные и строительно-акустические. Вопросы борьбы с шумом в источнике в данном пособии не рассматриваются, поскольку они не входят в компетенцию инженеров-строителей и архитекторов. Учитывая специфичность вопросов борьбы с шумом в градостроительстве, они рассматриваются в специальном разделе.

Научно-техническая революция вносит серьезные коррективы в подготовку молодых специалистов, которые не только должны обладать определенным минимумом знаний, но и творчески применять их. Наиболее эффективным средством развития творческих способностей студентов является вовлечение их в научную работу. Научно-исследовательская работа студентов, как известно, подразделяется на работу, включаемую в учебный процесс, и выполняемую во внеучебное время. Первый вид работ — учебно-исследовательская работа (УИР) — наиболее широко может быть внедрен в рамках времени, отводимого для выполнения курсовых и дипломных проектов. Второй вид — студенческая научная работа (СНО) — требует, как правило, глубокой и систематической работы и не ограничивается курсовым и дипломным проектами. Поэтому в пособии в основном обращено внимание на возможность использования УИР в учебном процессе. В каждой главе, начиная с четвертой, указываются пути и методы более углубленной проработки части материала в качестве УИР. Эта работа преследует цель научить студентов анализировать и обобщать полученные расчетным путем данные, находить определенные закономерности, характеризующие данные явления, проводить технико-экономический анализ и, наконец, формулировать выводы.

Имеющаяся техническая литература по архитектурно-строительной акустике не всегда позволяет полностью использовать ее в учебном процессе, так как требует профессиональных знаний и большого объема работы. Поэтому в пособии приводятся в ряде случаев приближенные и менее трудоемкие расчетные методы. Более точные и полные акустические расчеты рекомендуется выполнять в качестве УИР с привлечением дополнительной технической литературы.

# Раздел первый

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ АКУСТИКИ

### Глава I

## КОЛЕБАНИЯ И ЗВУК

### § 1. ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ

Звук — это колебательное движение в любой материальной среде (т. е. обладающей упругостью и инерционностью), вызванное каким-либо источником. Процесс распространения колебательного движения в среде называется *звуковой волной*. Скорость распространения звуковой волны (*скорость звука*) зависит от характеристик среды. Если источник звука излучает *гармонические* (или *синусоидальные*) колебания, то за время, в течение которого совершается одно полное колебание излучателя (т. е. за *период*  $T$ ), звуковой процесс распространится на расстояние, равное длине волны  $\lambda$ . Если частота колебаний  $f$ , то за одну секунду звуковая волна распространится на расстояние, численно равное скорости звука:  $c = \lambda f$ . За единицу частоты принят герц (Гц), равный одному колебанию в секунду.

Область среды, в которой распространяются звуковые волны, называется *звуковым полем*. При распространении звуковой волны следует различать два совершенно разных явления: движение частиц среды в волне и перемещение самой волны в среде. Обычно *колебательные скорости* частиц среды даже при самых мощных излучателях звука в несколько тысяч раз меньше скорости звука. Колебательная скорость является величиной векторной.

В процессе распространения звуковых волн в воздухе и жидкостях смещения частиц среды происходят в направлении распространения волны; такие волны называются *продольными*.

Поперечные звуковые волны возникают при распространении колебаний в твердых телах. При поперечных волнах частицы среды смещаются перпендикулярно

но направлению распространения звуковой волны. Вообще в твердых телах возможны различные комбинации продольных и поперечных волн. Так, в тонких конструкциях, когда их толщина меньше  $1/6$  длины волны, возникают *изгибные волны*.

Колебательное движение частиц среды при распространении звуковой волны по своей физической природе является механическим колебанием. Рассмотрим простейшие механические колебательные системы.

## § 2. КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Рассмотрим систему, состоящую из массы  $m$  на пружине, имеющей жесткость  $k$ , т. е. систему без трения (рис. 1). При воздействии импульса масса будет совершать гармонические колебания. Такие колебания называются *свободными* или *собственными*.

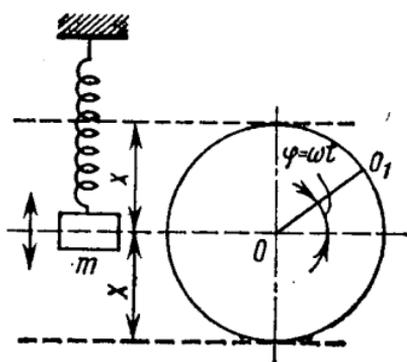


Рис. 1. Колебательная система

Если система имеет возможность совершать только один вид колебаний, например вертикальные, она называется системой с одной степенью свободы. На массу действуют сила инерции  $mx''$  (согласно второму закону Ньютона) и сила упругости  $kx$ . Уравнение движения запишется так:

$$mx'' + kx = 0, \quad (1)$$

где  $x$  — амплитуда колебания.

Пусть через  $t$  с после начала движения масса (точка) займет положение  $O_1$ . Угол  $\varphi$ , определяющий положение точки, называется *фазой колебания*. Из рис. 1 получаем

$$\varphi/2\pi = t/T \quad (2)$$

или

$$\varphi = \frac{2\pi t}{T} = 2\pi ft = \omega t, \quad (3)$$

где  $\omega$  — *угловая скорость*, или *круговая частота*, колебаний.

Круговая частота не зависит от амплитуды  $x$  и опре-

деляется только жесткостью  $k$  и массой  $m$ , так как

$$\omega = \sqrt{k/m}. \quad (4)$$

Уравнение движения (1), зная  $\omega$ , можно записать так:

$$x'' + \frac{k}{m}x = 0; \quad x'' + \omega^2 x = 0. \quad (5)$$

Как известно, решение дифференциального уравнения (5) имеет вид

$$x = A \cos \omega t + B \sin \omega t, \quad (6)$$

где  $A$  и  $B$  — постоянные величины, зависящие от начальных условий.

Обозначив смещение и скорость в начальный момент  $t=0$  соответственно через  $x_0$  и  $x_0'$ , после подстановок в уравнение (6) найдем:

$$A = x_0, \quad B = \frac{1}{\omega} x_0';$$

выражение (6) приобретает вид

$$x = a \sin(\omega t + \varphi). \quad (7)$$

Движение массы при свободных колебаниях описывается синусоидальным законом с амплитудой колебаний  $a$ , периодом  $T$  и начальной фазой  $\varphi$  (рис. 2).

Из (2) видно, что

$$T = \frac{2\pi}{\omega},$$

или

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{m/k}. \quad (8)$$

Так как  $f = 1/T$ , а  $m = P/g$  ( $g$  — ускорение свободного падения, равное  $981 \text{ см/с}^2$ ), то собственная частота колебаний равна

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{kg/P}.$$

Жесткость пружины  $k$  при статическом приложении веса  $P$  будет иметь деформацию  $x_{ст}$  (в пределах закона Гука), т. е.  $k = P/x_{ст}$ .

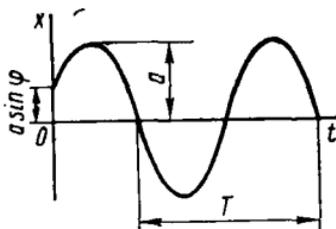


Рис. 2. Гармоническое колебание

Следовательно,

$$f_0 = \frac{\sqrt{g/x_{ст}}}{2\pi} \simeq 5/\sqrt{x_{ст}}. \quad (9)$$

Выражение (9) связывает простой зависимостью частоту собственных колебаний системы с  $x_{ст}$ , что делает его удобным для практического использования.

Если сила  $F$  (см. рис. 1) действует постоянно, то

$$m\ddot{x} + kx = F. \quad (10)$$

Такие колебания называются *вынужденными*.

При гармонических колебаниях значения смещения  $x$ , колебательной скорости  $x'$  и колебательного ускорения  $x''$  связаны соотношением

$$x' = 2\pi f x = \omega x; \quad (11)$$

$$x'' = -2\pi f x' = -4\pi^2 f^2 x = -\omega^2 x. \quad (12)$$

Подставляя значение  $x''$  в (10), т. е.  $-m\omega^2 x + kx = F$ , определим  $x = F/(k - m\omega^2)$ .

Принимая абсолютные значения  $x$ , можно получить

$$|x| = \frac{F}{k(1 - m\omega^2/k)} = \frac{F}{k} \frac{1}{1 - m\omega^2/k}. \quad (13)$$

Так как  $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ , то

$$|x| = \frac{F}{k} \frac{1}{1 - \omega^2/\omega_0^2} = \frac{F}{k} \frac{1}{1 - f^2/f_0^2}. \quad (14)$$

Данная зависимость показана на рис. 3. При частоте возмущающей силы  $f$  меньше собственной частоты колебаний  $f_0$  величина амплитуды вынужденных колебаний приближается к  $x_{ст}$ , т. е. к деформации пружины при статическом ее нагружении. Сила инерции мала и силе  $F$  противодействует в основном сила упругости.

При  $f = f_0$  величина амплитуды вынужденных колебаний стремится к бесконечности — явление *резонанса*. Это объясняется тем, что если колебания происходят с собственной частотой, то силы упругости уравновешиваются силами инерции при любых значениях амплитуды,

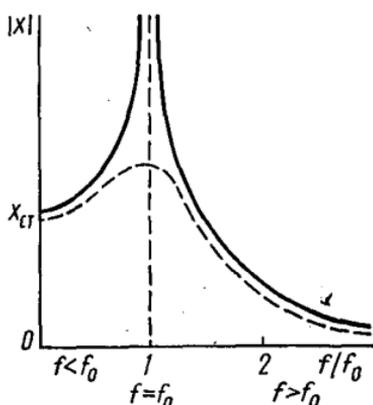


Рис. 3. Резонансная кривая

а внешняя сила  $F$  оказывается неуравновешенной. Колебания при резонансе уже не являются гармоническими, и амплитуда колебаний увеличивается пропорционально времени. При дальнейшем увеличении частоты возмущающей силы амплитуда колебаний быстро уменьшается и становится меньше  $x_{ст}$ . Так как сила инерции увеличивается пропорционально  $\omega^2$ , а сила упругости при этом уменьшается, то в основном внешней силе  $F$  противодействует сила инерции.

Рассмотрим теперь систему с трением, когда сила трения  $F_{тр}$  линейно зависит от скорости, т. е.  $F_{тр} = rx'$  ( $r$  — коэффициент трения). Коэффициент  $r$  определяет *активное сопротивление* в отличие от *реактивного*, представляющего собой разность инерционного и упругого сопротивлений, т. е.  $m\omega^2 - kx$  или

$$m\omega^2 x - kx = m\omega - k\omega. \quad (15)$$

Уравнение свободных колебаний такой системы имеет вид

$$mx'' + rx' + kx = 0$$

или

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + r \frac{dx}{dt} + kx = 0. \quad (16)$$

Наличие активного сопротивления уменьшает собственную частоту системы и вызывает постоянное уменьшение начальной амплитуды колебаний, т. е. имеем *затухающие* колебания.

Вынужденные колебания системы под действием силы  $F$  характеризуются уравнением

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + r \frac{dx}{dt} + kx = F. \quad (17)$$

Вблизи резонанса скорость системы, по существу, определяется активным сопротивлением, так как реактивное сопротивление мало. Если активное сопротивление невелико, то в области частот ниже резонансной колебательная скорость определяется главным образом упругим сопротивлением  $k/\omega$ , а в области частот выше резонансной — инерционным сопротивлением  $m\omega$ .

На рис. 3 пунктиром показана меньшая амплитуда колебаний системы при наличии в ней трения. Но вдали от резонанса силы трения вообще не играют большой роли, поэтому амплитуда вынужденных колебаний практически не изменяется.

### § 3. ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ ЗВУКОВОЕ ПОЛЕ

Рассмотрим процесс распространения звуковых волн в воздухе. В каждой точке звукового поля при распространении гармонической звуковой волны будет наблюдаться попеременно деформации сжатия и разрежения, что приведет к изменению давления в среде по сравнению с атмосферным (статическим) давлением. Разность между атмосферным давлением и давлением в данной точке звукового поля называется *звуковым давлением*  $p$ . Фазе сжатия соответствует положительное значение звукового давления, фазе разрежения — отрицательное. Таким образом, звуковое давление является функцией времени и координат рассматриваемой точки звукового поля. В каждой точке среды звуковое давление действует равномерно во все стороны, т. е. является скалярной величиной. Звуковое давление  $p$  выражается в паскалях (Па) (или кгс/см<sup>2</sup>,  $1 \text{ кгс/см}^2 \approx 10^5 \text{ Па}$ ). Как и другие акустические величины, звуковое давление измеряется не в амплитудных его значениях, а в *эффективных*, которые при синусоидальных колебаниях в  $\sqrt{2}$  раз меньше амплитудных. Эффективным значением звукового давления будет ее среднеквадратическая величина  $\sqrt{[\overline{p(t)}]^2}$ .

*Фронт волны* называют поверхность, проходящую через частицы среды, совершающие колебания в одной и той же фазе. Направление распространения звука в каждой точке фронта является нормалью к его поверхности. Различают три типа звуковых волн, отличающихся друг от друга формой фронта: *плоские*, имеющие фронт в виде плоскости, нормальной к направлению распространения; *шаровые* — с фронтом в виде сферы и *цилиндрические*, форма фронта которых имеет вид боковой поверхности цилиндра.

Звуковое поле обычно может быть представлено как поле плоской волны, если линейные размеры источника велики по сравнению с длиной излучаемой им волны или если рассматриваемая зона звукового поля находится на достаточно большом (по сравнению с длиной волны) расстоянии от источника.

Основные вопросы расчета звуковых полей решаются с помощью *волнового уравнения*. Для вывода волно-

вого уравнения используют дифференциальные уравнения, отражающие физические особенности среды: уравнение движения, учитывающее инерционность среды, уравнение неразрывности (или непрерывности) среды, являющееся отражением закона сохранения материи, и уравнение состояния среды, учитывающее ее упругость.

При выводе данных уравнений делается допущение о малости амплитуд колебаний частиц, что приводит к линейным зависимостям звукового давления и смещения частиц среды, а также об отсутствии внутренних потерь энергии в среде.

При расчете звуковых волн, распространяющихся на большие расстояния, уже необходимо учитывать вязкость, теплопроводность и турбулентность реальной среды, приводящие к ослаблению энергии звуковой волны с расстоянием.

Для вывода уравнения движения выделим в звуковом поле элементарный слой воздуха  $dx$  (рис. 4). Звуковая волна, распространяясь в направлении  $x$ , создает у поверхности  $S$ , совпадающей с фронтом волны, звуковое давление  $p$ , а у поверхности  $S'$  давление  $p+dp$ . В результате находящийся между поверхностями слой воздуха толщиной  $dx$  под действием силы  $pS - (p+dp)S'$  придет в колебательное движение со скоростью  $v$ . Данная сила будет уравновешена его инерционной реакцией, представляющей собой произведение массы слоя  $\rho S dx$  на его ускорение (в соответствии с вторым законом Ньютона), т. е.

$$\rho_n S dx \frac{dv}{dt},$$

где  $\rho_n$  — полная плотность воздуха, определяемая суммой статической  $\rho_0$  и переменной  $\rho$  плотностей:  $\rho_n = \rho_0 + \rho$ .

$$\text{Можно записать } S dp = -S \frac{\partial p}{\partial x} \quad \text{и} \quad - \frac{\partial p}{\partial x} = \rho_n \frac{\partial v}{\partial t}.$$

Так как при прохождении звуковой волны изменение

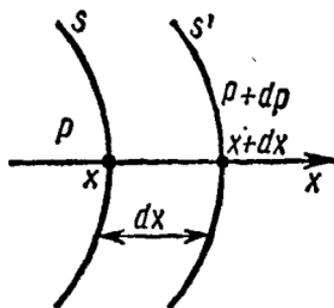


Рис. 4. К выводу уравнения движения

плотности воздуха не превышает сотых долей статической плотности  $\rho_0$ , то обычно принимается  $\rho_n \approx \rho_0$  и

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho_0 \frac{dv}{dt}. \quad (18)$$

Таким образом, частная производная звукового давления, взятая по расстоянию, равна произведению плотности среды на колебательное ускорение частиц среды, взятому с обратным знаком. Данное уравнение представляет собой закон инерции Ньютона, написанный для единицы объема сплошной среды.

При выводе уравнения неразрывности рассматривается изменение массы вещества в слое воздуха между поверхностями  $S$  и  $S'$ . Оно может быть найдено как разность между массами воздуха, входящего в данный объем и выходящего из него за время  $dt$ . Эта разность обусловлена неодинаковыми объемными скоростями потоков через поверхности  $S$  и  $S'$ .

Скорость приращения массы в малом объеме равна  $Sdx \frac{\partial \rho}{\partial t}$ ; масса, проходящая за единицу времени через поверхность  $S$ , равна  $\rho_0 \partial(vS)$ . Следовательно, уравнение неразрывности выразится равенством

$$Sdx \frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho_0 \partial(vS)$$

или

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\rho_0}{S} \frac{\partial(vS)}{\partial x}. \quad (19)$$

Изменение объемной скорости потока воздуха сопровождается изменением плотности вещества без разрыва среды. Наконец, уравнение состояния связывает изменение давления с изменением плотности вещества. Для газов характерны два уравнения:

$$p/\rho_n = \text{const} \quad (20)$$

является уравнением Бойля—Мариотта и называется *изотермическим уравнением состояния* и

$$p/\rho_n^\gamma = \text{const} \quad (21)$$

есть уравнение Пуассона, или *адиабатическое уравнение состояния*. Здесь  $\gamma$  — отношение удельных теплоемкостей газа при постоянных давлении и объеме; для воздуха  $\gamma = 1,41$ .

В области сжатия среды происходит ее нагревание, в области разрежения — охлаждение. Вследствие малой теплопроводности газов выравнивания температур за время периода колебания не происходит, т. е. колебательный процесс является адиабатическим. Поэтому скорость звука в газе равна

$$c = \sqrt{\gamma p / \rho_0}. \quad (22)$$

При нормальном атмосферном давлении и температуре 273 К (0° С) скорость звука  $c = 331$  м/с. В расчетах обычно принимается  $c = 340$  м/с, что соответствует температуре около 290 К (17° С).

На открытом пространстве распространяется бегущая звуковая волна; при наличии препятствия возникают и отраженные волны. В плоской бегущей волне отношение звукового давления к колебательной скорости не зависит от амплитуды колебаний

$$p'/v = \rho_0 c. \quad (23)$$

Величина  $\rho_0 c$ , зависящая только от физических свойств среды, называется *удельным акустическим сопротивлением*. Для воздуха  $\rho_0 c = 41$  МПа·с/м.

Изменение давления и изменение плотности в звуковой волне связаны соотношением

$$p = c^2 \rho. \quad (24)$$

В поле шаровой волны амплитуда звукового давления изменяется обратно пропорционально расстоянию. Это происходит в результате расширения площади фронта волны ( $S = 4\pi r^2$ ). Колебательная скорость в поле шаровой волны имеет две составляющие: *активную*, когда скорость совпадает по фазе с давлением, и *реактивную* — при отставании скорости по фазе от давления на угол  $\pi/2$ . На расстоянии  $r$  больше длины волны шаровая волна по своим свойствам приближается к плоской волне.

Распространение звуковой волны сопровождается переносом энергии, которая является функцией звукового давления  $p$  и колебательной скорости  $v$  в каждой точке среды. Средний поток звуковой энергии, проходящий в единицу времени через единицу поверхности, нормальной к направлению распространения звуковой волны, называется *интенсивностью звука I*. За единицу интенсивности принят Вт/м<sup>2</sup>. Интенсивность звука связана

со звуковым давлением зависимостью, справедливой при любом фронте волны,

$$I = p^2 / \rho c = p v. \quad (25)$$

Интенсивность звука является векторной величиной. В тех случаях, когда направление распространения звуковой волны определить трудно, возможно использовать другую энергетическую характеристику — *плотность звуковой энергии*  $\bar{\epsilon}$  (Дж/м<sup>3</sup>), т. е. энергию, содержащуюся в единице объема звукового поля.

Представим себе параллелепипед, через который проходит звуковая волна. Площадь поперечного сечения его равна 1 м<sup>2</sup>, а длина  $l$  численно равна скорости звука  $c$ . Если в каждой единице объема параллелепипеда заключена звуковая энергия  $\bar{\epsilon}$ , то во всем объеме —  $\bar{\epsilon}c$ , так как  $l=c$ . Энергия  $\bar{\epsilon}c$  за единицу времени проходит через сечение, равное 1 м<sup>2</sup>, а это является интенсивностью звука. Поэтому

$$I = \bar{\epsilon}c, \quad \text{или} \quad \bar{\epsilon} = I/c. \quad (26)$$

Плотность звуковой энергии является скалярной величиной. Создаваемое в среде звуковое давление  $p$  характеризует силу реакции среды  $F$ , приходящуюся на единицу площади излучающей поверхности. При равномерном распределении звукового давления по площади  $S$  фронта волны вся сила  $F = pS$  (при неравномерном распределении звукового давления  $F = \oint_S p dS$ ). Работа, совершаемая этой силой, равна  $F dx$ , где  $dx$  — смещение частиц среды в направлении распространения звуковой волны. Работа, совершаемая в единицу времени  $dt$ , представляет собой мощность, поэтому *звуковая мощность*  $W$  равна

$$W = \frac{F dx}{dt}, \quad (27)$$

или

$$W = Fv = pSv. \quad (28)$$

Интенсивность звука и звуковая мощность связаны соотношением

$$I = W/S, \quad (29)$$

так как интенсивность звука есть звуковая мощность, приходящаяся на единицу поверхности фронта волны.

Из (29) получаем

$$W = IS, \text{ или } W = \oint_S I dS, \quad (30)$$

т. е. звуковая мощность представляет собой общее количество звуковой энергии, излучаемой в единицу времени, и выражается в ваттах (Вт).

Часто источники излучают звук неравномерно по всем направлениям; такая неравномерность излучения характеризуется коэффициентом  $\Phi$  — *фактором направленности*. Он представляет собой отношение интенсивности звука  $I$ , создаваемой источником в данной точке звукового поля, к интенсивности  $I_{\text{сф}}$ , которую имел бы источник с такой же мощностью, но равномерно излучающий звук по всем направлениям (в сферу), т. е.

$$\Phi = I/I_{\text{сф}} = p^2/p_{\text{сф}}^2 \quad (31)$$

и

$$I_{\text{сф}} = W/S = W/4\pi r^2, \quad (32)$$

где  $r$  — расстояние до точки наблюдения.

Подставляя в (30) значение  $I$  из (31), получим

$$W = \oint_S I dS = \oint_S \Phi I_{\text{сф}} dS = \oint_S \Phi \frac{W}{4\pi r^2} dS.$$

Отсюда при  $dS/r^2 = d\Omega$  (элемент телесного угла  $\Omega$ , в котором излучается звук) получим

$$\oint_S \Phi d\Omega = 4\pi. \quad (33)$$

Физические величины, характеризующие звук, являются функцией времени; поэтому такие процессы можно представить в виде суммы синусоидальных колебаний с различными периодами и амплитудами. Каждое колебание характеризуется среднеквадратичным значением физической величины и частотой; их зависимость называется *частотным спектром* звука (или *спектром*).

Периодические колебания сложной формы при разложении в ряд Фурье представляются как сумма гармоник (синусоид) с различной амплитудой  $a$ . Такие гармоники образуют *дискретный*, или *линейчатый*, спектр (рис. 5, а). Непериодические колебания сложной формы (случайные или одиночные процессы) могут быть представлены с помощью интеграла Фурье в виде

суммы бесконечно большого числа синусоидальных составляющих, образующих *сплошной спектр* (рис. 5, б). Обычно звуковые процессы представляют собой *смешанный спектр*, изображаемый в виде сплошного и дискретного спектров, наложенных друг на друга (рис. 5, в).

Шумы по положению максимума спектра делятся на *низкочастотные* (максимум ниже 300 Гц), *среднечастотные* (максимум в диапазоне частот 300—800 Гц) и *высокочастотные* (максимум выше 800 Гц).

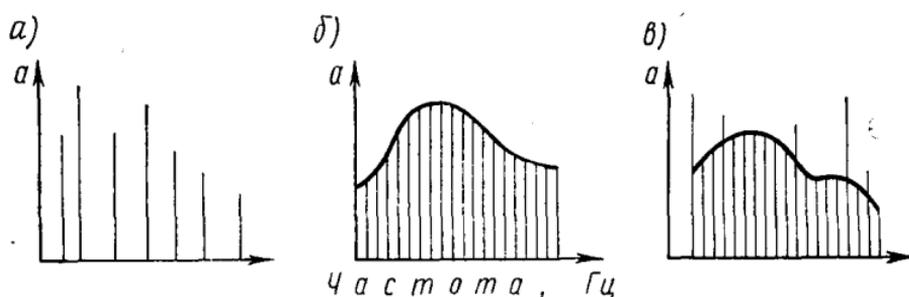


Рис. 5. Типы спектров:  
а — линейчатый; б — сплошной; в — смешанный

Рассмотрим звуковое поле, создаваемое несколькими источниками; для упрощения возьмем два источника. Если в какой-то точке первый источник создает звуковое давление  $p_1$ , а второй —  $p_2$ , то мгновенное значение результирующего давления  $p$  равно алгебраической сумме  $p_1$  и  $p_2$ , так как звуковое давление — величина скалярная:

$$p = p_1 + p_2. \quad (34)$$

В соответствии с (25) можно записать:

$$I = \overline{p\dot{v}} = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T \overline{p\dot{v}} dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{\rho_0 c} \int_0^T \overline{p^2} dt, \quad (35)$$

где  $T$  — интервал времени, в течение которого производится усреднение;  $t$  — текущее время.

Звуковое давление составит:

$$\overline{p^2} = \overline{(p_1 + p_2)^2} = \overline{p_1^2} + \overline{p_2^2} + 2\overline{p_1 p_2}.$$

Источники звука называются *некогерентными*, если их взаимная мощность  $2 \overline{p_1 p_2}$  равна нулю, т. е. создава-

емые ими давления произвольны по фазе. Для независимых друг от друга процессов, как показывает теория вероятностей, это условие соблюдается всегда. Поэтому

$$\bar{p}^2 = \bar{p}_1^2 + \bar{p}_2^2 \quad \text{и} \quad I = I_1 + I_2, \quad (36)$$

т. е. интенсивность суммарного звукового поля равна сумме интенсивностей источников.

#### § 4. ВОСПРИЯТИЕ ШУМА ЧЕЛОВЕКОМ

Изменение интенсивности и звукового давления слышимого звука огромно и составляет соответственно  $10^{14}$  и  $10^7$  раз. Поэтому введены логарифмические величины: *уровень интенсивности звука* (дБ)

$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_0} \quad (37)$$

и *уровень звукового давления* (дБ)

$$L_p = 10 \lg \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \lg \frac{p}{p_0}, \quad (38)$$

где  $I_0$  и  $p_0$  — значения, соответствующие *порогу слышимости* ( $I_0 = 10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup> на частоте 1000 Гц,  $p_0 = 2 \times 10^{-5}$  Па).

Значение  $p_0$  выбрано таким образом, чтобы при нормальных атмосферных условиях  $L_I = L_p$ .

*Болевой порог восприятия* звука соответствует величинам  $I = 10^2$  Вт/м<sup>2</sup>,  $p = 2 \cdot 10^2$  Па. Подставляя их в (37)

и (38), получим  $L_I = 10 \lg \frac{10^2}{10^{-12}} = 140$  дБ и  $L_p =$

$= 20 \lg \frac{2 \cdot 10^2}{2 \cdot 10^{-5}} = 140$  дБ, т. е. изменение  $I$  и  $p$  вместо  $10^{14}$

и  $10^7$  раз составляет 140 дБ. Введению таких единиц измерения способствовало также то обстоятельство, что ухо человека реагирует не на абсолютное изменение интенсивности или звукового давления, а на относительное. Акустические приборы позволяют определять уровень звукового давления, поэтому эта величина используется для измерения шума и для оценки его воздействия на человека. Значения уровня интенсивности используют в акустических расчетах, учитывая, что  $L_I = L_p$ . Поэтому в дальнейшем уровни будут приводиться без индексов.

Разница уровней в 1 дБ соответствует минимальной величине, различимой слухом, при этом интенсивность звука изменяется в 1,26 раза, или на 26%. Если же разница уровней составляет 3 дБ, то интенсивность звука изменяется уже в два раза.

Уровни интенсивности не учитывают чувствительности слуха к звукам различной частоты и поэтому не дают правильного представления о *громкости звука*, т. е.

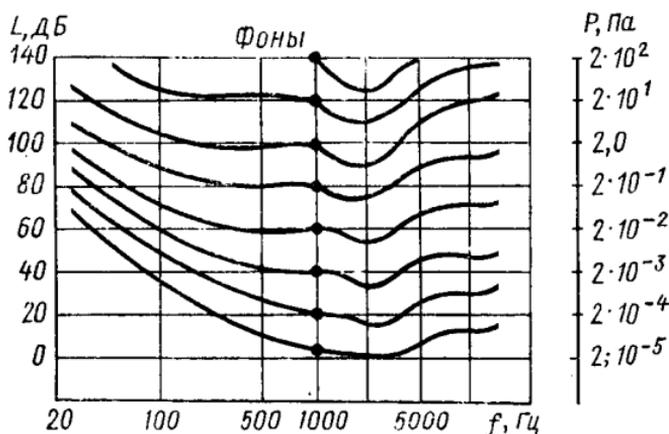


Рис. 6. Кривые равной громкости

о физиологической характеристике звука. Ухо человека обладает наибольшей чувствительностью на средних и высоких частотах и наименьшей — на низких, что видно из *кривых равной громкости* (рис. 6). *Уровень громкости* звука выражается в *фонах*. На частоте 1000 Гц фонны и уровни звукового давления численно равны друг другу. Каждая из кривых есть геометрическое место точек равногромких тонов различных частот. Шкала уровней громкости не является натуральной шкалой, т. е., например, изменение уровня громкости в два раза не означает, что *субъективное ощущение громкости* звука изменяется во столько же раз. Для оценки субъективного восприятия громкости шума или звука введена шкала *сонов*.

Громкость (в сонах) определяют по формуле

$$s = 2^{(L-40)/10}, \quad (39)$$

где  $L$  — уровень громкости, фон.

Из (39) видно, что громкость в 1 сон имеет звук с уровнем громкости  $L=40$  фон.

Зависимость между фонами и сонми дана на рис. 7. Изменение уровня громкости на 10 фон соответствует изменению громкости звука в два раза. Например, требуется сравнить по громкости два звука с уровнями громкости 60 и 80 фон. Из рис. 7 находим, что уровню громкости 60 фон соответствует громкость, равная 4 сонми, а уровню громкости 80 фон — 16 сонми. Следовательно, второй звук ощущается слухом как в четыре раза ( $16/4$ ) более громкий.

Имеются методы, позволяющие определять громкость по данным измерений уровней звукового давления (методы Стивенсона, Цвиккера и Костена).

При рассмотрении звукового поля, создаваемого несколькими источниками, в соответствии с (36) можно записать  $I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$ . Разделив левую и правую части на  $I_0$  и прологарифмировав, получим

$$10 \lg \frac{I}{I_0} = 10 \lg \left( \frac{I_1}{I_0} + \frac{I_2}{I_0} + \dots + \frac{I_n}{I_0} \right),$$

откуда

$$L = 10 \lg (10^{L_1/10} + 10^{L_2/10} + \dots + 10^{L_n/10}) \text{ дБ}, \quad (40)$$

где  $L_1, L_2, \dots, L_n$  — уровни звукового давления, создаваемые соответствующими источниками в расчетной точке.

При  $n$  одинаковых источниках шума, равноудаленных от расчетной точки с уровнями звукового давления  $L_i$ , суммарный уровень равен

$$L = L_i + 10 \lg n. \quad (41)$$

Для упрощения расчетов можно пользоваться табл. 1.

Сложение уровней производят последовательно, начиная с максимального. Сначала определяют разность двух складываемых уровней, затем добавку к более высокому уровню.

Фоны	Сонми
120	256
110	128
100	64
90	32
80	16
70	8
60	4
50	2
40	1
30	0,5

Рис. 7. Зависимость между уровнями громкости (в фонах) и громкостью (в сонми)

## Сложение уровней звукового давления

Показатели	Значения показателей													
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	
Разность двух складываемых уровней, дБ														
Добавка к более высокому уровню для получения суммарного уровня, дБ	3	2,5	2	1,8	1,5	1,2	1	0,8	0,6	0,5	0,4	0,2	0	

**Пример.** Определить суммарный уровень звукового давления для четырех источников шума:  $L_1=105$  дБ;  $L_2=99$  дБ;  $L_3=110$  дБ;  $L_4=103$  дБ.

Пользуясь табл. 1, суммируем  $L_1$  и  $L_3$ . Разность уровней  $\Delta L = 5$  дБ; добавка к большему уровню 1,2 дБ; суммарный уровень  $L_{\text{сум1}} = 110 + 1,2 = 111,2$  дБ. Суммируем  $L_{\text{сум1}}$  и  $L_4$ . Разность уровней  $111,2 - 103 = 8,2$  дБ; добавка к большему уровню 0,6 дБ; суммарный уровень  $L_{\text{сум2}} = 111,2 + 0,6 = 111,8$  дБ. Суммируем  $L_{\text{сум2}}$  и  $L_2$  и получаем сумму всех четырех уровней:  $L = 111,8 + 0,3 \approx 112$  дБ.

По аналогии с уровнями интенсивности установлены уровни звуковой мощности (дБ):

$$L_W = 10 \lg \frac{W}{W_0}, \quad (42)$$

где  $W_0$  — пороговое значение звуковой мощности, равное  $10^{-12}$  Вт.

Обычно источники шума считаются некогерентными, что позволяет суммировать их мощности энергетически, т. е. использовать формулы (40) и (41).

## § 5. ПРИНЦИПЫ ИЗМЕРЕНИЯ И НОРМИРОВАНИЯ ШУМА

Для измерения уровней звукового давления используют шумомеры. Измеряемый звук посредством микрофона преобразуется в электрические колебания и затем усиливается; стрелочный прибор позволяет определять уровни при включении ряда характеристик: линейной, А, В, С и D.

При измерении шума с помощью характеристики «А» шумомера в спектре шума уменьшаются составляющие на низких и средних частотах (до 1000 Гц), что пример-

но соответствует характеру восприятия шума на этих частотах (см. кривые равной громкости, рис. 6). Определяемый уровень при этом называется *уровнем звука* в дБА. Изменение уровня звука в дБА примерно соответствует изменению громкости звука, воспринимаемого слухом. Поэтому эта характеристика очень широко используется в практике борьбы с шумом.

Уровни звукового давления определяют с помощью характеристик С и линейной, которые практически не вносят коррективы в измеряемые величины, так как показания прибора зависят лишь от величины воспринимаемого звукового давления и не зависят от частоты.

Для получения спектров шума и вибрации используют анализаторы, представляющие собой электрические фильтры, присоединяемые к шумомеру. Обычно параметры шума, а также и вибрации оцениваются в *октавных* или *третьоктавных диапазонах*. Октавой называется полоса частот, в которой отношение верхней  $f_2$  и нижней  $f_1$  граничных частот равно 2, т. е.  $f_2/f_1=2$ . Для третьоктавной полосы  $f_2/f_1=\sqrt[3]{2}\approx 1,26$ . В качестве частоты, характеризующей полосу в целом, берется среднегеометрическая частота  $f=\sqrt{f_2f_1}$ . Среднегеометрические частоты октавных полос стандартизированы: 32, 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 и 8000 Гц. Для автоматической записи уровней используют самописцы уровней.

Измерение вибрации осуществляется той же аппаратурой, что и шума, но в качестве приемника исследуемого сигнала используют вибродатчики\*.

При оценке шума следует пользоваться допустимыми предельными спектрами (ПС) для помещений различного назначения с учетом продолжительности действия, а также спектральных и временных характеристик шума. Кривые предельных спектров обозначают с индексом, соответствующим уровню звукового давления в октавной полосе со среднегеометрической частотой 1000 Гц. Шум считается допустимым, если измеренные уровни звукового давления во всех октавных полосах частот нормируемого диапазона не будут превышать значений, определяемых соответствующим ПС.

Применяется и другой метод, основанный на норми-

---

\* Более подробно измерение шума и вибрации излагается в [7], а также в кн.: *Объедков В. А. и др. Лабораторный практикум по строительной физике*. М., 1979.

ровании уровней звука в дБА. Принимается, что уровень звука связан с ПС зависимостью  $L$  (дБА) = ПС + 5 дБ. В этом случае производится интегральная оценка всего шума (а не спектральная, как в первом методе), поэтому возможны большие погрешности. Несмотря на меньшую точность этого метода, его широко используют органы санитарной инспекции при решении практических вопросов борьбы с шумом, так как он позволяет значительно сократить объем измерений, упростить обработку результатов и использовать более простую аппаратуру (см. СНиП II-12—77).

## Глава II

### РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА В ПОМЕЩЕНИЯХ

#### § 6. ОТРАЖЕНИЕ И ПОГЛОЩЕНИЕ ЗВУКА В ПОМЕЩЕНИЯХ

В помещениях различают *прямой звук*, идущий непосредственно от источника, и *отраженный* от поверхностей. Вследствие многократных отражений звуковых

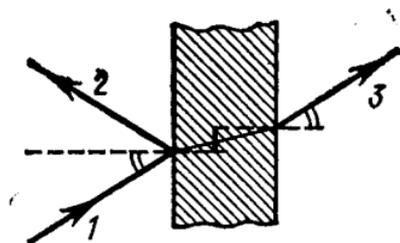


Рис. 8. Схема отражения и прохождения звука:

1 — падающий звук; 2 — отраженный звук; 3 — звук, прошедший через преграду

волн и суммирования энергии прямых и отраженных волн в помещении устанавливается звуковое поле с определенными уровнями звукового давления. Энергия проходит также через преграду (рис. 8).

Законы отражения и преломления звука аналогичны законам геометрической оптики. Количественно поглощенная, отраженная и прошедшая через преграду части звуковой энергии определяются коэффициентами  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\tau$ .

Отношение поглощенной звуковой энергии к падающей называется *коэффициентом звукопоглощения*  $\alpha$ :

$$\alpha = (E_{\text{пад}} - E_{\text{отр}}) / E_{\text{пад}} \quad (43)$$

где  $E_{\text{пад}}$  и  $E_{\text{отр}}$  — энергия падающих и отраженных звуковых волн.

Коэффициент  $\alpha$  можно записать и так:

$$\alpha = (E_{\text{погл}} + E_{\text{пр}}) / E_{\text{пад}}, \quad (44)$$

где  $E_{\text{погл}}$  и  $E_{\text{пр}}$  — энергия, поглощаемая материалом преграды, и энергия, прошедшая через преграду.

Отношение энергии отраженного звука  $E_{\text{отр}}$  к  $E_{\text{пад}}$  представляет собой коэффициент отражения  $\beta$ :

$$\beta = E_{\text{отр}} / E_{\text{пад}}. \quad (45)$$

Отношение энергии прошедшего через преграду звука  $E_{\text{пр}}$  к  $E_{\text{пад}}$  называется коэффициентом звукопередачи (звукопроницаемости)  $\tau$ :

$$\tau = E_{\text{пр}} / E_{\text{пад}}. \quad (46)$$

Из (43) и (45) следует, что  $\alpha + \beta = 1$  и  $\alpha = 1 - \beta$ .

Коэффициент звукопоглощения зависит от материала конструкции, частоты звуковых волн и от угла их падения на поверхность. Все строительные материалы и конструкции в той или иной степени поглощают звук. При падении звуковых волн на поверхность материала воздух в его порах начинает колебаться. Из-за большого трения, обусловленного вязкостью воздуха и малым сечением пор, происходит потеря звуковой энергии, превращающейся в тепловую. Следовательно, звукопоглощение обусловлено трансформацией механической (звуковой) энергии в тепловую.

Обычные строительные материалы имеют невысокие значения  $\alpha$ ; например, на частоте 500 Гц значение  $\alpha$  для бетона составляет 0,01 (т. е. только 1% звуковой энергии поглощается, а остальные 99% отражаются в помещении), оштукатуренной стены — 0,02, линолеума — 0,03, паркетного пола — 0,07. Специальные звукопоглощающие материалы (звукопоглотители) имеют коэффициенты звукопоглощения в 10—15 раз больше.

Суммарное звукопоглощение в помещении ( $A_{\text{общ}}$ ) определяется как сумма произведений коэффициентов звукопоглощения отдельных поверхностей на их площади. Кроме того, учитывается звукопоглощение ( $A$ ) отдельными объектами (людьми, предметами обстановки и пр.), т. е.

$$A_{\text{общ}} = \sum \alpha_i S_i + \sum A. \quad (47)$$

Произведение  $\alpha S$  представляет собой звукопоглощение данной поверхности. Величина  $A = \alpha S$  называется эквивалентной площадью звукопоглощения этой поверх-

ности. Эквивалентная площадь звукопоглощения есть площадь поверхности, полностью поглощающей звук; например, при  $S=1 \text{ м}^2$  и  $\alpha=1,0$   $A=\alpha S=1 \text{ м}^2$  или при  $S=5 \text{ м}^2$  и  $\alpha=0,2$   $A$  тоже равно  $1 \text{ м}^2$ .

Полное поглощение звука возможно, если  $\beta=0$  (нет отражений) или  $\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1 = 0$  (разность волновых сопротивлений двух сред — преграды и воздуха). Следовательно, полное проникновение звука из одной среды в другую (при нормальном падении звука) возможно лишь в том случае, если эти среды обладают одинаковыми волновыми сопротивлениями ( $\rho_2 c_2 = \rho_1 c_1$ ), или *импедансами*. Импеданс представляет собой отношение звукового давления на поверхности к нормальной составляющей скорости звука около нее. Для учета фазовых соотношений давление и скорость берутся в комплексной форме. Поэтому импеданс является комплексной величиной. Звукопоглощение связано с наличием активной составляющей; если она равна нулю, поглощения звука нет.

## § 7. ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЗВУКОВОГО ПОЛЯ

Существующие методы расчета параметров звукового поля основаны на волновой, геометрической и статистической акустике. Теория волновой акустики рассматривает два режима колебаний воздушного объема: один — как собственные затухающие, другой — как вынужденные под действием какого-либо источника.

В декартовых координатах  $x$ ,  $y$ ,  $z$  волновое уравнение для трехмерного пространства имеет вид

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}, \quad (48)$$

где  $p$  — звуковое давление в среде;  $c$  — скорость звука;  $t$  — время.

Воздушный объем помещения представляет собой колебательную систему с распределенными параметрами, обладающую некоторым спектром собственных частот. Определение собственных частот колебаний просто решается лишь для прямоугольных помещений с жесткими ограждающими поверхностями:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2}, \quad (49)$$

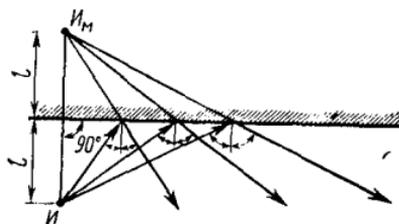
где  $n$  — параметры;  $l$  — размеры помещения.

Каждой тройке значений целочисленных параметров  $n_x$ ,  $n_y$ ,  $n_z$  соответствует определенная частота колебаний воздушного объема.

Анализ выражения (49) показывает, что в области низких частот, соответствующих малым значениям чисел  $n_x$ ,  $n_y$ ,  $n_z$ , собственные частоты колебаний отделены друг от друга сравнительно большими интервалами, т. е. имеют дискретную структуру. В области высоких частот спектр уплотняется и число собственных колебаний быстро увеличивается. Если размеры помещения не слишком малы, то собственные частоты располагаются так

Рис. 9. Построение отраженных звуковых лучей:

$I$  — источник звука;  $I_M$  — мнимый источник звука



плотно, что любая компонента в спектре источника звука возбуждает целый ряд собственных колебаний воздушного объема с частотами, мало отличающимися от частоты возбуждающей компоненты. Чем меньше размеры помещения, тем в большем диапазоне частот будут наблюдаться резонансные явления и увеличиваться неравномерность звукового поля. Расчет звукового давления для области средних и высоких частот (при больших значениях  $n_x$ ,  $n_y$ ,  $n_z$ ) весьма затруднителен даже при использовании современных ЭВМ.

В геометрической акустике при рассмотрении отражения звуковых волн от поверхностей помещения используют понятия *фронт волны* (см. § 1) и *звуковые лучи* (линии, перпендикулярные фронту волны во всех его точках), которые указывают направление распространения звуковой волны. Действие отраженных от внутренних поверхностей звуковых лучей часто заменяется действием *мнимых* (или *фиктивных*) источников с соответствующим уменьшением их мощности, пропорциональным коэффициенту отражения данной поверхности. На рис. 9 показана схема отраженных звуковых лучей. Мнимый источник звука расположен на перпендикуляре к поверхности и на таком же расстоянии от нее, что и действительный источник звука.

Путь звукового луча, многократно отраженного от граней прямоугольного параллелепипеда, может быть представлен в развернутом изображении в двух или трех проекциях на плоскости параллельно граням параллелепипеда. Зная скорость распространения звука, можно определить опаздывание одного звукового луча по отношению к другому, выявить различные акустические дефекты помещений. Такое построение распространения звуковых лучей называется *лучевым эскизом*.

Допустимость применения геометрической акустики зависит от длины звуковой волны, размеров отражающей поверхности и ее расположения по отношению к источнику звука и точке приема. Отражение звуковых волн можно считать направленным, если наименьший размер отражающей поверхности не менее чем в 1,5 раза превышает длину волны. При невыполнении этого условия звуковые волны рассеиваются и построение отраженных звуковых лучей теряет смысл. Для криволинейных поверхностей наименьший радиус кривизны должен быть не менее чем в два раза больше длины волны. Кроме того, геометрическая акустика справедлива лишь в случае независимости коэффициента отражения от угла падения звукового луча.

При незначительном звукопоглощении через каждую точку в объеме помещения одновременно проходит большое количество отраженных звуковых волн, распространяющихся по всевозможным направлениям. Статистическая акустика предполагает, что направления, амплитуды и фазы налагающихся друг на друга волн распределены более или менее хаотически, что дает возможность рассматривать эти волны как некогерентные и считать, что плотность звуковой энергии в каждой точке есть сумма плотностей энергии каждой из этих волн, т. е. применять метод энергетического суммирования.

Таким образом, статистическая теория акустики основана на предположении, что в помещении под действием источника звука возникает звуковое поле, близкое к *диффузному*, характеризуемое тем, что во всех точках поля усредненные во времени уровень звукового давления и поток проходящей по любому направлению звуковой энергии постоянны.

Для учета звукопоглощения принимается величина *среднего коэффициента звукопоглощения*  $\alpha_{\text{ср}} = A_{\text{общ}}/S_{\text{общ}}$ ,

где  $S_{\text{общ}}$  — суммарная площадь ограждающих поверхностей.

Статистическая теория рассматривает также среднюю длину пути между отражениями, т. е. величину среднего пробега звуковой волны, зависящую от объема помещения  $V$ . Если за время  $t$  в точку помещения приходит  $n$  отражений, а отрезок времени между двумя последующими отражениями в среднем равен  $t_1$ , то  $n = t/t_1$ , а средняя длина пути  $l_{\text{ср}} = t_1 c$  ( $c$  — скорость распространения звука). Величина  $l_{\text{ср}}$  зависит от формы помещения, однако для практических целей может быть принята постоянной:

$$l_{\text{ср}} = 4V/S_{\text{общ}}. \quad (50)$$

Если процессы излучения и поглощения звука происходят непрерывно, то дифференциальное уравнение, описывающее режим динамического равновесия, имеет вид

$$V \frac{d\varepsilon}{dt} = W - A_{\text{общ}}, \quad (51)$$

где  $\varepsilon$  — плотность звуковой энергии;  $W$  — мощность, излучаемая источником;  $A_{\text{общ}}$  — энергия, поглощаемая поверхностями помещения.

Для случая равновероятного прихода звуковой энергии в любую точку объема из всех направлений количество энергии, падающей на  $1 \text{ см}^2$  поверхности в секунду, равно

$$I = \frac{1}{4} \varepsilon c. \quad (52)$$

Величина

$$A_{\text{общ}} = \frac{1}{4} \varepsilon c \alpha_{\text{ср}} S_{\text{общ}}. \quad (53)$$

После подстановки (53) в (51), интегрирования и некоторых преобразований можно получить

$$\varepsilon = \frac{4W}{c \alpha_{\text{ср}} S_{\text{общ}}} \left[ 1 - e^{-\frac{c S_{\text{общ}}}{4V} (1 - \alpha_{\text{ср}}) t} \right], \quad (54)$$

где  $e$  — основание натуральных логарифмов.

Данное уравнение характеризует процесс нарастания плотности звуковой энергии в помещении. Он будет

происходить до тех пор, пока излучаемая источником звука энергия не уравновесится поглощаемой энергией. Величина плотности звуковой энергии при  $t \rightarrow \infty$  достигнет своей максимальной величины, т. е.  $\varepsilon = \varepsilon_0$ ; тогда

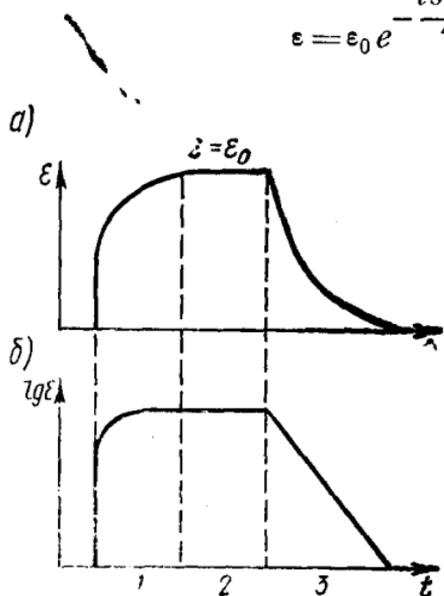
$$\varepsilon_0 = \frac{4W}{c\alpha_{\text{ср}}S_{\text{общ}}} = \frac{4W}{cA_{\text{общ}}}. \quad (55)$$

Процесс затухания звука после выключения источника (*реверберация*) наступит при  $W = 0$ ; тогда уравнение (51) примет вид

$$W \frac{d\varepsilon}{dt} = -\varepsilon \frac{c\alpha_{\text{ср}}S_{\text{общ}}}{4}. \quad (56)$$

Интегрируя и подставляя граничные условия  $\varepsilon = \varepsilon_0$  при  $t = 0$ , получим

$$\varepsilon = \varepsilon_0 e^{-\frac{cS_{\text{общ}}}{4V} \ln(1-\alpha_{\text{ср}})t}. \quad (57)$$



Время, в течение которого происходит затухание звука, называется *временем реверберации*. Этот процесс происходит вследствие многократных отражений звуковых волн от ограждающих поверхностей (рис. 10).

Рис. 10. Кривая нарастания и затухания плотности звуковой энергии в помещении:

*a* — в линейном масштабе; *б* — в логарифмическом масштабе; 1 — зона нарастания звука; 2 — зона стационарного режима; 3 — зона затухания звука

В качестве эталона принято время затухания плотности звуковой энергии в  $10^6$  раз (или уменьшение уровня звукового давления на 60 дБ); это время называется *временем стандартной реверберации* (обычно заменяется термином «время реверберации»).

Следовательно,  $\varepsilon/\varepsilon_0 = 10^{-6}$  и уравнение (57) примет вид

$$\varepsilon/\varepsilon_0 = e^{-\frac{cS_{\text{общ}}}{4V} \ln(1-\alpha_{\text{ср}})T} = 10^{-6}$$

или

$$\frac{c\alpha_{\text{ср}}S_{\text{общ}}}{4V} T \lg e = 6,$$

откуда

$$T = 0,161 \frac{V}{\alpha_{\text{ср}}S_{\text{общ}}} = 0,161 \frac{V}{A_{\text{общ}}}.$$

С учетом данных экспериментальных исследований принято

$$T = 0,163 \frac{V}{A_{\text{общ}}}, \quad (58)$$

т. е. время реверберации зависит только от объема помещения и эквивалентной площади звукопоглощения в нем.

На рис. 10, б плотность звуковой энергии отложена в логарифмическом масштабе (т. е. уровень в дБ); при этом получается картина, характеризующая слуховое восприятие нестационарных процессов в помещениях. Процесс нарастания уровня происходит очень быстро и поэтому не играет той большой роли в оценке акустических качеств помещений, которую оказывает процесс затухания звука. Статистический подход к оценке звуковых полей имеет большое значение при решении практических задач борьбы с шумом.

Так как  $I = 4 W/A_{\text{общ}}$ , то уровень интенсивности, т. е.  $L_I = 10 \lg \frac{I}{I_0}$ , будет равен

$$L_I = L_W - 10 \lg A_{\text{общ}} + 6. \quad (59)$$

При стандартных атмосферных условиях уровень звукового давления  $L$  равен уровню интенсивности звука (см. § 3 и 4), поэтому

$$L = L_W - 10 \lg A_{\text{общ}} + 6. \quad (60)$$

Выражения (59) и (60) справедливы для диффузного звукового поля. Обычно в помещениях можно выделить плотность энергии прямого  $\epsilon_{\text{пр}}$  и отраженного от всех поверхностей  $\epsilon_{\text{отр}}$  звука. Тогда общая плотность звуковой энергии в помещении будет равна  $\epsilon = \epsilon_{\text{пр}} + \epsilon_{\text{отр}}$ .

Плотность звуковой энергии прямого звука при сферическом излучении на расстоянии  $r$  от источника равна

$$\epsilon_{\text{пр}} = W/(4\pi r^2 c). \quad (61)$$

Плотность диффузной звуковой энергии после учета потерь энергии при первом отражении звука от поверхностей

$$\epsilon_{\text{отр}} = \frac{4W}{cS_{\text{общ}}} \left( \frac{1 - \alpha_{\text{ср}}}{\alpha_{\text{ср}}} \right) = \frac{4W(1 - \alpha_{\text{ср}})}{cA_{\text{общ}}}. \quad (62)$$

Общая плотность звуковой энергии

$$\epsilon = \frac{W}{4\pi r^2 c} + \frac{4W(1 - \alpha_{\text{ср}})}{cA_{\text{общ}}} = \frac{W}{4\pi r^2 c} + \frac{4W}{cB}, \quad (63)$$

где  $B = A_{\text{общ}} / (1 - \alpha_{\text{ср}})$  — постоянная помещения.

В соответствии с (63) вблизи источника уровень уменьшается на 6 дБ при увеличении расстояния  $r$  в два раза. Зона отраженного звука определяется величиной *предельного радиуса*  $r_{\text{пр}}$ , т. е. расстоянием от источника, на котором уровни звукового давления отраженного и прямого звука равны (м):

$$r_{\text{пр}} \simeq \sqrt{\frac{A_{\text{общ}}}{50(1 - \alpha_{\text{ср}})}} \simeq \sqrt{\frac{B}{50}}. \quad (64)$$

Статистическая акустика определяет уровень звукового давления  $L$  в зоне действия прямого и отраженного звука по формуле

$$L = L_W + 10 \lg \left( \frac{\Phi}{\Omega r^2} + \frac{4}{B} \right), \quad (65)$$

значения  $\Phi$  и  $\Omega$  см. на с. 17.

Обобщая изложенное, можно сделать следующие выводы. Волновая теория акустики позволяет получить точные решения. Однако сложность математического аппарата и большие затраты времени на расчеты ограничивают ее применение диапазоном низких частот, тем более что в этом диапазоне другие методы неприменимы.

Не получила большого распространения и геометрическая акустика вследствие кажущейся сложности и недостаточной разработки. Геометрическая акустика дает не только наглядное представление о характере распространения звука, но и позволяет количественно оценить такие вопросы, как неравномерное расположение звукопоглотителей, влияние размеров и формы помещения на эффективность мер борьбы с шумом и др.

Статистическая акустика позволяет достаточно точно решать задачи для помещений с малым звукопоглощением и для диапазона высоких частот. Для помещений, в которых длина, ширина и высота изменяются в широких пределах (например, в производственных зданиях), а также имеющих неравномерное расположение звукопоглотителей, распространение звука не отвечает законам статистической акустики. Однако с учетом различных эмпирических поправок статистическая акустика позволяет наиболее просто решать практические задачи, поэтому она получила наибольшее распространение.

# Раздел второй

## АРХИТЕКТУРНАЯ АКУСТИКА

### Глава III

#### ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ АКУСТИКУ ЗАЛОВ

##### § 8. ВРЕМЯ РЕВЕРБЕРАЦИИ

Одним из основных критериев акустического качества залов является время реверберации (см. § 7). Чем больше помещение, тем больше и средняя длина свободного пробега звуковой волны  $l_{\text{ср}}$ , а число отражений в  $c(n)$  меньше, т. е. процесс затухания звука будет происходить медленнее (табл. 2).

Таблица 2

Значения  $l_{\text{ср}}$  и  $n$  для помещений различного объема

Размеры помещения, м	$V, \text{ м}^3$	$S_{\text{общ}}, \text{ м}^2$	$l_{\text{ср}} = \frac{4V}{S_{\text{общ}}}, \text{ м}$	$n = \frac{c S_{\text{общ}}}{4V}$
10×10×10	1 000	600	6,7	51
100×10×10	10 000	4200	9,5	36
100×20×10	20 000	6400	12,5	27
100×20×20	40 000	8800	18	19

Особенно велико время реверберации в помещениях большого объема с ограждающими поверхностями, имеющими невысокие коэффициенты звукопоглощения. В этом случае помещения будут гулкими. С уменьшением объема помещений увеличивается число отражений от поверхностей и, если они будут иметь высокие коэффициенты звукопоглощения, затухание звука будет происходить быстро (время реверберации мало) и помещения будут глухими.

Формула (58) используется при значениях  $\alpha_{\text{ср}} \leq 0,2$ . При  $\alpha_{\text{ср}} > 0,2$  расчеты целесообразнее производить по формуле

$$T = 0,163 \frac{V}{-S_{\text{общ}} \ln(1 - \alpha_{\text{ср}})}. \quad (66)$$

В залах большого объема ( $V \simeq 10\,000 \text{ м}^3$ ) при расчете времени реверберации необходимо учитывать поглощение звука в воздухе. Для этого в знаменатель формул (58) и (66) добавляется член  $nV$ , где  $n$  — коэффициент ( $\text{м}^{-1}$ ), зависящий от температуры и относительной влажности воздуха (см. табл. 1 прилож. I).

Для определения времени реверберации в помещении необходимо определить его объем  $V$ ,  $\text{м}^3$ , суммарную площадь ограничивающих поверхностей  $S_{\text{общ}}$ ,  $\text{м}^2$ , эквивалентную площадь звукопоглощения  $A_{\text{общ}}$ ,  $\text{м}^2$ . Последняя величина определяется обычно при 70%-ном заполнении залов для трех частот: 125, 500 и 2000 Гц.

Определяют  $A_{\text{общ}}$  по формуле

$$A_{\text{общ}} = \sum \alpha_i S_i + \sum A + \alpha_{\text{доб}} S_{\text{общ}}, \quad (67)$$

где  $\sum \alpha_i S_i$  — сумма произведений коэффициентов звукопоглощения  $\alpha_i$  отдельных поверхностей на их площади,  $\text{м}^2$  (значения  $\alpha$  даны в табл. 2 прилож. I);  $\sum A$  — сумма эквивалентных площадей звукопоглощения зрителями и креслами,  $\text{м}^2$  (см. табл. 3 прилож. I);  $\alpha_{\text{доб}}$  — средний коэффициент добавочного звукопоглощения, учитывающий звукопоглотители, фактически существующие в залах (осветительная арматура; воздушные полости, соединенные с основным объемом зала; щели и трещины; вентиляционные решетки и др.).

Средний коэффициент добавочного звукопоглощения в среднем может быть принят равным 0,08—0,09 на частоте 125 Гц и 0,04—0,05 на частотах 500—2000 Гц. Для залов, в которых указанные условия, вызывающие добавочное звукопоглощение, сильно выражены, следует эти значения увеличить примерно на 30%, а в залах, где эти условия выражены слабо, примерно на 30% уменьшить.

После нахождения общей эквивалентной площади звукопоглощения  $A_{\text{общ}}$  определяют  $\alpha_{\text{ср}} = A_{\text{общ}}/S_{\text{общ}}$ . Если  $\alpha_{\text{ср}} > 0,2$ , то расчет времени реверберации ( $T$ ) производится по формуле (66), которую можно представить в виде

$$T = 0,163 \frac{V}{S_{\text{общ}} \varphi(\alpha_{\text{ср}})}, \quad (68)$$

где  $\varphi(\alpha_{\text{ср}})$  — функция среднего коэффициента звукопоглощения, значения которой приведены в табл. 4 прилож. I.

**Пример.** Определить время реверберации для пустого зала размером  $33 \times 22 \times 11,5$  м. Объем зала  $V=8349$  м<sup>3</sup>,  $S_{\text{общ}}=2717$  м<sup>2</sup>, площади отдельных поверхностей и их коэффициенты звукопоглощения (см. табл. 2 прилож. 1) даны в табл. 3.

Таблица 3

Определение эквивалентной площади звукопоглощения

Поверхности, материалы	S, м <sup>2</sup>	Значения $\alpha$ и $\alpha S$ , м <sup>2</sup> , на частотах, Гц					
		125		500		2000	
		$\alpha$	$\alpha S$	$\alpha$	$\alpha S$	$\alpha$	$\alpha S$
Потолок, сухая штукатурка	726	0,02	14,5	0,06	43,6	0,05	36,3
Пол, паркет	726	0,04	29	0,07	50,8	0,07	50,8
Стены, сухая штукатурка	1265	0,02	25,3	0,06	75,9	0,05	63,3

Добавочное звукопоглощение на частоте 125 Гц равно 217,4 м<sup>2</sup> ( $0,08 \cdot 2717$  м<sup>2</sup>), а на частотах 500 и 2000 Гц — 108,7 м<sup>2</sup> ( $0,04 \times 2717$  м<sup>2</sup>). Общая эквивалентная площадь звукопоглощения равна (см. табл. 3) на частотах: 125 Гц —  $A_{\text{общ}}=14,5+29+25,3+217,4=286$  м<sup>2</sup>; 500 Гц —  $A_{\text{общ}}=279$  м<sup>2</sup>; 2000 Гц —  $A_{\text{общ}}=259$  м<sup>2</sup>.

Средний коэффициент звукопоглощения  $\alpha_{\text{ср}}=A_{\text{общ}}/S_{\text{общ}}$  на частотах: 125 Гц —  $\alpha_{\text{ср}}=286/2717=0,105$ ; 500 Гц —  $\alpha_{\text{ср}}=279/2717=0,1$ ; 2000 Гц —  $\alpha_{\text{ср}}=259/2717=0,095$ .

Так как  $\alpha_{\text{ср}} < 0,2$ , то время реверберации определяем по формуле  $T=0,163 V/A_{\text{общ}}$  на частотах:

$$125 \text{ Гц} - T=0,163 (8349/286)=4,75 \text{ с};$$

$$500 \text{ Гц} - T=0,163 (8349/279)=4,85 \text{ с};$$

$$2000 \text{ Гц} - T=0,163 (8349/259)=5,25 \text{ с}.$$

Полученное время реверберации сравнивается с рекомендуемым (оптимальным) временем для данного типа зала и его объема (рис. 11). Это время должно быть в пределах затушеванной области (усреднено по данным различных авторов) в диапазоне частот 500—2000 Гц. На частотах ниже 500 Гц допустимо некоторое увеличение времени реверберации, с тем чтобы на частоте 125 Гц оно было не более чем на 40% больше по сравнению со значением  $T$  на частоте 500 Гц. Как правило, расчетное время реверберации получается больше рекомендуемого, поэтому необходимо увеличить звукопоглощение в зале. Для этого, исходя из требуемого времени реверберации  $T_{\text{тр}}$ , вычисляем

$$\varphi(\alpha_{\text{ср}}^{\text{тр}}) = \frac{0,163}{T_{\text{тр}} S_{\text{общ}}} \quad (69)$$

Из табл. 4 прилож. I по найденному значению  $\varphi(\alpha_{ср}^{тр})$  находим средний коэффициент звукопоглощения  $\alpha_{ср}^{тр}$ , после чего получаем требуемую общую эквивалентную площадь звукопоглощения зала  $A_{общ}^{тр} = \alpha_{ср}^{тр} S_{общ}$ . Сравнив это значение с величиной  $A_{общ}$ , определяем, насколько необходимо изменить эквивалентную площадь звукопоглощения для достижения нужного времени ре-

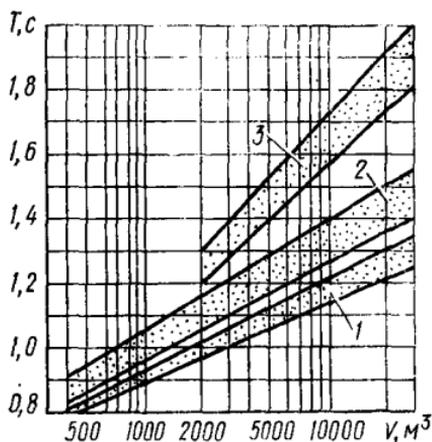


Рис. 11. Рекомендуемое время реверберации для залов различного назначения в зависимости от их объема в диапазоне частот 500—2000 Гц:

1 — лекционные залы, залы пассажирских помещений вокзалов; 2 — залы драматических театров, залы многоцелевого назначения средней вместимости, кинотеатры; 3 — залы театров оперы и балета, концертные залы

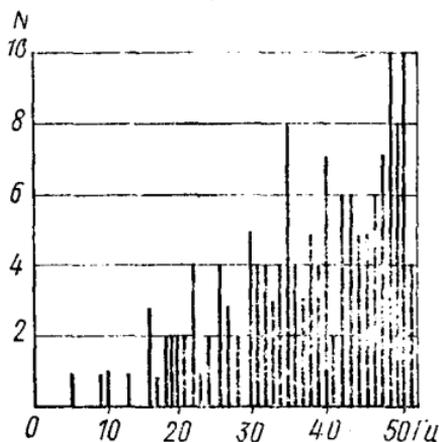


Рис. 12. Спектр собственных частот (до 50 Гц) помещения

верберации (в пределах  $\pm 10\%$ ). Полученные в результате расчета значения времени реверберации округляются с точностью до 0,05 с.

Время реверберации является одним из существенных критериев оценки акустических качеств залов. Время реверберации хорошо характеризует общую гулкость залов. Ценным является также и то, что физическое содержание этого критерия хорошо связано с субъективным ощущением. Немаловажное значение имеет и легкость экспериментального и аналитического определения времени реверберации в уже построенных или проектируемых залах.

Реверберация является процессом одновременного затухания собственных колебаний воздушного объема зала. В качестве примера на рис. 12 показан спектр собственных частот (в интервале от 0 до 50 Гц) зала, для которого определялось время реверберации. Так как зал прямоугольной формы, то спектр собственных частот определялся по формуле (49). По оси ординат отложено число собственных колебаний  $N$  с совпадающими частотами. В интервале от 0 до 50 Гц оказалось 39 собственных частот, а при расширении интервала до 100 Гц — уже 972. В интервале от 1 до 16 Гц собственные частоты отделены друг от друга сравнительно большими интервалами и спектр имеет дискретную структуру. Затем спектр становится настолько плотным, что практически любая составляющая источника звука возбуждает целый ряд собственных колебаний воздушного объема с частотами, близкими к частоте возбуждения.

Чем меньше объем помещения, тем более существенна дискретная структура спектра собственных частот в более широком интервале частот. Так, для помещения объемом  $35 \text{ м}^3$  в интервале от 1 до 200 Гц спектр может считаться дискретным.

## § 9. НЕКОТОРЫЕ КРИТЕРИИ АКУСТИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА ЗАЛОВ

Возбуждаемые источником собственные колебания имеют разные показатели затухания. Кроме того, время реверберации зависит и от типа звуковых сигналов, которые по-разному могут возбуждать отдельные виды собственных колебаний воздушного объема помещений. Ввиду недостаточности критерия времени реверберации были предложены другие критерии для оценки акустических свойств залов. Одним из них является отношение плотности диффузной звуковой энергии к плотности прямой энергии, приходящей от источника звука.

Большое влияние на слышимость речи и музыки оказывает временная структура ранних отражений звука, определяемая их уровнями и временем запаздывания по отношению к прямому звуку. Процесс спада звуковой энергии можно представить состоящим из двух неравноценных временных участков: небольшого начального, энергия которого может способствовать повышению разборчивости речи и улучшению качества звучания музы-

ки, и завершающего, на котором звуковая энергия определяет гулкость помещения. Причем значения начального участка для музыки и речи различны. Большая группа предложенных критериев учитывает соотношение полезной части процесса затухания звука и всей плотности звуковой энергии.

Вопросы выбора критериев для оценки акустических качеств залов в настоящее время являются предметом теоретических и экспериментальных исследований; глубина их разработки еще не всегда позволяет использовать полученные результаты непосредственно для практических целей. Поэтому наиболее часто используется разность времени прихода первого отражения по сравнению с прямым звуком. Обычно она составляет от 0,02 до 0,03 с. Так как  $c=340$  м/с, то запаздыванию на 0,02 с соответствует разность ходов отраженного и прямого звука около 7 м; на 0,03 с — 10 м. Промежутки времени между следующими отражениями также не должны превышать данных значений.

В залах, предназначенных для слушания речи (аудитории, драматические театры), основное значение имеют четкость и разборчивость речи. Критерием для оценки слышимости речи является *артикуляция*, которая оценивается в процентах правильно понятых слов или слогов по отношению ко всем произнесенным. Поэтому артикуляция является субъективным критерием. Для определения разборчивости пользуются экспериментальным методом. Диктор медленно читает таблицы односложных, не имеющих смысла слогов (слоговая разборчивость) или фраз (разборчивость фраз), и слушатели, находящиеся в различных точках зала, записывают их. В залах, в которых слоговая артикуляция равна 85—96%, разборчивость речи считается отличной; если артикуляция находится в пределах 75—85%, разборчивость считается хорошей; 65—75% — удовлетворительной; меньше 65% — разборчивость речи неудовлетворительна. Неудовлетворительной разборчивости речи, т. е. 60—65% слоговой артикуляции, соответствует примерно 80% разборчивости фраз, а удовлетворительной разборчивости — примерно 90% разборчивости фраз.

На артикуляцию оказывают влияние следующие основные факторы: время реверберации (коэффициент  $K_1$ ), уровень громкости речи ( $K_2$ ), отношение уровня мешающего шума к уровню громкости речи ( $K_3$ ), форма и

размеры зала ( $K_4$ ). Тогда процент артикуляции будет равен (формула Кнудсена)

$$ПА = 96K_1K_2K_3K_4. \quad (70)$$

Определение артикуляции по этой формуле является приближенным. Тем не менее приводимые ниже значения коэффициентов позволяют избежать грубых акустических ошибок еще на стадии проектирования. Значения  $K_1$ , полученные опытным путем, при времени реверберации примерно  $0,5 \pm 0,8$  с принимаются за единицу; при увеличении времени реверберации артикуляция падает примерно на 10% на каждую секунду времени. Так, при времени реверберации, равном 4 с,  $K_1 = 0,65$ , и, следовательно, разборчивость речи будет неудовлетворительной (ПА — 62%) даже при всех остальных коэффициентах, равных 1. Наибольшая разборчивость речи имеет место при уровне речи около 70—80 дБ. При 60 и 100 дБ  $K_2 = 0,95$ ; 50 дБ — 0,9; 40 дБ — 0,8—0,85 и при 30 дБ — 0,65.

При равенстве уровня мешающего шума и уровня речи коэффициент  $K_3 = 0,6—0,7$ , т. е. артикуляция практически становится неудовлетворительной. При отношении уровня шума к уровню речи, равном 0,7,  $K_3 = 0,8$ ; при 0,6  $K_3 = 0,85$ ; при 0,4  $K_3 = 0,9$ ; при 0,3  $K_3 = 0,92$ ; при 0,2  $K_3 = 0,95$ ; при 0,1  $K_3 = 0,98$ . Коэффициент  $K_4$  зависит от формы и размеров залов. Для больших залов  $K_4 = 0,9 \div 0,95$ ; для прямоугольных сравнительно небольших залов  $K_4 = 1,0$ .

**Пример.** Требуется определить артикуляцию для большого зала прямоугольной формы при  $T=2$  с и уровне шума около 50 дБ.

При  $T=2$  с коэффициент  $K_1 = 0,85$ ;  $K_2 = 1$  ( $L=70—75$  дБ);  $K_3 = 0,8$  (отношение уровня шума к уровню речи  $\frac{50}{70 \div 75} \approx 0,7$ );  $K_4 \approx 0,95$ .

По формуле (70)  $ПА = 96 \cdot 0,85 \cdot 1 \cdot 0,8 \cdot 0,95 = 62\%$ . Следовательно, в зале будет неудовлетворительная артикуляция. Для ее улучшения необходимо уменьшить время реверберации и уровень мешающего шума.

## § 10. ФОРМА ЗАЛОВ И ИХ ОТДЕЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Оценка формы и размеров залов, а также отдельных поверхностей с акустической точки зрения обычно производится на основе данных акустических исследований в натуре или на модели, а также на основе геометрических

построений. Применимость геометрических отражений зависит от длины звуковой волны, размеров отражающей поверхности и ее расположения по отношению к источнику звука и зрителям.

В тех случаях, когда лучевая плоскость параллельна одной из плоскостей проекций, углы падения и отражения проектируются на эту плоскость проекций без искажения и построение отраженного луча выполняется просто (см. § 6). Если же лучевая плоскость не параллельна плоскости проекций, но ей параллельна нормаль в точке отражения, то проекции углов падения и отражения остаются равными; построение отраженного луча выполняется в этом случае обычными приемами начертательной геометрии. Если наименьшая сторона отражателя не менее, чем в 1,5 раза превышает длину волны, отражение звуковых волн будет направленным. При равенстве длин волн и размеров отражателя и дальнейшем увеличении длин волн звуковая энергия при отражении рассеивается и построение отраженных звуковых лучей теряет смысл.

При разнице во времени прихода прямого и отраженного звуков более 0,05 с человек уже различает эти звуки. Это явление называется эхом. За 0,05 с звук проходит расстояние 17 м ( $340 \times 0,05 = 17$  м). Поэтому эхо возможно только в помещениях достаточно большого размера, однако своеобразное «порхающее эхо» может возникнуть и в малых залах за счет многократных отражений от противоположных стен с малым звукопоглощением. Для предупреждения «порхающего эха» необходимо увеличить звукопоглощение этих стен, или по крайней мере одной из них, т. е. понизить интенсивность отражения звуковых волн, или отказаться от такой формы зала.

Вогнутые или сводчатые поверхности с малым звукопоглощением способствуют концентрации звуковой энергии, фокусируют звук. Если источник звука располагается в центре кривизны, отражения концентрируются в центре круга. При приближении источника звука к поверхности (до половины радиуса) круговая поверхность отражает как эллиптическая, т. е. фокус находится за центром круга. При дальнейшем приближении источника звука к отражающей поверхности величина фокусного расстояния возрастает, достигая бесконечности, когда расстояние до источника звука становится равным половине радиуса. В этом случае данная поверхность отражает

как параболическая. Если источник звука расположен еще ближе, то фокус образуется сзади отражающей поверхности и поверхность действует как гиперболическая.

На рис. 13 показаны схемы залов при различном соотношении радиуса кривизны цилиндрического потолка и высоты. При одинаковой отражающей поверхности потолка площадь пола, охваченная отраженными лучами, неодинакова. Наибольшая концентрация звука имеет

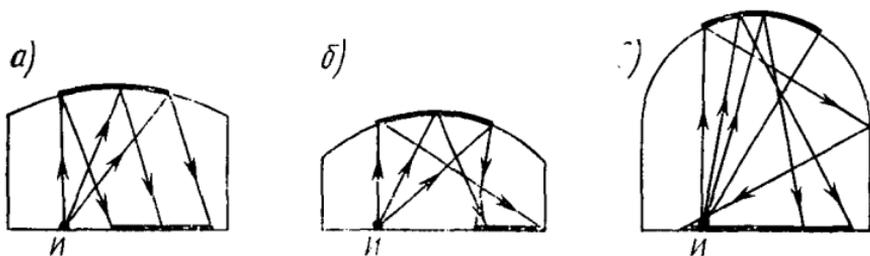


Рис. 13. Влияние радиуса кривизны  $r$  на характер отражения при различной высоте  $h$ :

$a$  — при  $h=r/2$ ;  $b$  — при  $h=r$ ;  $c$  — при  $h=2r$

место, когда радиус кривизны близок к высоте помещения. Поэтому радиус кривизны должен быть значительно большим или меньшим высоты помещения. В этом случае зоны концентрации звука будут расположены далеко от поверхности пола, на которой располагаются зрители. Если радиус кривизны меньше длины волны на низких частотах, то концентрация звука будет происходить на средних и высоких частотах, что приведет к искажению тембра звука.

В практике встречаются случаи двойного фокусирования. Например человек, говорящий тихим голосом в точке  $A$ , расположенной недалеко от стены, не слышен в точке  $B$ , но очень хорошо воспринимается слушателем в точке  $B$  (рис. 14). Такой эффект можно наблюдать в метро.

На рис. 15 показано распространение звуковых лучей из точки  $A$ . Несмотря на малые размеры зала (диаметр около 10 м), в нем наблюдается несколько фокусов, приводящих не только к неравномерному распределению звуковой энергии, но и даже к появлению в точке  $B$  сильного и отчетливого эха. Акустическое качество залов с фокусированием большей частью является неудовлетворительным из-за возможного образования эха (в больших

залах), неравномерного распределения отраженной звуковой энергии и, наконец, из-за нарушения необходимого соотношения между прямой и отраженной звуковой энергией.

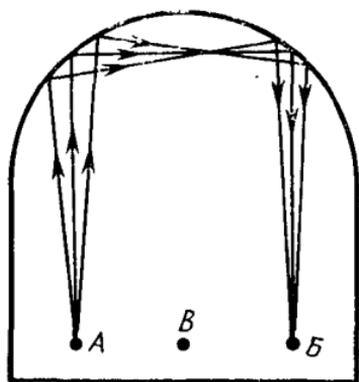


Рис. 14. Схема двойного фокусирования

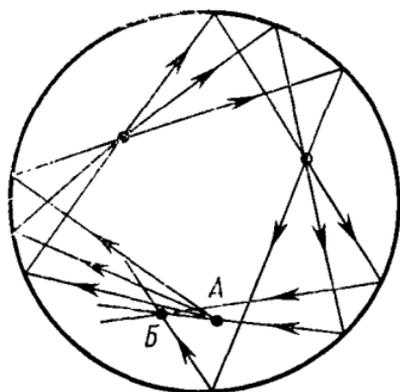
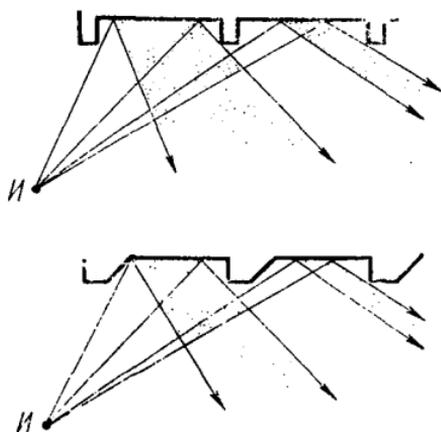
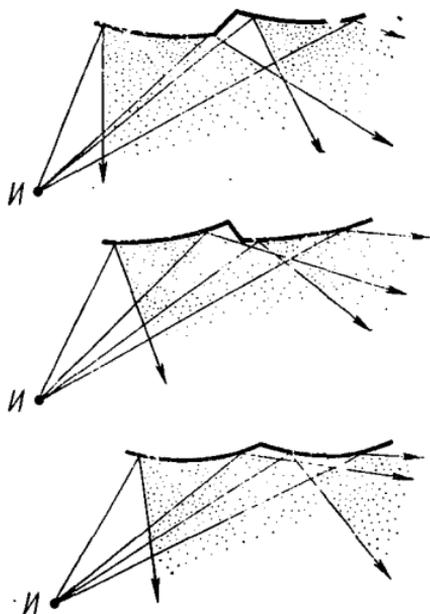


Рис. 15. Распространение звука в круглом зале

← Рис. 16. Отражение звука от сложного профиля поверхности

Рис. 17. Отражение звука от поверхности с ребрами или пиллястрами



Геометрические отражения позволяют проанализировать профиль отдельных поверхностей. Например, на рис. 16 показано рассеянное отражение звука от слож-

ного профиля поверхности потолка или стены, что обеспечивает равномерное распределение отраженной звуковой энергии вдоль зала. В то же время наличие на поверхности ребер или пилястр (рис. 17) приводит к образованию зон, лишенных отражений.

## § 11. ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ И КОНСТРУКЦИИ

Звукопоглотители могут быть подразделены на следующие группы: *пористые материалы, резонирующие панели*, конструкции с *перфорированным покрытием материала, штучные поглотители*.

Звукопоглощение пористых материалов обусловлено вязким трением при движении воздуха в узких каналах и порах, внутренним трением при деформациях скелета материала, а также теплообменом между воздухом в порах и скелетах. Пористые звукопоглощающие материалы обычно изготавливают в виде плит, которые крепят непосредственно к поверхности или на отnose. Основой зернистого пористого материала может служить минеральная крошка, гравий, пемза, каолин или шлак; в качестве вяжущего используют цемент или жидкое стекло. Такие материалы имеют достаточно большую механическую прочность и могут использоваться для уменьшения шума в коридорах общественных и других зданий, фойе, лестничных клетках, производственных помещениях.

В помещениях, где к внешнему виду звукопоглотителя предъявляются повышенные требования, применяют волокнистые пористые материалы, изготавливаемые из древесного волокна, асбеста, минеральной ваты, стеклянного или капронового волокна и т. п. с использованием в качестве вяжущего битума, смолы, цемента (см. табл. 2 прилож. I). Для пористых материалов характерно увеличение звукопоглощения с повышением частоты звуковых волн. Коэффициенты звукопоглощения для большинства пористых материалов на средних и высоких частотах составляют 0,4—0,6. Их используют в основном для улучшения акустических качеств в кинотеатрах, театрах, концертных залах, студиях, аудиториях. Кроме того, они могут быть использованы и для уменьшения шума в зданиях общественного назначения, детских садах и яслях, больницах, ресторанах и др. К пористым материалам относятся также драпировки и ковры, применяемые для

увеличения общего звукопоглощения в зрительных залах на средних и высоких частотах.

Звукопоглощающие конструкции с большим поглощением в области низких частот выполняют в виде панелей, представляющих собой тонкие пластины (например, фанера), закрепленные на раме. Между пластиной и поверхностью имеется воздушный промежуток. Под действием звуковых волн панели начинают колебаться, причем максимальные амплитуды колебаний будут при совпадении собственных частот колебаний конструкций и вынуждающих частот (явление резонанса). Панели используют для коррекции частотной характеристики реверберации в радиовещательных, кино- и телевизионных студиях, а также в зрительных залах.

Конструкции с перфорированным покрытием материала позволяют получать достаточно большое звукопоглощение в любой области частот и используются для помещений различного назначения. Конструкции осуществляются в виде слоя пористого материала, укрепленного на поверхности и закрытого перфорированным экраном. Частотная характеристика звукопоглощения регулируется подбором материала, его толщиной, толщиной экрана, размером и формой отверстий, шагом отверстий. Большое преимущество перфорированных конструкций заключается в простоте их изготовления и монтажа, а также в хороших возможностях архитектурно-декоративного решения интерьеров помещений.

Для целей борьбы с шумом используют также подвесные или штучные звукопоглотители из пористого звукопоглощающего материала, заключенного в перфорированный футляр конической или кубической формы, выполняемый из пластмассы, фанеры или металла. Звукопоглотители подвешивают как можно ближе к источникам шума и в зонах концентрации звуковой энергии (рис. 18). Эффективность штучных поглотителей оценивают не коэффициентом звукопоглощения, а эквивалентной площадью звукопоглощения  $A$ ,  $m^2$  [13].

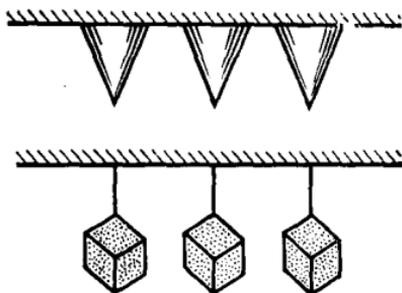


Рис. 18. Схемы штучных звукопоглотителей

В практике строительства общественных зданий широкое применение нашли архитектурно-акустические конструкции, состоящие из эффективного звукопоглотителя и декоративной решетки из металла или дерева. При небольшой ширине деревянных реек (до 4 см) и ширине просветов между ними (до 5 см) такая решетка действует лишь как декоративное покрытие, не оказывая практически никакого влияния на поглощение звука, осуществляемое находящимся за ней звукопоглотителем.

Следует иметь в виду, что в помещениях большого объема, а также в помещениях, где имеется достаточно большое звукопоглощение, эффективность снижения времени реверберации или уровня шума за счет внесения добавочного звукопоглощения уменьшается. Поэтому мероприятия, связанные с применением звукопоглощающих материалов и конструкций, требуют тщательного технического и экономического обоснования.

## *Глава IV*

### **ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗАЛОВ С ЕСТЕСТВЕННОЙ АКУСТИКОЙ**

#### **§ 12. ОСНОВНЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ВЫБОР ОБЪЕМНО-ПЛАНИРОВОЧНЫХ РЕШЕНИЙ ЗАЛОВ**

К залам с естественной акустикой относятся\* лекционные, театральные и концертные залы, залы многоцелевого назначения средней вместимости. Основные акустические требования, предъявляемые к данным залам, во многом сходны; они зависят главным образом от объемно-планировочных решений залов.

Рассмотрим распространение звука на схеме продольного разреза зала (рис. 19). Если для зон 1 и 3 можно говорить о примерном равенстве плотности прямой звуковой энергии (затухание звука в воздухе невелико), то в зонах 2 и 4 плотность звуковой энергии будет намного

---

\* Деление на залы с естественной акустикой и залы, оборудованные системой звукоусиления, условно. В настоящее время практически все большие залы оборудуют системой звукоусиления, но для ряда залов ставятся требования обеспечения оптимальных акустических условий без средств звукоусиления.

меньше за счет звукопоглощения и экранирования звука впереди сидящими зрителями. Однако такое рассмотрение возможно лишь на открытом воздухе, т. е. без отражающих звук поверхностей. В закрытых залах всегда будет и отраженная звуковая энергия, распространение которой можно проследить путем построения лучевых отражений (рис. 19, б).

Как видно, плотность звуковой энергии в зонах 1 и 3 должна увеличиться, так как в эти точки направлены отраженные звуковые лучи. В зону 2 и на некоторые места на балконе эти лучи могут не поступить. Поэтому акустические условия на местах в конце зала будут неудовлетворительны (если размеры зала достаточно велики).

Для выравнивания плотности звуковой энергии не-

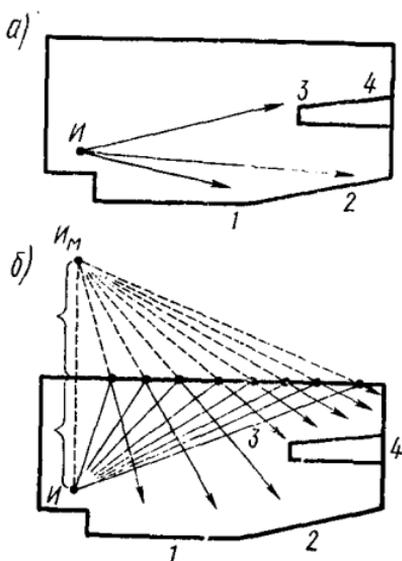


Рис. 19. Распространение прямых (а) и отраженных (б) звуковых лучей

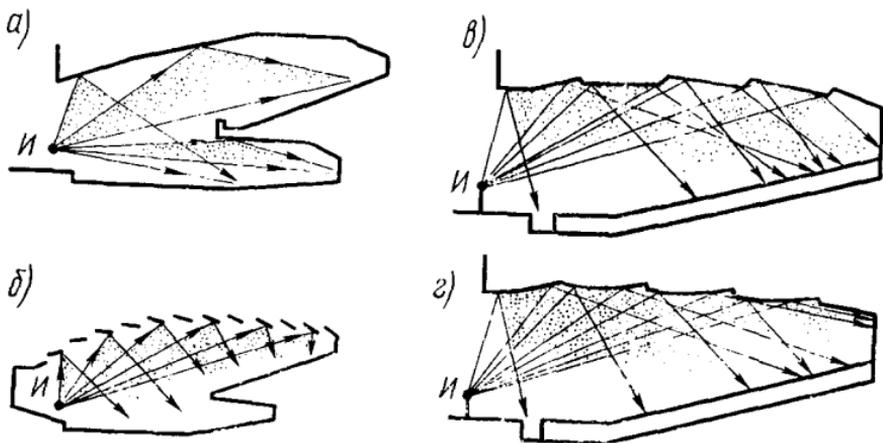


Рис. 20. Форма и профиль потолка, обеспечивающие необходимое отражение звука

обходимо предусмотреть такую форму потолка и стен, чтобы основная часть отраженных звуковых лучей была направлена примерно во вторую половину зала (рис. 20,

а, б). При этом разница в плотности звуковой энергии в рассматриваемых зонах уменьшается тем больше, чем выше интенсивность отраженных звуковых волн. Для этого необходимо потолок зала (или по крайней мере участки потолка, эффективно отражающие звук) обрабатывать материалами с малым звукопоглощением. На рис. 20, в, г потолок обеспечивает необходимое отражение звука, а при потолке, показанном на рис. 21, имеются зоны 1, лишенные отраженного звука.

Недопустимо устройство прямоугольных поперечных ребер на потолке и пилястр в нижней части боковых стен, так как при этом получаются нежелательные отражения звука к источнику и возникает зона, лишенная геометрических отражений. К этому же может привести и неправильное расчленение потолка секциями (рис. 21).

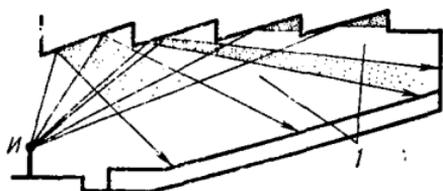


Рис. 21. Зоны, лишенные отраженного звука

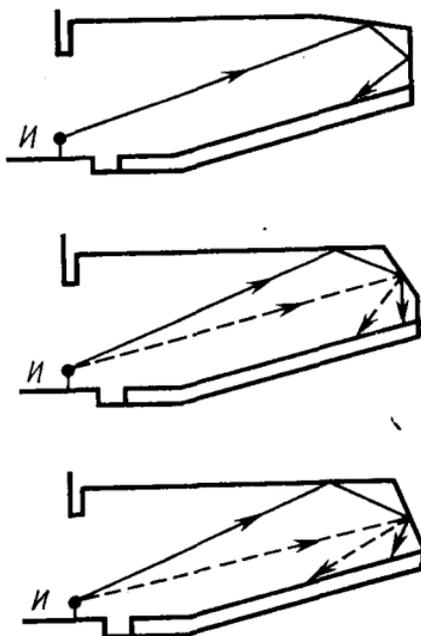


Рис. 22. Примыкание потолка к задней стене

Если потолок примыкает к задней стене под прямым углом, это может дать нежелательное сильно запаздывающее обратное отражение звука к источнику. При устройстве наклонного участка потолка (рис. 22) это отражение направляется на балкон или задние места партера с малым запаздыванием по сравнению с прямым звуком, что приводит к улучшению слышимости на этих местах. Та же цель достигается наклоном в сторону зала задней стены.

При проектировании залов желательно, чтобы отношение длины зала к его средней ширине было более 1, но не более 2. Если это отношение превышает 2 то диффуз-

пость звука в зале может значительно ухудшиться. При отношении, меньшем 1 (широкий зал малой длины), получается нежелательное запаздывание отражений от боковых стен и ухудшается слышимость на боковых местах. Отношение, близкое к 1, также неблагоприятно для акустики залов.

В тех же пределах (т. е. более 1 и не более 2) желательно и отношение средней ширины зала к его средней высоте. Длина зала (от задней стены до передней, а в залах со сценической коробкой — от задней стены до занавеса сцены) не должна превышать 30 м.

В зале должен быть обеспечен приход к зрителям правильно распределенных и достаточно ранних звуковых отражений. При большой высоте потолка первые отражения звука не поступают в партерную часть зала. Кроме того, увеличивается объем зала, который обычно должен быть в пределах 4—8 м<sup>3</sup> на одного зрителя в зависимости от назначения залов. При наличии у зала сценической коробки его объем определяется без учета объема сцены. Залы с объемом около 8 м<sup>3</sup> на одного зрителя являются уже концертными залами с большим временем реверберации и с повышенным запаздыванием звуковых отражений.

В залах вместимостью более 600 зрителей целесообразно устройство балконов. Этим достигается уменьшение объема зала, его длины и расчленение стен. Все это способствует улучшению акустических условий в залах. Отношение выноса балкона к средней высоте подбалконного пространства должно быть не более 1,5, иначе разборчивость речи и качество звучания музыки в подбалконном пространстве уменьшатся. Потолок балкона необходимо предусматривать наклонным с подъемом в сторону сцены. Наклон должен быть таким, чтобы отражения от него поступали только в заднюю часть зала. При большом угле наклона и отражении звука в среднюю часть зала время прихода отраженной звуковой энергии существенно превышает 0,05 с. Это может вызвать хорошо различимое эхо, сильно ухудшающее акустические условия на достаточно большой площади зала.

На распределение звуковой энергии первых отражений (наиболее существенных) оказывает влияние форма залов в плане. Основные рекомендации к форме залов: 1) расстояние между источником звука и слушателями в последнем ряду должно быть минимальным; 2) угол, под

которым со сцены видны крайние места в первом ряду, должен быть возможно меньше; 3) поверхности стен вблизи сцены должны способствовать отражению звука в зал; 4) форма стен не должна вызывать фокусирования звука; 5) должна быть исключена возможность образования многократного эха, особенно между параллельными стенами.

Некоторые из этих требований несовместимы, например первое и второе. Поэтому при проектировании необходимо найти наиболее целесообразное решение.

Одним из главных условий создания хороших акустических условий в залах является достаточная диффузность звукового поля. Вместе с тем требуется и надлежащая направленность ранних звуковых отражений. При акустическом проектировании залов необходимо по возможности сочетать эти несколько противоречивые условия.

Большие гладкие поверхности не способствуют достижению хорошей диффузности звукового поля. Особенно неудачны гладкие параллельные стены.

Отклонение от параллельности двух стен примерно на  $2,5-3^\circ$  или одной из них на  $5-6^\circ$  ослабляет возможность образования «порхающего эха». Для повышения диффузности желательно, чтобы большая часть внутренних поверхностей зала создавала рассеянное, ненаправленное отражение звука, что достигается расчленением поверхностей балконами, пилястрами, нишами и т. п. На поверхностях, создающих полезные малозапаздывающие отражения, членения должны быть слабыми. Целесообразно сильно расчленять поверхности, не дающие направленных ранних отражений в зал.

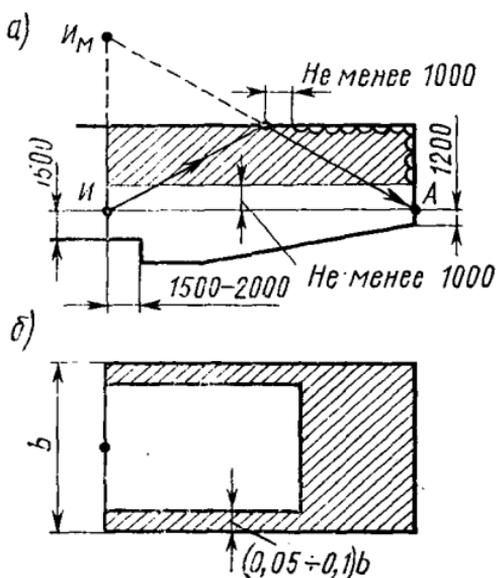


Рис. 23. Рекомендуемые зоны размещения звукопоглотителей в зале (заштрихованы):

а — на стенах; б — на потолке

Для исправления возможных акустических дефектов и достижения требуемого времени реверберации используются звукопоглощающие материалы, размещаемые на поверхностях, от которых не попадают к зрителям мало-запаздывающие первые отражения. На рис. 23 показаны участки внутренних поверхностей зала (на стенах и потолке), где возможно размещение звукопоглотителей. Для этого необходимо определить положение мнимого источника ( $I_M$ ) и провести прямую в точку  $A$ , определяющую зрителя в последнем ряду. Пересечение этой прямой с потолком определит зону полезных отражений. Поэтому возможно правее точки пересечения произвести обработку потолка звукопоглотителем\*.

Таким образом, для залов с естественной акустикой необходимо выполнение следующих основных требований: обеспечение всех зрителей достаточной звуковой энергией; создание диффузного звукового поля, исключая возможность образования таких акустических дефектов, как эхо, фокусирование звука; обеспечение оптимального времени реверберации.

Удовлетворение данных требований достигается рациональным выбором размеров и формы залов, а также характера внутренней отделки. Необходимо также отметить, что хорошие акустические условия в залах могут быть достигнуты лишь при их надлежащей изоляции от шумов, возникающих как внутри, так и вне здания. Для уменьшения шумов в самом здании необходима соответствующая планировка, предусматривающая отделение шумных помещений от зала. Полы в помещениях, расположенных рядом с залом, да и в самом зале, должны быть по возможности малозумные. Двери, ведущие в зал, должны иметь повышенную звукоизоляцию.

Общий уровень собственного шума зрителей в зале обычно не превышает в среднем 40—50 дБА. Уровень мешающих шумов должен быть не меньше чем на 10 дБ ниже. Поэтому для залов допустимыми можно считать уровни шумовых помех около 35—40 дБА. Более точные значения допустимых уровней звукового давления в октавных полосах частот указаны в [13].

Большое внимание должно быть обращено на борьбу с шумом инженерно-технического оборудования и

---

\* Более точное нахождение участков стен и потолка, пригодных для размещения звукопоглотителей, дано в [9].

особенно на уменьшение шума вентиляционных установок. Для последних допускаяемый уровень необходимо принимать на 5 дБ ниже указанного в [13]. Агрегаты приточно-вытяжной вентиляции нельзя располагать над залом. Все вибрирующее оборудование необходимо устанавливать на амортизаторы, с тем чтобы не допустить передачу и распространение вибрации по ограждающим конструкциям (см. гл. IX). Очевидно, нельзя располагать какие-либо зрелищные сооружения вблизи железнодорожных путей, открытых линий, линий мелкого заложения метрополитена, а также других интенсивных источников шума и вибрации.

### § 13. ЗАЛЫ С ЕСТЕСТВЕННОЙ АКУСТИКОЙ

**Лекционные залы.** Основным критерием оценки акустических условий лекционных залов и подобных помещений служит разборчивость речи (артикуляция, см. § 9), которая непосредственно связана с временем запаздывания первых отражений. Для хорошей разборчивости речи необходимо обеспечить приход первых отражений, запаздывающих по сравнению с прямым звуком не больше чем на 0,03 с. Так как скорость звука в воздухе равна 340 м/с, то запаздыванию на 0,03 с соответствует разность ходов отраженного и прямого звука в 10 м.

Время реверберации должно быть сравнительно невелико. Из рис. 11 видно, что рекомендуемое время реверберации для лекционных залов существенно меньше, чем для залов другого назначения.

**Пример.** Требуется определить максимально допустимые размеры лекционного зала прямоугольной формы при соотношении высоты, ширины и длины 1:2:3. Определить время реверберации и сравнить с рекомендуемым.

Построим распределение первых отражений от потолка зала, приняв высоту 10 м (рис. 24). Результаты анализа сведем в табл. 4.

При высоте потолка 10 м для точек А и Б запаздывание первых отражений составляет более 10 м, что недопустимо. Поэтому уменьшаем высоту до 7,5 м. Только в этом случае для точки А получаем допустимое значение запаздывания. Принимаем высоту потолка 7,5 м, ширину 15 м и длину зала 22,0 м (при соотношении 1:2:3). Удаление слушателя от оратора составляет около 20 м, что является предельно допустимой величиной для лекционных залов.

Аналогично можно оценить характер запаздывания первых отражений от боковых стен. Объем зала  $V=7,5 \times 15 \times 22,0=2475 \text{ м}^3$ . Необходимое время реверберации на частотах 500—2000 Гц должно быть около 1,0 с (см. рис. 11). На частоте 125 Гц рекомендуемое

время реверберации может быть допущено до значения 1,4 с ( $1,0 \times 1,4$ ).

Определим фактическое время реверберации в зале, сведя расчеты в табл. 5 и 6. Коэффициенты звукопоглощения и эквивалентная площадь звукопоглощения взяты из табл. 2 и 3 прилож. I.

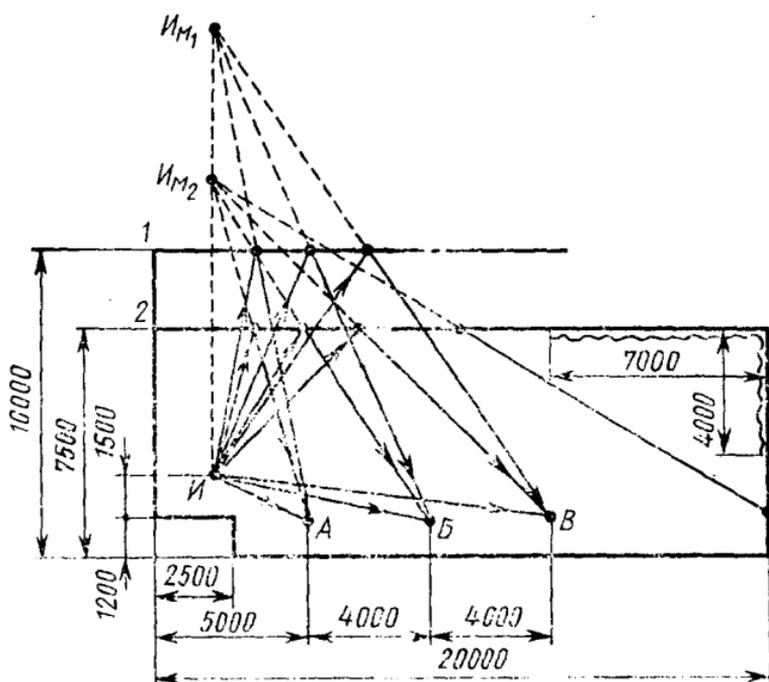


Рис. 24. Распределение первых отражений звука в аудитории

Таблица 4

Запаздывание первых отражений от потолка

Точки	Длина луча до встречи с потолком, м	Длина отраженного луча, м	Длина прямого луча, м	Запаздывание отраженного луча по сравнению с прямым, м
-------	-------------------------------------	---------------------------	-----------------------	--

При высоте зала 10 м

А	7,5	19	3,3	$16,5 - 3,3 = 13,2$
Б	8	19,6	7,2	10,4
В	8,8	10,6	11	8,4

При высоте зала 7,5 м

А	5	6,6	3,3	8,3
Б	5,7	7,6	7,2	6,1
В	6,8	8,8	11	4,6

Таблица 5

Определение эквивалентной площади  
звукопоглощения поверхностей зала

Поверхности, материалы	Пло- щадь, м <sup>2</sup>	Значения $\alpha$ и $\alpha S$ , м <sup>2</sup> , на частотах, Гц					
		125		500		2000	
		$\alpha$	$\alpha S$	$\alpha$	$\alpha S$	$\alpha$	$\alpha S$
1	2	3	4	5	6	7	8
Потолок — бетон окрашенный	330	0,01	3,3	0,01	3,3	0,02	6,6
Стены с отметки 2 м — штукатурка по кирпичу	350	0,01	3,5	0,02	7	0,03	7,5
Стены до отмет- ки 2 м — деревян- ная панель толщи- ной 5—10 мм с воздушным про- межутком 50 мм	148	0,25	37	0,06	8,9	0,04	5,9
Пол — паркет по асфальту	300	0,04	12	0,07	21	0,06	18
Деревянная эстрада	45	0,1	4,5	0,1	4,5	0,08	3,6
Остекление	50	0,35	17,5	0,18	9	0,07	3,5
Добавочное звукопоглощение	1200	0,06	72	0,04	48	0,04	48

Таблица 6

Определение эквивалентной площади звукопоглощения

Слушатели, кресла	Число л	Значения $A$ , м <sup>2</sup> , и $A_l$ , м <sup>2</sup> , на частотах, Гц					
		125		500		2000	
		$A$	$A_l$	$A$	$A_l$	$A$	$A_l$
Сидящие слу- шатели (70% за- полнения)	154 чел.	0,2	30,8	0,3	46,2	0,35	53,9
Свободные стулья (деревянные жесткие)	66 шт.	0,02	13,2	0,03	19,8	0,04	26,4

При удельной площади 1,5 м<sup>2</sup>/чел, в зале разместится 220 слушателей. При определении звукопоглощения полом взята вся его площадь (а не площадь, свободная от столов, стульев, сидящих людей); большее звукопоглощение компенсируется неучтенным поглощением звука столами. Приняты также несколько меньшие коэффициенты добавочного звукопоглощения.

Общая эквивалентная площадь звукопоглощения равна (см. табл. 5 и 6) на частотах:

$$125 \text{ Гц} — A_{\text{общ}} = 3,3 + 3,5 + 37 + 12 + 4,5 + 17,5 + 72 + 30,8 + 13,2 = 194 \text{ м}^2; 500 \text{ Гц} — A_{\text{общ}} = 168 \text{ м}^2; 2000 \text{ Гц} — A_{\text{общ}} = 173 \text{ м}^2.$$

Определим средний коэффициент звукопоглощения по формуле  $\alpha_{\text{ср}} = A_{\text{общ}}/S_{\text{общ}}$  на частотах:  $125 \text{ Гц} — \alpha_{\text{ср}} = 194/1200 \approx 0,16$ ;  $500 \text{ Гц} — \alpha_{\text{ср}} = 168/1200 \approx 0,14$ ;  $2000 \text{ Гц} — \alpha_{\text{ср}} = 173/1200 \approx 0,14$ .

Так как  $\alpha_{\text{ср}} < 0,2$ , время реверберации определяем по формуле (58) на частотах:

$$125 \text{ Гц} — T = 0,163 V/A_{\text{общ}} = 0,163 (2475/194) \approx 2,1 \text{ с}; 500 \text{ Гц} — T = 0,163 (2475/168) \approx 2,4 \text{ с}; 2000 \text{ Гц} — T = 0,163 (2475/173) \approx 2,35 \text{ с}.$$

Фактическое время реверберации выше рекомендуемого, поэтому необходимо увеличить звукопоглощение в зале.

Зная  $T_{\text{тр}}$ , определяем  $\varphi(\alpha_{\text{ср}}^{\text{тр}})$  по формуле  $\varphi(\alpha_{\text{ср}}^{\text{тр}}) = \frac{0,163V}{T_{\text{тр}}S_{\text{общ}}}$ , а затем  $\alpha_{\text{ср}}^{\text{тр}}$ .

$$\text{Для частоты } 125 \text{ Гц } \varphi(\alpha_{\text{ср}}^{\text{тр}}) = \frac{0,163 \cdot 2475}{1,40 \cdot 1200} = 0,23.$$

Из табл. 4 прилож. I по  $\varphi(\alpha_{\text{ср}}^{\text{тр}})$  находим  $\alpha_{\text{ср}}^{\text{тр}}$ , равное 0,25. На

$$\text{частотах } 500 \text{ и } 2000 \text{ Гц } \varphi(\alpha_{\text{ср}}^{\text{тр}}) = \frac{0,163 \cdot 2475}{1,0 \cdot 1200} \approx 0,34; \alpha_{\text{ср}}^{\text{тр}} = 0,29.$$

Находим  $A_{\text{общ}} = \alpha_{\text{ср}}^{\text{тр}} S_{\text{общ}}$ : на частоте 125 Гц  $A_{\text{общ}}^{\text{тр}} = 0,25 \cdot 1200 = 300 \text{ м}^2$ ; на частотах 500 и 2000 Гц  $A_{\text{общ}}^{\text{тр}} = 0,29 \cdot 1200 = 348 \text{ м}^2$ .

Определяем, на сколько требуется изменить общую эквивалентную площадь звукопоглощения ( $A_{\text{общ}} - A_{\text{общ}}^{\text{тр}}$ ) на частотах:  $125 \text{ Гц} — 300 - 194 = 106 \text{ м}^2$ ;  $500 \text{ Гц} — 348 - 168 = 180 \text{ м}^2$ ;  $2000 \text{ Гц} — 348 - 173 = 175 \text{ м}^2$ .

Если в соответствии с рис. 23 определить рекомендуемые зоны размещения звукопоглотителей, то окажется, что на боковых и задней стенах возможная площадь составит  $4 \times 20 \times 2 + 4 \times 7,5 = 190 \text{ м}^2$ , а на потолке —  $1 \times 20 \times 2 + 2(15 - 2) \times 7 = 131 \text{ м}^2$  (при ширине полос на потолке вдоль стен по 1 м); общая площадь  $190 + 131 = 321 \text{ м}^2$ . Если разделить ( $A_{\text{общ}}^{\text{тр}} - A_{\text{общ}}$ ) на данную площадь, получим требуемый коэффициент звукопоглощения облицованной поверхности. На частотах 500 и 2000 Гц он составит около 0,6. Таким образом, для уменьшения времени реверберации требуется большая площадь эффективного звукопоглотителя.

Необходимо отметить, что значительные трудности с уменьшением времени реверберации происходят из-за чрезмерно большого объема залов. В нашем случае удельный объем составляет  $2475/220 = 11,2 \text{ м}^3/\text{чел}$ . Такой объем недопустимо высок для залов, предназначенных для речи. Удельный объем должен быть в пределах 4—5  $\text{м}^3$  на одного человека. Поэтому желательно уменьшение высоты зала, что не только сократит время реверберации, но и улучшит распределение ранних отражений по залу. Желательно также некоторое уменьшение удельной площади, что повысит количество слушателей и, следовательно, увеличит звукопоглощение, вносимое людьми.

В табл. 7 приведены данные о некоторых больших лекционных и конференц-залах.

## Характеристика залов

Зал	Вместимость, чел.	Объем, м <sup>3</sup>	Удельный объем, м <sup>3</sup> /чел.	Максимальное удаление от эстрады, м
Аудитория в МГУ	209	1048	5	14
Лекционный зал Дворца культуры и науки в Варшаве	400	1800	4,5	17,5
Большая аудитория в МГУ	520	3144	6	24
Конференц-зал высотного дома на Смоленской площади в Москве	520	5000	9,5	20

Ввиду большого удельного объема конференц-зала высотного дома на Смоленской площади (9,5 м<sup>3</sup>/чел.) акустические условия в зале неудовлетворительны. В большой аудитории в МГУ удельный объем также несколько завышен. Из-за большой высоты потолка (около 10 м) в середине партера разборчивость речи неудовлетворительна. Несмотря на то что стены покрыты звукопоглощающими пемзолитовыми плитами, время реверберации завышено (на частоте 500 Гц при 60% заполнении зала — 2,3 с, а на частоте 2000 Гц — 1,9 с). Улучшение акустических условий могло бы быть достигнуто уменьшением высоты (уменьшение объема, времени реверберации и запаздывания ранних отражений).

В больших аудиториях и конференц-залах места для слушателей целесообразно располагать в виде амфитеатра, что не только улучшает видимость и сокращает расстояние от эстрады до наиболее удаленного места, но и существенно улучшает разборчивость речи. При неудачной форме зала (например, высокий потолок) улучшение акустических условий может быть достигнуто устройством специальных отражателей звука, располагаемых над эстрадой или на участках боковых стен, примыкающих к эстраде (рис. 25). Такие отражатели направляют звуковую энергию как к местам, расположенным вблизи от эстрады, так и во вторую половину зала. Отражатели, естественно, должны быть выполнены из материалов с низким коэффициентом звукопоглощения. Высота и рас-

положение отражателя легко определяются из условия: если расстояние от источника до точки А превышает 8—10 м, то для хорошей разборчивости речи необходимо обеспечить приход в эту точку первых отражений, запаздывающих по сравнению с прямым звуком не более чем на 0,03 с. Таким образом, задавшись формой отражателя и высотой его расположения над эстрадой, проверяется разность ходов отраженного и прямого звука для различных точек зала и особенно для мест, расположенных на расстоянии до 10 м от источника. При большем расстоянии запаздывание уменьшается.

При определении размеров отражателя необходимо помнить, что он будет хорошо отражать звук с длиной волны меньше минимального размера отражателя примерно в 1,5 раза.

**Пример.** Требуется определить размер отражателя при наименьшей частоте звука  $f=100$  Гц. Длина волны  $\lambda=c/f=340/100=3,4$  м. Размер отражателя должен быть  $\sim 5,0$  м.

**Залы драматических театров.** В залах драматических театров (так же как и в лекционных залах) должна быть обеспечена прежде всего четкость и разборчивость речи. Для этого требуется наличие интенсивного прямого звука, мало запаздывающих отражений, диффузного звукового поля и оптимального времени реверберации.

Отметим некоторые особенности залов драматических театров. В залах с криволинейными очертаниями плана звуковая энергия, отраженная от боковых поверхностей, может распределяться вдоль стен по периметру зала; отражения от задней стены концентрируются примерно в последней трети зала. Все это может привести к ухудшению слышимости в партере из-за отсутствия первых отражений. В залах овальной формы при наличии ярусов акустические условия в целом благоприятны из-за хоро-

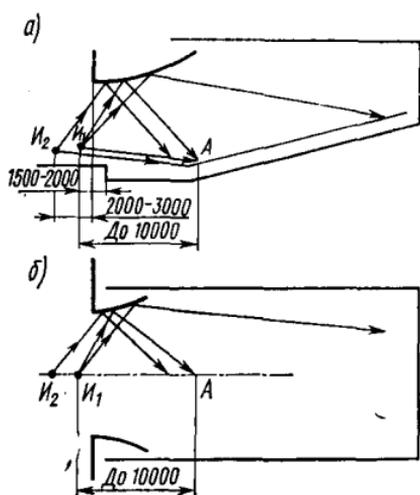


Рис. 25. Устройство отражателей звука над эстрадой (а) и у эстрады на боковых стенах (б)

шего рассеивания звука. Современные залы овальной формы не являются многоярусными и меньше подходят в качестве залов драматических театров. В залах с секторной формой плана распределение первых отражений зависит от угла раскрытия боковых стен. Чем больше этот угол, тем меньше отражений направляется в среднюю часть зала. При угле раскрытия, равном горизонтальному углу видимости ( $22^{\circ}30'$ ), первые отражения вообще не поступают в среднюю треть по длине зала. При угле до  $10^{\circ}$  каждая боковая стена обеспечивает первыми отражениями половину зала, разделенного диагональю. Лишь на небольшой площади в передней части зала первые отражения отсутствуют.

Равномерное распределение звуковой энергии боковыми стенами происходит в залах с параллельными стенами. Однако при ширине зала более 20 м первые отражения в переднюю половину зала приходят с большим временем запаздывания — более 0,05 с, что резко снижает разборчивость речи. Кроме того, в таких залах возможно образование «порхающего эха». Наиболее подходящей формой плана залов драматических театров может быть секторная с небольшим углом раскрытия стен (до  $10^{\circ}$ ). Большое значение имеет и форма задней стены (см. § 12). Криволинейная форма при расположении центра кривизны в пределах зала может вызвать нежелательную концентрацию звука и создать эхо.

Ширину зала рекомендуется принимать не более 20 м (ширина вблизи сцены). Ширина портала сцены чаще всего меньше ширины передней стены. Размеры простенков не должны быть большими, иначе при расположении актера в глубине сцены в переднюю часть зала не будут приходить первые отражения от боковых стен.

Очень большое влияние на акустические качества залов оказывает выбор высоты потолка. При большой высоте первые отражения звуковой энергии могут не поступить в партерную часть зрительного зала. Кроме того, увеличивается объем зала, который для драматических театров должен определяться из условия удельного объема 4—4,5 м<sup>3</sup> на одного зрителя. Поэтому высота потолка обычно не должна превышать 10 м, что обеспечивает приход отраженных звуковых волн по всей площади зала за время, меньшее 0,05 с. В последнее время над порталом часто делают наклонный козырек, что при секционном потолке (см. рис. 20) позволяет устранить указанный

недостаток высокого потолка — отсутствие первых отражений.

На рис. 26 показано отражение звука от высокого потолка зала (12 м) при расположении актера на авансцене и в глубине сцены. В первом случае отражение от потолка запаздывает по сравнению с прямым звуком на 0,05 с. Такое запаздывание велико и для его снижения необходимо уменьшить высоту зала. Когда актер переходит в глубь сцены, портал сцены заслоняет путь прямого звука на часть потолка. Первые отражения с допустимым запаздыванием (0,02—0,03 с) приходят лишь в среднюю часть зала.

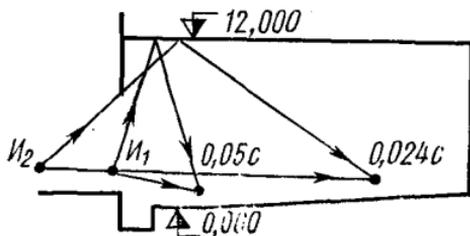


Рис. 26. Отражение звука от потолка зала при расположении актера на авансцене  $I_1$  и в глубине сцены  $I_2$

В табл. 8 приведены данные о некоторых залах драматических театров.

Таблица 8

### Характеристика залов

Московские театры	Вместимость, чел.	Объем, м <sup>3</sup>	Удельный объем, м <sup>3</sup> /чел.	Наибольшее удаление от сцены по оси, м	Отношение ширины портала сцены к ширине зала	Отношение площади зала к площади игровой части сцены
1	2	3	4	5	6	7
Центральный театр Советской Армии	1500	17 900	11,9	32	0,5	1,7
Художественный академический театр (проезд Художественного театра)	1160	4 800	4,2	23	0,85	3
Театр им. Вахтангова	1050	4 600	4	26	0,85	3
Театр им. Пушкина	950	4 400	4,6	—	—	—

Из данных залов хорошей акустикой отличается зал театра им. Вахтангова; удовлетворительные акустические качества в залах МХАТа и театра им. Пушкина и неудовлетворительные — в ЦТСА. При проектировании

зала ЦТСА допущены ошибки\*. Форма плана зала секторная; угол раскрытия боковых стен составляет  $18^\circ$  (рис. 27). При таком угле первые отражения от боковых стен не поступают в среднюю часть зала. Отношение ширины портала сцены к ширине зала составляет 0,5, что

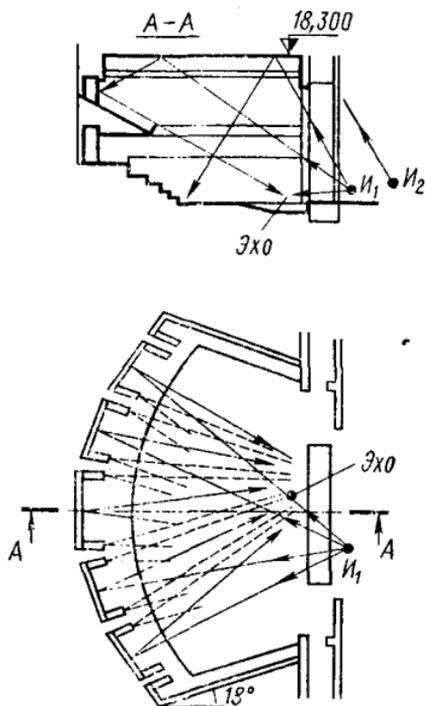


Рис. 27. Зал Центрального театра Советской Армии

исключает приход первых отражений от стен в партер при уходе актера с авансцены. Наибольшая ширина зала (до 40 м) превосходит длину зала, что ухудшает разборчивость речи на боковых местах. Задняя стена и балкон фокусируют отраженные звуковые волны, создавая отчетливое эхо в передних рядах (наиболее ценных) (рис. 27). В эти же места приходят и вторые отражения с большим временем запаздывания — 0,125—0,145 с. Высота потолка значительно превышает допустимую (18,3 м вместо 10—11 м); это вызвало завышение удельного объема (11,9 м<sup>3</sup>/чел. вместо 4—4,5 м<sup>3</sup>/чел) и времени реверберации. При высоком потолке первые отражения не поступают в партер и частично в амфитеатр.

Неудачна верхняя часть стены над оркестром, так как исключается возможность отражения звука передней частью потолка при движении актера в глубь сцены  $I_2$  (рис. 27). Неправильно выбрано отношение глубины балкона к его высоте (2,6 вместо 1,5), что привело к плохой слышимости под балконом.

Таким образом, неудачно запроектированная форма зала и его объем привели к неудовлетворительным акустическим условиям практически на всех местах. Так, в цен-

\* Макриненко Л. И., Смирнова Т. И. Мероприятия по улучшению акустики Большого зала ЦТСА. — Сценическая техника и технология, 1974, № 1; Репина Е. В. Причины акустических недостатков театральных залов. — Архитектура СССР, 1959, № 2.

тральной части зала первые отражения приходят с запаздыванием по отношению к прямому звуку не ранее, чем через 0,06 с. В результате разборчивость речи низкая, что вызывает повышение уровня шума в зрительном зале во время спектакля. В заполненном зале время реверберации на низких частотах составляет 1,8—1,9 с, а в области средних частот—1,5—1,6 с, что превышает рекомендуемые значения (см. рис. 11).

Научно-исследовательский институт строительной физики Госстроя СССР разработал мероприятия по улучшению акустики данного зала. Предусматривается устройство звукоотражающих поверхностей над авансценой и по ее бокам (новый портал) с целью обеспечения партера интенсивными мало запаздывающими отражениями; некоторое изменение конфигурации и отделки задней стены для ликвидации эха в первых рядах партера, а также для улучшения разборчивости на балконе и подним; увеличение звукопоглощения в зале с целью уменьшения времени реверберации.

Основные рекомендуемые характеристики залов: длина 26—30 м (с балконом); высота до 10 м; отношение длины зала к его средней ширине от 1 до 2; удельный объем 4—5 м<sup>3</sup>/чел.

**Пример.** Требуется разработать акустический проект зала драматического театра на 1000 мест.

Схема плана и продольного разреза зала показана на рис. 28. Объем зала (без сцены)  $V=5300$  м<sup>3</sup>; удельный объем 5,3 м<sup>3</sup>/чел; удельная площадь 0,7 м<sup>2</sup>/чел; длина зала от задней стены до занавеса 28 м; ширина и высота в центральной части равны 22,0 и 10,0 м. Общая площадь внутренних поверхностей  $S_{общ}=2250$  м<sup>2</sup>.

Форма зала выбрана исходя из следующих требований: 1) обеспечить основные места в партере достаточно интенсивным прямым звуком и мало запаздывающими отражениями. Для театральных залов необходимо, чтобы на расстоянии около 8 м от источника звука на сцене разность хода отраженного и прямого звуков составляла от 7 до 10 м, что соответствует времени 0,02 и 0,03 с; 2) получить возможно большую диффузность звукового поля.

Пол зала предусматривается с подъемом, обеспечивающим меньшие потери звука за счет экранирования впереди сидящими зрителями. Над порталом участок потолка сделан наклонным для равномерного распределения первых отражений. Для этих же целей ширина начальной части зала сужается до ширины портала. Форма потолка и боковых стен выбрана таким образом, чтобы в переднюю часть зала поступали первые отражения даже при перемещении источника звука из точки  $I_1$  в точку  $I_2$ . Если бы эти поверхности были плоскими, то первые отражения могли бы поступить лишь во вторую половину зала.

На плане и разрезе зала показаны прямые и отраженные звуковые лучи и разница (в м) их прихода для нескольких точек. На расстоянии 8 м от источника разница находится в допустимом интервале 9 и 9,4 м. На больших расстояниях от источника звука эта разница уменьшается и составляет в среднем около 6—7 м.

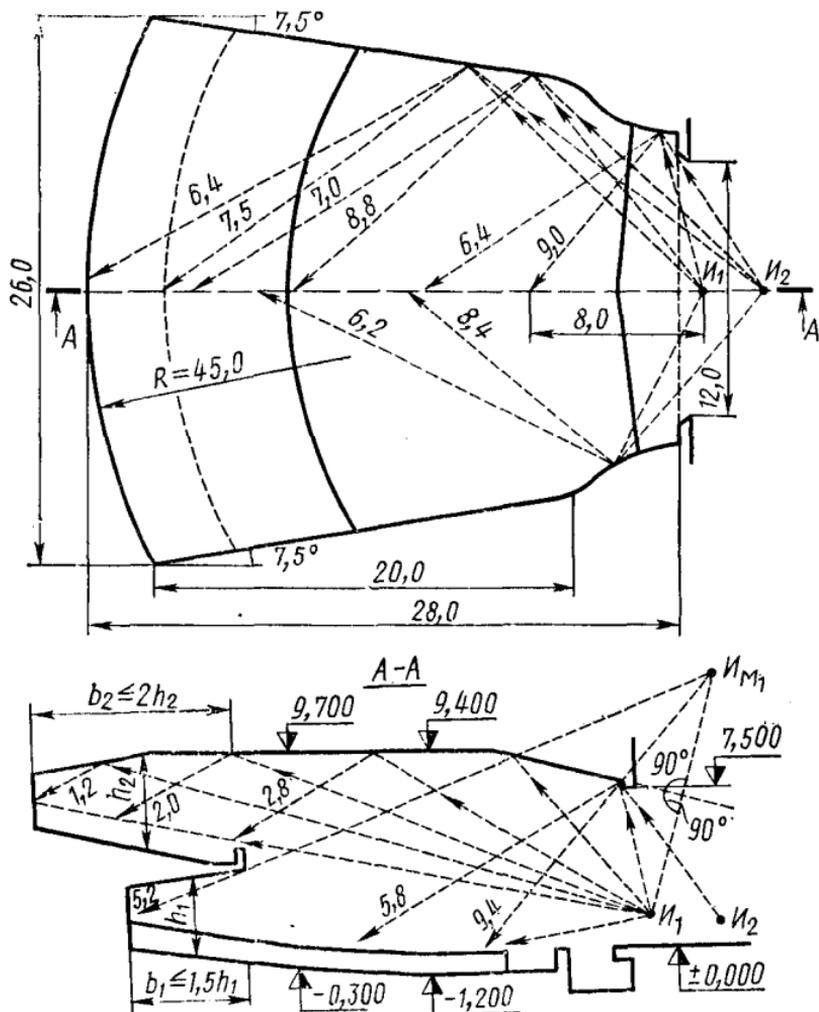


Рис. 28. Зал драматического театра на 1000 мест с построением звуковых отражений (размеры даны в метрах)

На разрезе показан скос потолка над балконом; он необходим для отражения звука к последним рядам мест на балконе. Кроме того, уменьшается опасность неблагоприятного отражения от угла между потолком и задней стеной на авансцену. Для повышения диффузности звукового поля и ослабления возможного порхающего эха боковые стены предусматриваются непараллельными; угол составляет  $7,5^\circ$ . Предусмотрены также балкон и полукруглая форма задней стены. При большом радиусе кривизны ( $R=45$  м) эта по-

верхность не будет фокусировать звук в партере. Кроме того, в плоскости задней стены находится балкон с большим количеством зрителей, имеющих значительное звукопоглощение, что приведет к рассеиванию звука, а не его концентрации.

Необходимое время реверберации на частотах 500—2000 Гц должно составить 1,25 с (см. рис. 11). Определим фактическое время реверберации в зале, сведя расчеты эквивалентной площади звукопоглощения в табл. 9 и 10.

Таблица 9

Определение эквивалентной площади звукопоглощения

Поверхности, материалы	Площадь, м <sup>2</sup>	Эквивалентная площадь звукопоглощения, м <sup>2</sup> , на частотах, Гц					
		125		500		2000	
		$\alpha$	$\alpha S$	$\alpha$	$\alpha S$	$\alpha$	$\alpha S$
Потолок (штукатурка по металлической сетке)	600	0,02	12	0,06	36	0,05	30
Стены (штукатурка по кирпичу)	860	0,01	8,6	0,02	17,2	0,03	25,8
Пол, не занятый зрителями (паркет на асфальте)	210	0,04	8,4	0,07	14,7	0,06	12,6
Проем сцены	90	0,2	18,0	0,3	27,0	0,3	27,0
Внутренние поверхности оркестровой ямы (дерево)	100	0,1	10	0,1	10	0,1	10
Добавочное звукопоглощение	2250	0,06	135	0,03	67,5	0,03	67,5

Таблица 10

Определение эквивалентной площади звукопоглощения

Зрители, кресла	Число $n$	Значение $A$ и эквивалентной площади звукопоглощения $A_n$ , м <sup>2</sup> , на частотах, Гц					
		125		500		2000	
		$A$	$A_n$	$A$	$A_n$	$A$	$A_n$
Сидящие зрители (70% заполнения)	700 чел.	0,25	175	0,4	280	0,45	315
Свободные кресла (полумягкие с тканевой обивкой)	300 шт.	0,08	24	0,15	45	0,20	60

Коэффициенты звукопоглощения взяты из табл. 2 и 3 прилож. I. Коэффициенты добавочного звукопоглощения несколько уменьшены по сравнению со значениями, приведенными в § 8.

Для основных ограждающих поверхностей предварительно выбираем штукатурку по кирпичу и сетке; для пола — паркет на асфальте. Зал обору́дуются полумягкими креслами с тканевой обивкой. Расчет производим для 70% заполнения зала зрителями.

Общая эквивалентная площадь звукопоглощения равна на частотах: 125 Гц —  $A_{общ} = 12 + 8,6 + 8,4 + 18 + 10 + 135 + 175 + 24 = 391 \text{ м}^2$ ; 500 Гц —  $A_{общ} = 498 \text{ м}^2$ ; 2000 Гц —  $A_{общ} = 523 \text{ м}^2$ .

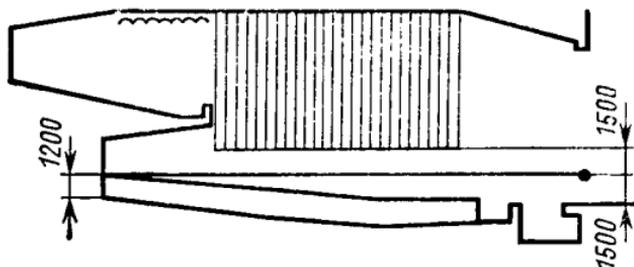


Рис. 29. Размещение звукопоглотителей в зале драматического театра на 1000 мест

Определим средний коэффициент звукопоглощения по формуле  $\alpha_{ср} = A_{общ}/S_{общ}$  на частотах: 125 Гц —  $\alpha_{ср} = 391/2250 = 0,174$ ; 500 Гц —  $\alpha_{ср} = 498/2250 = 0,221$ ; 2000 Гц —  $\alpha_{ср} = 523/2250 = 0,232$ .

По табл. 4 прилож. I находим  $\varphi(\alpha_{ср})$  на частотах: 125 Гц —  $\varphi(\alpha_{ср}) = 0,19$ ; 500 Гц —  $\varphi(\alpha_{ср}) = 0,25$ ; 2000 Гц —  $\varphi(\alpha_{ср}) = 0,26$ .

Определим время реверберации  $T$  по формуле (58) на частотах:

$$125 \text{ Гц} - T = 0,163 \frac{5300}{2250 \cdot 0,19} \approx 2,0 \text{ с}; \quad 500 \text{ Гц} - T = 0,163 \times$$

$$\times \frac{5300}{2250 \cdot 0,25} \approx 1,55 \text{ с}; \quad 2000 \text{ Гц} - T = 0,163 \frac{5300}{2250 \cdot 0,26} \approx 1,50 \text{ с}.$$

Время реверберации несколько превышает рекомендуемое, при условии, что на частоте 125 Гц возможно увеличить  $T_{р}$  на 40%.

На рис. 29 показано возможное размещение звукопоглотителей на стенах и потолке (в соответствии с рис. 23, 28). Примем в качестве звукопоглотителя для стен деревянные панели (5—10 мм) с воздушным промежутком около 50 мм. Коэффициенты звукопоглощения на рассчитываемых частотах равны 0,25, 0,06 и 0,04. Площадь панелей на стенах составляет  $180 \text{ м}^2$ , часть потолка площадью  $80 \text{ м}^2$  облицовываем акустическими плитами «Акмигран» на отnose. Коэффициенты звукопоглощения этих плит составляют 0,25; 0,75 и 0,80.

Определяем добавляемую эквивалентную площадь звукопоглощения на частотах: 125 Гц  $(0,25 - 0,01) 180 + (0,25 - 0,02) \cdot 80 = 62 \text{ м}^2$ . В скобках показана разность коэффициента звукопоглощения деревянных панелей и плит «Акмигран» и ранее учтенного коэффициента звукопоглощения стен и потолка:

$$500 \text{ Гц} (0,06 - 0,02) 180 + (0,75 - 0,06) 80 = 62 \text{ м}^2; \quad 2000 \text{ Гц} (0,04 - 0,03) 180 + (0,80 - 0,06) 80 \approx 66 \text{ м}^2.$$

Общая эквивалентная площадь звукопоглощения составит на частотах: 125 Гц —  $A_{\text{общ}} = 391 + 62 = 453 \text{ м}^2$ ; 500 Гц —  $A_{\text{общ}} = 498 + 62 = 560 \text{ м}^2$ ; 2000 Гц —  $A_{\text{общ}} = 523 + 66 = 589 \text{ м}^2$ .

Значения  $\alpha_{\text{ср}}$  на рассчитываемых частотах равны 0,20; 0,25; 0,26, а  $\varphi(\alpha_{\text{ср}}) = 0,22; 0,29; 0,30$ .

Время реверберации равно на частотах:

$$125 \text{ Гц} - T = 0,163 \frac{5300}{2250 \cdot 0,22} \approx 1,75 \text{ с}; \quad 500 \text{ Гц} - T = 0,163 \frac{5300}{2250 \cdot 0,29} \approx 1,30 \text{ с}; \quad 2000 \text{ Гц} - T = 0,163 \frac{5300}{2250 \cdot 0,30} \approx 1,30 \text{ с}.$$

Расчетные значения времени реверберации вполне удовлетворительны, так как отклоняются от рекомендуемых менее чем на 10%.

**Залы театров оперы и балета.** Общие принципы акустического проектирования залов театров оперы и балета остаются в основном те же, что и залов драматических театров, однако еще большее значение приобретает необходимость получения диффузного звукового поля. Время реверберации в этих залах должно быть больше по сравнению с залами, предназначенными для речевых передач (время реверберации принимается примерно на 20—25% больше, чем в драматических театрах (см. рис. 11).

Характерной формой многих залов театров оперы и балета является овальная. Для обеспечения минимального удаления последнего ряда от сцены (при наибольшем заполнении) потребовалась многоярусная система. Например, Большой театр в Москве при количестве мест более 2000 имеет 6 балконов, театр оперы в Одессе имеет пять балконов и вмещает 1700 зрителей и т. д. Все балконы имеют небольшую глубину (до 3 м), что облегчает распространение и прямых и отраженных звуковых волн до последних рядов на балконах. Балконы со зрителями имеют большое звукопоглощение, поэтому интенсивность отраженных звуковых волн невелика и их фокусирование овальной задней стеной неопасно, тем более что центр кривизны располагается за сценой. В то же время балконы, расчлняя общую поверхность стен, способствуют рассеиванию звуковой энергии, т. е. созданию более диффузного звукового поля.

В табл. 11 приведены характеристики некоторых залов театров оперы и балета.

Каковы причины плохих акустических качеств двух последних залов? Если в одном случае удельный объем завышен (10 м<sup>3</sup>/чел.), то в другом — занижен (5 м<sup>3</sup>/чел.).

## Характеристики залов

Театры	Вместимость, чел.	Объем, м <sup>3</sup>	Удельный объем, м <sup>3</sup> /чел	Наибольшее удаление от сцены (по оси), м	Акустика залов (по отзывам)
Большой театр в Москве	2300	13 800	6	24	Акустика в целом хорошая, несколько сухое звучание музыки
Театр оперы и балета в Минске	1145	11 410	10	25	Акустика плохая, звуки гулкие, музыка и речь неразборчивые
Театр оперы и балета в Волгограде	1100	5 440	5	22	Акустика плохая, музыка звучит глухо, в партере плохая слышимость

Для залов театров оперы и балета он должен составлять примерно 6—8 м<sup>3</sup>/чел.

Форма зала театра в Минске полукруглая, и первые отражения от боковых стен в зал не поступают; задняя стена фокусирует отраженные звуковые волны, создавая эхо в партере. Горизонтальный потолок высотой 16,4 м не распределяет необходимым образом первые отражения. Такой же высокий потолок и в зале театра в Волгограде — 14 м. Удельный объем занижен, что уменьшило время реверберации и привело к глухому звучанию музыки. Неправильно выбрано отношение глубины балкона к его высоте (2,2), что ухудшило слышимость под балконом.

Приведем некоторые рекомендуемые характеристики залов: время реверберации должно быть выбрано в соответствии с рис. 11, высота — в пределах 10 м; длина — до 30 м; удельный объем — 6—8 м<sup>3</sup>/чел. Для залов, предназначенных для исполнения различных музыкальных программ, запаздывание первых отражений можно

принять до 0,05 с. Однако следует помнить, что запаздывание первых отражений более чем на 0,05 с создает условия для образования эха.

**Концертные залы.** Концертные залы (табл. 12) отличаются от залов театра оперы и балета прежде всего наличием эстрады вместо сцены, что позволяет расположить хорошо отражающие звук поверхности рядом с эстрадой.

Таблица 12

Характеристика концертных залов

Залы	Вместимость, чел.	Объем, м <sup>3</sup>	Удельный объем, м <sup>3</sup> /чел
Концертный зал в Лондоне	3445	23 000	6,6
Большой зал Московской консерватории	2150	17 000	7,9
Колонный зал Дома Союзов в Москве	1600	12 500	7,8
Концертный зал им. Чайковского в Москве	1560	17 570	11

Минимальные размеры, при которых симфонический оркестр звучит достаточно хорошо, составляют: высота 9 м, ширина 16 м, длина около 30 м (при размерах эстрады: глубина 10 м, ширина 16 м). Следовательно, минимальный объем концертного зала составляет около 5000 м<sup>3</sup>. В таких залах может быть размещено до 400—600 мест в партере, а при наличии балкона — до 600—750 мест. Максимальные размеры концертных залов могут быть значительно большими, чем для залов театров оперы и балета и драматических театров. Все же наибольшая удаленность зрителя от эстрады не должна превышать 45—50 м, а в партере — 40 м.

Характерная форма концертного зала показана на рис. 20. Форма потолка (при большем или меньшем членении) обеспечивает весьма равномерное распределение первых отражений вдоль зала. В лучших концертных залах мира запаздывание первого отражения по отношению к прямому звуку составляет: в Большом зале Московской консерватории — 0,021 — 0,026 с, а в Малом зале — 0,018 — 0,024 с; в Большом зале в Штутгарте — 0,029 с; в Каракасе — 0,03 с и т. п.

Время реверберации в концертных залах больше, чем для любых других залов (верхняя граница полосы  $\beta$  на рис. 11). Однако не всегда время реверберации полностью определяет акустические свойства залов. Например, в Малом зале Московской консерватории акустические свойства прекрасны, а время реверберации составляет 2 с, в то время, как видно из рис. 11, для объема 2550 м<sup>3</sup> время реверберации должно быть около 1,35 с. По-видимому, решающим фактором здесь является структура ранних отражений.

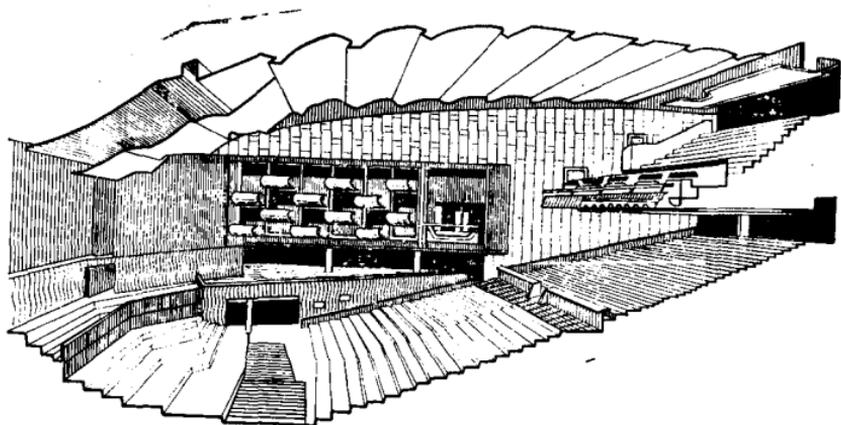


Рис. 30. Концертный зал в Лондоне

Концертный зал в Лондоне «Роял фестивал холл» (рис. 30) имеет размеры: длина 52 м, ширина 24—30 м, высота 10—12 м. В качестве основного элемента членения стен выбрана небольшая, выступающая в зал ложа. Чередование 12 таких лож на передней части боковых стен создает условия для хорошего рассеивания звуковой энергии. Звукоотражающие экраны на потолке также способствуют созданию диффузного звукового поля. Пол балкона и партера имеет большой уклон, что обеспечивает не только хорошую видимость, но и слышимость. Время реверберации в зале при его 70%-ном заполнении составляет 1,6 с, а в пустом зале — около 1,9 с на средних частотах. Для получения такого сравнительно небольшого значения времени реверберации при большом объеме в зале потребовалось дополнительное звукопоглощение. Для отделки боковых стен использованы деревянные панели, хорошо поглощающие звук на

низких частотах. Задняя стена зала отделана искусственной кожей, за которой расположен пористый звукопоглотитель. Зал оборудован мягкой мебелью; на полу настланы ковры. В результате время реверберации на низких частотах оказалось заниженным и потребовалась установка электроакустической системы.

В Большом зале Московской консерватории время реверберации для пустого зала на частоте 500 Гц составляет 2,2 с. Акустические качества зала вполне удовлетворительны, особенно для звучания органной и симфонической музыки.

При большой ширине в залах старого типа обычно предусматривали ярусы, колоннады, сильно расчлененные поверхности стен, что способствовало созданию диффузного звукового поля. Так, например, очень хорошие акустические свойства в Колонном зале Дома Союзов в Москве и в зале Ленинградской филармонии во многом определяются наличием большого количества колонн, расположенных по периметру зала.

Современные решения концертных залов большой вместимости характерны наличием больших нерасчлененных поверхностей. В качестве интересного примера, где осуществлено новое архитектурно-акустическое решение, можно рассмотреть большой зал комплекса «Лидер-Халле» в Штутгарте. В зале (рис. 31) сохранено преимущество кругового размещения зрителей, но вместе с тем нарушена симметрия путем преобразования левой по отношению к зрителям боковой поверхности из вогнутой в выпуклую. Это сделано для того, чтобы выпуклая часть бетонной стены равномерно рассеивала звуковую энергию и особенно звуки левой части оркестра, где располагается группа первых скрипок. Левая сторона зала развита больше правой; левая сторона балкона также шире правой и, полого спускаясь в зал, вмещает большее число слушателей.

Для устранения опасности фокусирования звуковой энергии и для лучшего рассеивания отраженного звука вся вогнутая поверхность стен расчленена уступами. Шаг уступов 3—4 м, глубина от 0,5 до 1,0 м, что обеспечивает диффузное отражение звука вплоть до частот порядка 100 Гц. Поверхность потолка расчленена выступами подковообразной формы. Глубина сцены может быть уменьшена с 14 до 10 м путем опускания деревянной решетки, за которой располагается ступенчатая три-

буна хористов. Мягкие подушки на этих местах и звукопоглощающая задняя стена сцены сделаны для того, чтобы не было нежелательного усиления группы медных и ударных инструментов.

Над эстрадой расположено три ряда отражателей. Отражатели первого ряда направляют отраженные зву-

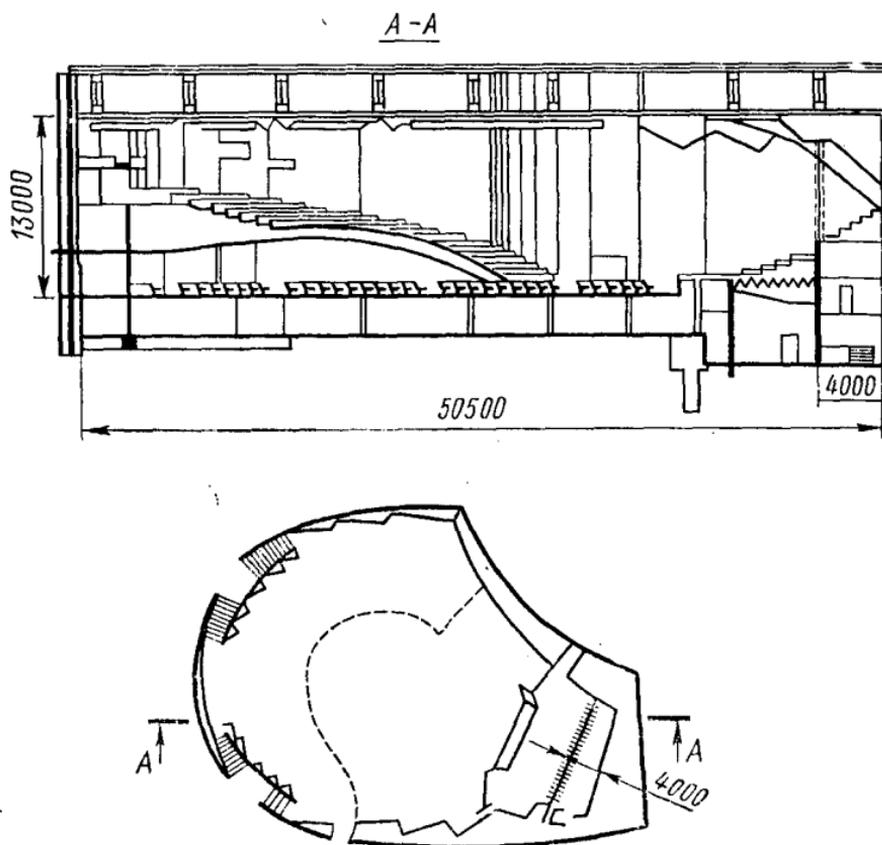


Рис. 31. Большой зал комплекса «Лидер-Халле» в Штутгарте (масштаб разреза увеличен в два раза по сравнению с планом)

ки группы первых скрипок в правую часть зала. Отражатели второго ряда можно регулировать по высоте в зависимости от размещения источников звука на эстраде. Третий ряд отражателей может быть превращен в звукопоглощающую поверхность, если не требуется усиление звучания духовых инструментов. Данные мероприятия привели к тому, что на большую часть мест звуковая энергия поступает не только с эстрады, но и включает ранние отражения (в основном от потолка и отражате-

лей), причем энергия ранних отражений превосходит энергию прямого звука.

Объем зала составляет 16 000 м<sup>3</sup>, число мест 2000; удельный объем 8 м<sup>3</sup>. Для концертных залов такой объем является оптимальным (6—8 м<sup>3</sup>). Время реверберации при заполненном зале составляет на средних частотах 1,8—1,9 с. Интересна и форма среднего зала в этом комплексе. Это пятиугольник с тремя различными размерами сторон (рис. 32).

Такая форма также обеспечивает круговое размещение слушателей относительно эстрады. Основное количество мест располагается уступами с крутым подъемом; балкон располагается в левой части зала. Большое количество мест приближено к ведущей скрипичной группе оркестра. Объем зала 5500 м<sup>3</sup>, число мест 800, т. е. удельный объем ~7 м<sup>3</sup>/чел. Несмотря на значительную разницу в объемах (16 000 и 5500 м<sup>3</sup>), время реверберации в обоих залах на средних частотах примерно одинаково (при наличии слушателей — около 1,8—1,9 с).

Таким образом, одним из основных условий получения хороших акустических условий в концертных залах является обеспечение высокой диффузности звукового поля, определяемое наличием большого числа отражений звука от ограждающих поверхностей. Этого можно достичь подвеской отражающих щитов, кессонированием стен и потолков, чередованием отражающих и поглощающих звук участков поверхностей.

Залы многоцелевого назначения средней вместимости. Залы многоцелевого назначения средней вместимости (300—1200 мест, объем 1500—6000 м<sup>3</sup>) проектируют и строят в нашей стране в большом количестве. К таким залам прежде всего относятся залы клубов и домов культуры, актовые залы учебных заведений, конференц-

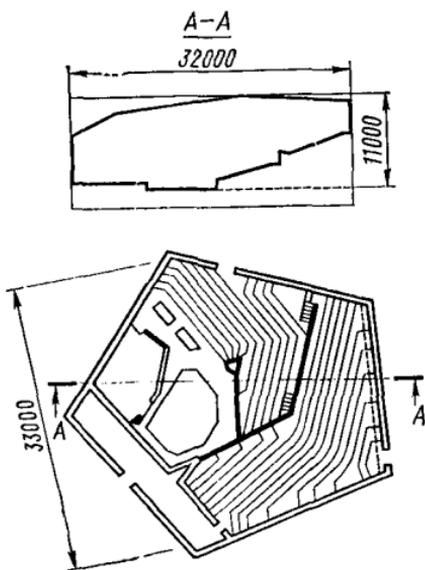


Рис. 32. Концертный зал пятиугольной формы

залы и т. п. Все рассмотренные выше залы предназначались в основном для определенных программ (речевых или музыкальных). В залах многоцелевого назначения акустические условия должны быть достаточно хорошими при самых разнообразных программах (лекции, доклады, спектакли, музыка, кинопоказ), хотя эти условия часто противоречивы. Например, для хорошей разборчивости речи время реверберации должно быть невелико, а ограждающие поверхности должны отражать звук в зал с небольшим запаздыванием. Для хорошего звучания музыки, наоборот, требуется значительно большее время реверберации и очень важна большая диффузность звукового поля.

В крупных залах многоцелевого назначения (более 1200 мест) акустика обычно решается путем использования электроакустических систем, оперативно изменяющих, например, время реверберации (см. гл. V). В залах средней вместимости указанные противоречия могут быть уменьшены разумным компромиссом между акустическими требованиями, предъявляемыми при различном использовании залов.

Акустической особенностью залов средней вместимости является необходимость хорошей слышимости музыки и речи со звукоусилением и без него. Приведем некоторые данные по залам многоцелевого назначения средней вместимости. Удельный объем залов должен составлять около 4—6 м<sup>3</sup>/чел. При наличии сценической коробки общий объем зала определяется без учета объема сцены. Отношение длины зала к его средней ширине должно быть более 1 и не более 2; длина зала (от занавеса сцены до задней стены) не должна превышать 26 м. В таких же пределах желательно и отношение средней ширины зала к его средней высоте. В залах вместимостью более 600 человек целесообразно устройство одного или нескольких балконов. Время запаздывания первых отражений по отношению к прямому звуку должно быть в пределах 0,02 — 0,03 с. При большем времени запаздывания существенно ухудшается разборчивость речи.

При выборе формы зала в плане и разрезе необходимо, чтобы большая доля отраженной звуковой энергии направлялась примерно во вторую половину зала. Необходимое время реверберации указано на рис. 11. Для данных залов еще труднее выбрать время реверберации.

Так же как и в предыдущих случаях, возможно (но не обязательно) увеличение времени реверберации до 40% на частоте 125 Гц. Рекомендуется оборудование зала мягкими или полумягкими креслами, что делает время реверберации менее зависящим от степени заполнения зала зрителями.

#### УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ РАБОТА

Возможность выполнения УИР покажем в основном на примере аудиторий. Желательно в качестве объектов исследования использовать аудитории, имеющиеся в данном учебном заведении, и акцентировать УИР на улучшение их акустических качеств.

1. Проанализировать влияние размеров высоты, ширины и длины аудитории на распределение первых отражений звука.

2. Для больших аудиторий проанализировать влияние объема и суммарной площади ограждающих поверхностей  $S_{\text{общ}}$  на изменение времени реверберации при постоянных значениях коэффициентов звукопоглощения ограждений. Показать, что при больших объемах помещений требуется большее звукопоглощение для получения рекомендуемого значения времени реверберации. Можно найти отношение  $S_{\text{общ}}$  и площади звукопоглотителя (при  $\alpha = \text{const}$ ) при разных объемах и показать, что это отношение будет изменяться не по линейному закону.

3. Для аудиторий, имеющих форму прямоугольных параллелепипедов, определить собственные частоты колебаний (см. § 7) и показать уплотнение спектра частот при увеличении размеров аудиторий. Данную работу рекомендуется выполнить с привлечением ЭВМ.

4. Для аудиторий различного объема показать изменение средней длины свободного пробега звуковой волны и числа отражений и показать связь этих величин с акустическими характеристиками (см. § 7 и 8).

5. Разработать мероприятия по улучшению акустических свойств аудиторий. Часто большие поточные аудитории в учебных заведениях имеют неудовлетворительные акустические качества. Наиболее существенными дефектами аудиторий является их большая высота, значительный удельный объем и, следовательно, завышенное значение времени реверберации. Кроме того, в плоскости потока могут выступать балки, фермы, перекрывающие в поперечном направлении аудитории, что приводит к отсутствию отражений звука в определенных зонах (см. рис. 17).

Для разработки мер по улучшению акустических качеств аудиторий необходимо прежде всего на плане и в разрезе проанализировать первые отражения от стен и потолка, как это показано на рис. 24; затем определить время реверберации и сравнить с рекомендуемым.

6. Оценить акустические качества поточных аудиторий на основе артикуляционных испытаний (см. § 9). Для этого с кафедры читается артикуляционная слоговая таблица\*. Студенты (желательно не менее 6—10), сидящие в различных местах аудитории, записывают данные слоги так, как они их расслышали. Затем студенты

\* *Покровский М. Б.* Расчет и измерение разборчивости речи. М., 1962.

еще не менее двух раз меняются местами и снова записывают ту же таблицу, но в иной последовательности слогов. Уровень громкости читающего таблицу должен соответствовать средней громкости голоса преподавателей, читающих лекции в этой аудитории. Затем определяется процент слоговой артикуляции в зависимости от относительного числа правильно понятых гласных (г) и согласных (с) звуков по номограмме рис. 33. Процент артикуляции является ло-

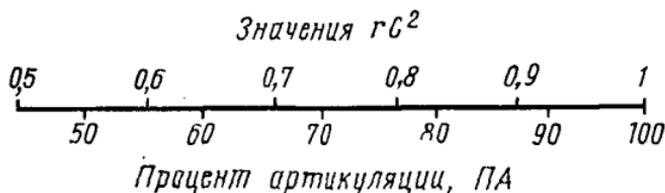


Рис. 33. Номограмма для оценки слоговой артикуляции

кальным показателем. Если в пределах аудитории разброс значений невелик, то процент артикуляции может быть определен в среднем по аудитории. Обязательно определение процента артикуляции для тех зон аудитории, для которых геометрический анализ показал

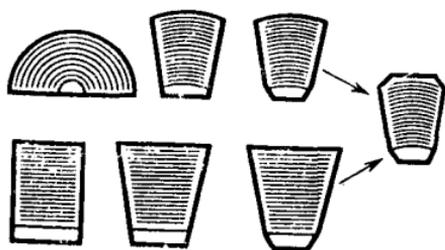


Рис. 34. Схемы планов театральных залов

неудовлетворительные результаты. Данные значения процента артикуляции могут быть сравнены с расчетом по приближенной формуле (70).

На основе геометрического анализа и артикуляционных испытаний разрабатывают мероприятия по улучшению акустических свойств залов, а именно: определяют места размещения звукопоглотителей в соответствии с рис. 23; определяют целесообразность устройства отражателей звука над

кафедрой (см. рис. 25). В некоторых случаях может быть рекомендовано устройство подвешного потолка, уменьшающего высоту аудитории и исправляющего акустические дефекты. Подобная работа может выполняться или группой студентов в рамках курсового проекта общественного здания (УИР), или одним — по линии СНО.

7. Для схем планов театральных залов, приведенных на рис. 34, выполнить подробный акустический анализ преимуществ и недостатков залов (см. § 12), и в соответствии с этим обосновать выбор формы плана в курсовом и дипломном проекте.

8. Аналогичный анализ провести для схем продольных разрезов театральных залов.

9. Оценить акустические качества актового зала или зала в клубе и разработать мероприятия по их улучшению. Желательно экспериментальное определение времени реверберации и сравнение его с расчетным. Эта работа также может быть выполнена группой студентов (УИР) или одним (СНО).

## Глава V

# ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗАЛОВ, ОБОРУДОВАННЫХ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

### § 14. ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЗАЛОВ, ОБОРУДОВАННЫХ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

Залы, оборудованные электроакустическими системами, могут быть отнесены к двум группам: 1) залы, в которых зрители воспринимают звук непосредственно со сцены и при помощи системы звуковоспроизведения. Это залы со звукоусилением (лекционные, концертные, залы многоцелевого назначения); 2) залы, в которых зрители воспринимают звук только при помощи звуковоспроизводящей системы (кинотеатры).

Целесообразность использования систем звукоусиления в залах первой группы (для залов второй группы это очевидно) определяется прежде всего их большими размерами. В залах многоцелевого назначения большого объема помимо усиления звука специальные электроакустические системы могут выполнять еще и функции регулирования времени реверберации. Такие системы называются *амбиофоническими*.

В залах усиление звука обычно требуется при объемах свыше 2000 м<sup>3</sup> и при расстоянии до наиболее удаленных слушателей свыше 25 м. В сильно заглушенных залах звукоусиление может оказаться необходимым и при меньших объемах. Обычно системы звукоусиления в лекционных и театральных залах предназначаются только для усиления речи. Однако при исполнении концертных программ звукоусиление может потребоваться в помощь солистам, выступающим в сопровождении инструментального ансамбля или оркестра. Особенность систем звукоусиления заключается в том, что микрофон, принимающий сигнал для его последующего усиления, находится в звуковом поле громкоговорителей, излучающих уже усиленный сигнал в зал. Поэтому система звукоусиления является системой с *обратной связью*.

Вследствие разнообразия форм, высот и объемов залов решение задач звукоусиления требует индивидуального подхода: обоснованный выбор электроакустической

аппаратуры, выбор мест размещения микрофонов и громкоговорителей, коррекция частотной характеристики усиления и т. п. Совместно с решением данных задач рассматриваются объемно-планировочное решение зала и размещение в нем звукопоглотителей. В залах используются два вида систем звукоусиления: сосредоточенная и распределенная.

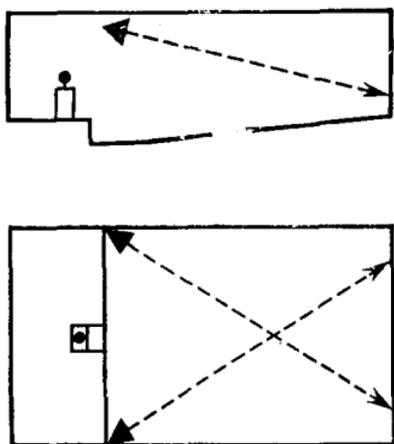


Рис. 35. Озвучивание небольшого зала двумя громкоговорителями

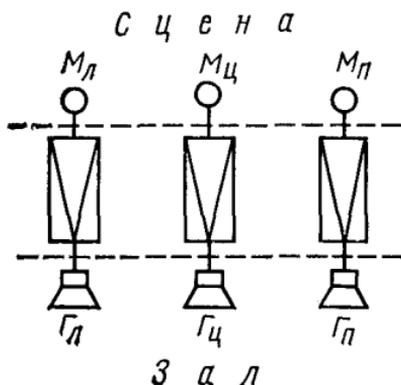


Рис. 36. Схема трехканальной стереофонической системы звукоусиления

При *сосредоточенной* системе громкоговорители расположены в одной части зала, например над эстрадой или по бокам портала. На рис. 35 показана схема озвучивания небольшого зала двумя рупорными громкоговорителями. Громкоговорители выносятся вперед и выше по отношению к микрофону для ослабления акустической обратной связи.

*Распределенная* система может быть двух видов: громкоговорители расположены на поверхностях зала; маломощные громкоговорители вмонтированы в спинки кресел. Распределенная система звукоусиления применяется в залах большой вместимости. Зрители практически воспринимают звуковую энергию, излучаемую громкоговорителем. Поэтому акустические условия самого зала имеют меньшее значение, чем качество электроакустической аппаратуры (микрофон, усилитель, громкоговорители).

Примером распределенной системы звукоусиления может служить система в зале конгрессов Дворца культуры и науки в Варшаве. Объем зала свыше 30 000 м<sup>3</sup>; вместимость около 3500 человек. Громкоговорители (2600 шт.) вмонтированы в спинки кресел и закрыты защитными решетками. Основными достоинствами такой системы, оправдывающими ее применение в больших залах, являются хорошая однородность звукового поля, повышенная четкость усиленного сигнала и малая акустическая обратная связь. Такая распределенная система не создает особых затруднений в привязке слухового образа к зрительному. Тем не менее можно отметить один существенный недостаток: невысокое качество громкоговорителей малого размера позволяет их использовать только для усиления речи (но не музыкальных программ).

Для усиления концертных программ и солистов в больших залах используется *многоканальная стереофоническая система*, позволяющая получить не только высококачественное звукоусиление, но и сохранить акустическую пространственную перспективу. Для создания идеальной стереофонической звукопередачи необходимо иметь множество миниатюрных микрофонов, не искажающих звуковое поле. Каждый микрофон соединен отдельным каналом связи с одним из громкоговорителей, расположенных в том же порядке, что и микрофоны. Невозможность на практике осуществить такую идеальную стереофоническую звукопередачу из-за ее сложности и громоздкости привела к ограничению числа каналов. К тому же было установлено, что стереофоничность резко возрастает при увеличении числа каналов до пяти, а затем ее рост замедляется.

В тех случаях, когда во время звукопередачи источники звука перемещаются, для точного стереофонического звуковоспроизведения может потребоваться большее число каналов. Так, в панорамных кинотеатрах используется *девятиканальная система звуковоспроизведения* (см. § 15).

Обычно в залах используется *трехканальная система звукоусиления* (рис. 36). Каждый из трех каналов — правый (П), центральный (Ц) и левый (Л) — имеет на входной стороне группу микрофонов (на рисунке показано лишь по одному микрофону и громкоговорителю). От микрофонов сигналы после усиления поступают к

громкоговорителям и затем в зал. Сигнал, принятый микрофоном, ближайшим к источнику, имеет более высокий уровень по сравнению с сигналами, принимаемыми другими микрофонами. Кроме того, первый сигнал опережает другие по времени. Данное соотношение уровней и временных сдвигов сохраняется и в сигналах, излучаемых громкоговорителями, что создает определенный стереофонический эффект. Громкоговорители центрального канала располагаются над средней частью портала сцены, а громкоговорители боковых каналов — по краям портала и ниже громкоговорителей центральной группы. Вся система управляется с центрального поста. Оператор имеет возможность видеть сцену и включает и выключает те или иные микрофоны и регулирует усиление в соответствии с перемещениями артистов.

Большой интерес представляют залы многоцелевого назначения большой вместимости. Основная трудность акустического проектирования залов многоцелевого назначения заключается в том, что для речи и музыки требуется различный акустический режим. Для речевых передач требуется меньшее время реверберации. Однако при этом музыка лишается своей звучности, становится сухой и безжизненной. Большое влияние на качество передач оказывает и степень диффузности звукового поля.

Изменить время реверберации в зале постоянного объема можно за счет звукопоглощения. Это использовалось в радиостудиях, где в качестве звукопоглотителей применялись колонны, расположенные вдоль стен. Одна половина колонн обработана звукопоглощающим материалом, другая же половина отражает и рассеивает звук. Поворачивая то или иное количество колонн вокруг своей оси, можно получать различное время реверберации. Конечно, такое регулирование требует определенного времени и практически возможно лишь в помещениях небольшого размера. В залах многоцелевого назначения необходимо оперативное управление временем и частотной характеристикой реверберации. Эта задача в настоящее время решается с помощью специальных систем искусственной реверберации.

Одной из систем искусственной реверберации является система с использованием гулких помещений. Сигнал поступает в микрофон и затем разветвляется на два направления: по прямому каналу и по каналу эхо-камеры. Эхо-камера имеет большое время реверберации, и по-

этому сигнал, воспринимаемый помещенным там микрофоном, дополняет основной сигнал, идущий по прямому каналу, запаздывающими повторениями, возникающими в эхо-камере. Основным недостатком этой системы является невозможность оперативного изменения времени реверберации во время передачи. Исполнители, не ощущая увеличения времени реверберации помещения, лишены возможности корректировать свое исполнение в соответствии с увеличением реверберации. От этого недостатка свободна система, при которой реверберация регулируется в самом помещении.

В качестве ревербератора в такой системе искусственной реверберации, называемой амбиофонической, используется магнитофон, имеющий несколько звукопроизводящих головок. Эти головки создают эхо-сигналы с запаздыванием, равным времени прохождения ленты от записывающей головки до воспроизводящей. Искусственные эхо-сигналы, имитирующие реверберирующий звук в помещении, поступают в зал через систему громкоговорителей. Магнитные ревербераторы имеют ряд преимуществ перед другими и поэтому являются основным элементом амбиофонических систем. Основными узлами амбиофонической системы являются микрофонное устройство, магнитный ревербератор и распределенная система громкоговорителей (рис. 37).

Звук, исходящий от источника, принимается микрофонами *М*, подвешенными над сценой или же около солиста и инструмента. После усиления сигнал поступает в магнитный ревербератор и записывается на кольцевую ленту. Ревербератор отличается от предыдущих устройств наличием нескольких каналов воспроизведе-

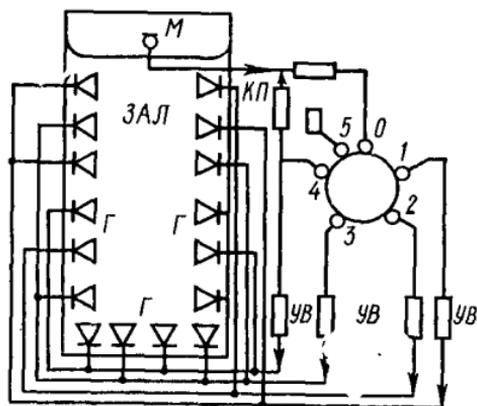


Рис. 37. Схема амбиофонической системы:

*М* — микрофон; *КП* — катодный повторитель; *УВ* — усилители воспроизведения; *Г* — громкоговорители; *0* — записывающая головка; *1-4* — звукопроизводящие головки; *5* — стиральная головка

ния (например, на рис. 37 показаны четыре канала). С последней воспроизводящей головки снимается сигнал обратной связи, возвращаемый через катодный повторитель *КП* на вход усилителя записи. Стирающая головка *Б* уничтожает ранее записанный сигнал, подготавливая магнитную ленту к новой записи. Громкоговорители *Г* в зале разделены на группы по числу каналов воспроизведения. Каждая группа излучает сигналы с разным временем запаздывания. Таким образом создается искусственная реверберация, воспринимаемая совместно с собственной реверберацией зала.

Амбиофонические системы являются оперативным и эффективным средством управления акустикой залов. При работе амбиофонической системы улучшается звучание музыки, оно становится более полным, объемным и выразительным; улучшается диффузность звукового поля. Кроме того, применение амбиофонии расширяет творческие возможности дирижера и исполнителей.

Таким образом, в залах, оборудованных электроакустическими системами, качество звучания зависит не только от акустических свойств помещения, но и от качества электроакустической аппаратуры.

В залах, оборудованных распределенной одноканальной и многоканальной (стереофонической) системами звукоусиления, источники звука оказываются расположенными иначе, чем при непосредственном исполнении со сцены. При большом количестве громкоговорителей, равномерно распределенных на всех поверхностях зала, и равенстве излучаемой звуковой энергии может нарушиться локализация источника звука, поэтому большое значение имеет правильное соотношение излучаемой громкоговорителями звуковой мощности. Почти на всех местах в зале зрители в основном воспринимают прямую звуковую энергию, идущую от громкоговорителей. Отраженная от поверхностей зала звуковая энергия менее интенсивна, чем прямая. Следовательно, и роль ограждающих поверхностей в формировании звукового поля в зале менее значительна, чем в залах с естественной акустикой. Обычно все поверхности больших залов обрабатываются звукопоглотителями, что необходимо для получения оптимального времени реверберации. Поэтому форма таких поверхностей не может существенно влиять на звуковое поле в силу того, что эти поверхности имеют достаточно большой коэффициент звукопоглощения.

Таким образом, основные акустические требования, определяющие выбор объемно-планировочных решений залов, оборудованных электроакустическими системами, остаются в основном теми же, что и для залов с естественной акустикой. Выполнение этих требований часто облегчается большей возможностью выбора формы зала и его отделки. Некоторые возможные акустические дефекты могут быть устранены при проектировании и наладке электроакустических систем.

Особенно большой интерес представляет дальнейшее развитие амбиофонических систем, что позволит в недалеком будущем разрешить основные трудности, возникающие при проектировании залов многоцелевого назначения большого объема.

## § 15. ЗАЛЫ, ОБОРУДОВАННЫЕ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

**Кинотеатры.** Прежде всего необходимо отметить принципиальное отличие (в акустическом отношении) зрительных залов кинотеатров от залов с естественной акустикой, например театров. В театральных залах, где зритель слышит непосредственно актеров, нельзя ограничиться только наличием прямого звука. Роль отраженного звука очень велика. В кинотеатрах в качестве источника звука используется громкоговоритель, мощность которого намного больше мощности голоса человека. Поэтому при больших мощностях уровень прямого звука достаточно высок даже на больших расстояниях от экрана. При этом роль отраженного звука уменьшается и, следовательно, в кинотеатрах к форме отражающих поверхностей в плане и разрезе могут быть предъявлены менее жесткие требования, чем в театральных залах.

Тем не менее геометрическая форма зала и очертание его внутренних поверхностей должны обеспечивать правильное распределение отраженного звука и достаточную диффузность звукового поля. Поэтому формы и очертания поверхностей, вызывающие концентрацию или неравномерное распределение отраженного звука, могут быть допущены лишь при соответствующем акустическом обосновании. Запаздывание первого интенсивного отражения, приходящего к слушателю вслед за прямым звуком, а также промежутки времени между

приходами последующих отдельных интенсивных отражений не должны превышать 0,03 с.

Кинотеатры с обычным экраном обычно рассчитываются на вместимость до 300 зрителей; при вместимости от 300 до 600 мест уже проектируют широкоэкранные кинотеатры, а при 800—4000 мест — широкоформатные. Площадь на 1 место в зале составляет 0,85—0,9 м<sup>2</sup> \*. Форма плана может быть прямоугольная, трапециевидальная, овальная и многоугольная. Задняя граница зоны хороших мест может определить функционально целесообразную форму плана не только из условий видимости, но и слышимости.

Залы вместимостью до 800 мест следует проектировать без балконов. В залах вместимостью более 1200 мест балкон уже необходим и даже амфитеатр без балкона невыгоден. Необходимость балкона объясняется тем, что размеры экрана должны быть ограничены. По условиям яркости широкоформатный экран не может сейчас превосходить размер 26—30 м по хорде. Такому размеру соответствует проекционное расстояние около 42—48 м, что позволяет разместить в амфитеатре 1400—1600 мест.

Необходимо также ограничение длины зала из условия обеспечения синхронного восприятия изображения на экране и звука. При слишком большом удалении зрителей от громкоговорителей (при их расположении за экраном) необходимо повесить их отдачу, что приведет к излишней громкости в первой части зала, поэтому максимально допустимая длина зала (расстояние между экраном и последним рядом) не должна превышать 50—60 м.

Введение балконов не только улучшает технико-экономические показатели зала, но и позволяет сделать пропорции зала более благоприятными с акустической точки зрения, так как балконы могут вмещать до 30% и даже более от всех зрителей кинотеатра. При проектировании балконов часто допускаются ошибки, приводящие к неудовлетворительной слышимости в подбалконном пространстве. Этот дефект возникает при длинном балконе и низком подбалконном пространстве. Места, находящиеся под балконом, лишаются основной части отраженной звуковой энергии.

---

\* Более подробно см. СНиП II-73—76 «Кинотеатры». М., 1977.

Длина подбалконного пространства не должна превышать 4—5 рядов мест. Высота у последнего ряда должна быть не менее 3 м. Если необходим длинный балкон, то его следует располагать за пределами задней стены (рис. 38). Отражающие поверхности под балконом нельзя обрабатывать звукопоглотителями.

Очень полезным с точки зрения акустики является решение мест в зале в виде крутого амфитеатра. Во многих залах, где превышение последнего ряда над первым составляет около 3,5—4 м, распределение звуковой энергии по залу и качество звучания на основной площади мест оказываются практически одинаковыми. Для простых форм зала в плане и разрезе (прямоугольник или трапеция) можно указать основные пределы отношения длины к ширине и высоте: от 2,5 : 1,5 : 1 до 4,5 : 2,5 : 1.

В обычных кинотеатрах зритель слышит звучание, исходящее из одного или нескольких громкоговорителей, независимо от того, в какой части экрана расположен звучащий объект. Такой одноканальный способ воспроизведения звука возможен при небольшой ширине экрана. Расположение громкоговорителей по высоте экрана зависит от размеров зала. При длине зала более 25 м равномерное распределение прямой звуковой энергии в передней и задней частях зала получается только при высоком расположении громкоговорителей, что вызывает и увеличение высоты зала. Например, при длине зала 50 м высота должна быть 12—14 м. Удельный объем зала принимается примерно таким же, что и в драматических театрах, т. е. около 4,5 м<sup>3</sup> на одного зрителя.

Акустический расчет проводится аналогично расчету театральных залов (см. § 13). Оптимальное время реверберации выбирается в соответствии с рис. 11. На низких частотах допускается увеличение времени реверберации с таким расчетом, чтобы на частоте 125 Гц оно не превышало указанного на рис. 11 более чем на 20%.

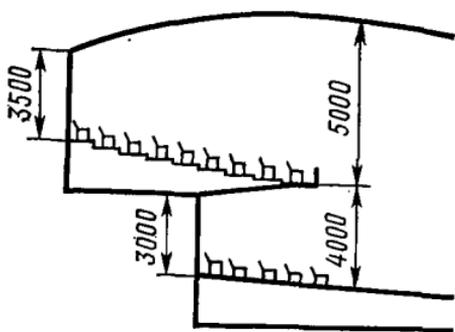


Рис. 38. Схема решения балкона в зале кинотеатра

Возможные места размещения звукопоглотителей определяются в зависимости от формы и размеров залов, а также от высоты размещения громкоговорителей. При размещении громкоговорителей за экраном на заэкранной стене зала обязательно устройство звукопоглощающей отделки с коэффициентами звукопоглощения не менее 0,6 в диапазоне частот 100—4000 Гц.

В передней части зала кинотеатра обычно предусматривается эстрада, отделяющая экран и места первого ряда. Звуковая энергия от громкоговорителей распространяется не только прямо к зрителям, но и отражается от потолка в передней части зала над эстрадой. Если высота потолка большая, то может оказаться, что запаздывание первых отражений (по сравнению с прямым звуком) от потолка и верхних частей боковых стен будет недопустимо большим (около 0,05 с). Поэтому части потолка и боковых стен вокруг предэкранной части зала возможно обрабатывать звукопоглотителями. Боковые стены обычно обрабатывают звукопоглотителями от уровня установки громкоговорителей до потолка. Нижняя часть боковых стен (ниже уровня громкоговорителей) эффективно и равномерно отражает звук в зал, поэтому эта часть стен должна иметь невысокий коэффициент звукопоглощения.

В настоящее время в основном строятся широкоэкранные и панорамные кинотеатры. Восприятие фильма в них в значительной степени усиливается благодаря многоканальной системе стереофонического звуковоспроизведения, что позволяет не только усилить эффект участия зрителя, но и повысить качество звучания речи или музыки. В широкоэкранном кинотеатре за экраном располагаются пять групп громкоговорителей, представляющие самостоятельные стереофонические каналы. В зале расположена еще одна группа, служащая для звуковых эффектов. В зрительных залах, предназначенных для демонстрации панорамных или широкоформатных фильмов, используется девятиканальная система звуковоспроизведения. Пять каналов объединяют пять групп громкоговорителей, расположенных за экраном на равных расстояниях друг от друга. Остальные каналы питают группы громкоговорителей, размещенные на боковых и задней стенах и потолке зала. Эти каналы могут воспроизводить как стереофоническое звучание в зале, так и звуковое сопровождение, перемещающееся по залу. Так,

например, можно создать эффект шума дождя при подаче звука из громкоговорителей, расположенных на потолке.

Ввиду того что звук может приходиться из различных точек, зритель должен иметь возможность ощущать направление источника звука. Это может быть достигнуто при обработке основной площади ограждающих поверхностей звукопоглотителями. Конечно, и здесь на распределение звукопоглотителей основное влияние оказывают форма и размеры залов.

Высота в передней части зала обычно получается значительной из-за большой высоты экрана. Если для уменьшения объема зала наклонить потолок к задней стене, то это приведет к увеличению разности пути между прямой энергией и отраженной от потолка. При большой высоте зала это может привести к ухудшению разборчивости речи. Для устранения этого дефекта необходимо потолок обязательно обработать звукопоглотителями. Таким образом, в залах кинотеатров большого объема основные ограждающие поверхности обрабатываются звукопоглотителями. Звук, отраженный от таких поверхностей, имеет значительно меньшую интенсивность, чем прямой звук. Поэтому форма и размеры залов кинотеатров оказывают меньшее влияние на акустические качества по сравнению с залами с естественной акустикой. Возможные акустические дефекты могут быть устранены обработкой поверхностей звукопоглотителями. Например, при круглой форме зала кинотеатра «Мир» (Москва) акустические условия в нем достаточно хорошие. Круглая форма зала соответствует очертанию большого полукруглого экрана. Высота зала 20 м при диаметре 38 м. Ширина экрана 30,6 м, высота 11,4 м, стрела изгиба экрана 8 м. Площадь зрительного зала 1100 м<sup>2</sup>; в нем размещается 1226 зрителей. В кинотеатре три киноаппаратных, в каждой из них установлены два панорамных проектора. В центральной киноаппаратной, кроме того, имеются два кинопроектора для демонстрации обычных и широкоэкранных фильмов. За экраном находится пять групп громкоговорителей для воспроизведения панорамных фильмов и одна группа для обычных кинокартин. По стенам зала и потолку установлено еще четыре группы громкоговорителей для улучшения звучания при демонстрации панорамных фильмов. Общее число громкоговорителей, питаемых от девяти само-

стоятельных каналов звуковоспроизведения, составляет 120. Стены зала облицованы звукопоглощающими материалами, прикрытыми со стороны зала деревянными рейками. Потолок также покрыт звукопоглотителями. Большой подъем мест обеспечивает хорошую видимость и слышимость. Акустические условия восприятия речи и музыки хорошие.

В кинотеатре «Россия» предусмотрен показ всех основных видов: широкоформатных (70-миллиметровых), широкоэкранных, обычных фильмов на 35-миллиметровой киноленте; возможен также показ стереофонических широкоформатных фильмов с раздельной девятиканальной фонограммой. Большой зал на 2500 мест с балконом имеет в плане трапециевидальную форму (в партере 1500 мест, на балконе 1000 мест) (рис. 39). Максимальная ширина зала 43,5 м, длина партера 35 м, длина зала (от центра экрана до последних мест на балконе) 44,8 м. Экран занимает всю переднюю стену зала, чем создается хороший панорамный эффект.

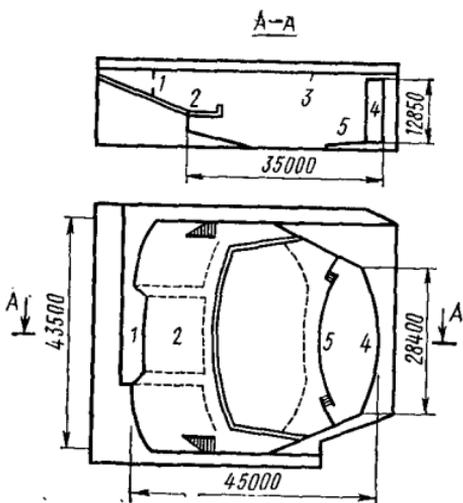


Рис. 39. Большой зал кинотеатра «Россия»:

1 — кинопроекционная; 2 — балкон; 3 — подвесной потолок; 4 — экран; 5 — эстрада

Звуковоспроизведение осуществляется стереофонической системой усиления и громкоговорителями, расположенными сзади экрана; громкоговорители остальных каналов расположены на стенах, потолке, под балконом и скрыты за декорированными покрытиями. Время реверберации составляет около 1—1,1 с на всех частотах. Звукопоглощающие конструкции, размещенные на стенах зала вместе с расположенными там громкоговорителями, декорированы вертикальными рейками. Для уменьшения шума при движении людей пол выполнен из войлока, поверх которого уложены древесноволокнистые плиты, покрытые пластиком. За винилпластовой сеткой подвесного потолка скрыты звукопоглотители и громко-

говорители; здесь также расположены источники света.

Пути дальнейшего совершенствования кинематографа направлены на разработку таких систем, которые максимально приблизили бы условия зрительного и слухового восприятия киноизображения к естественным условиям восприятия в жизни человека. Новые системы стереофонического кинематографа должны обладать большими горизонтальными и вертикальными угловыми размерами изображения, соответствующими размерам естественных углов видения. Наряду с этим будет использоваться принцип динамического формата кадра (*вариоскопическая проекция*), позволяющий изменять как общие размеры изображения на экране, так и его пропорции в соответствии с творческим замыслом. Кроме того, возможен показ полиизображений при непрерывном изменении числа изображений и размеров каждого из них.

Большее значение приобретает стереофония для повышения естественности звучания речи или музыки, а также улучшения локализации источника звука в соответствии с действием, происходящим на экране. Число звуковых каналов, очевидно, возрастет, что повлечет за собой увеличение числа громкоговорителей (до нескольких сотен). Большая четкость локализации источника звука возможна при уменьшении влияния отражений звука от ограждающих поверхностей, что приведет к необходимости их обработки эффективными звукопоглотителями.

**Залы многоцелевого назначения большой вместимости.** Вопрос акустической трансформации зала является достаточно трудным. Так, изменение времени реверберации может быть достигнуто системами искусственной реверберации. Без них регулирование времени реверберации возможно при изменении в широких пределах или объема зала, или его звукопоглощения. Можно указать наиболее простые пути некоторого регулирования времени реверберации.

На рис. 40 показана схема универсального концертно-театрального зала. Шторы-драпировки, поднимающиеся и опускающиеся в направляющих пазах, могут изменить коэффициент звукопоглощения этих участков стен до 5—10 раз. Высота подъема штор должна обеспечивать приход к слушателям первых полезных отражений. На

рис. 40 эта высота ограничена линией *ИА*. При использовании системы звукоусиления (кино, собрание) допустимо опускание шторы ниже, если трудно обеспечить увеличение звукопоглощения в других местах зала.

Изменение объема зала возможно путем устройства оркестровой раковины и передвижных перегородок (рис. 40). При присоединении объема оркестровой раковины к объему зала время реверберации может быть увеличено примерно на 0,2 с в диапазоне средних частот. Отде-

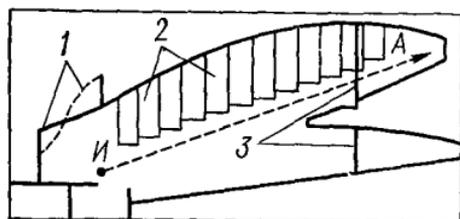


Рис. 40. Схема театрально-концертного зала:

1 — подвижные отражатели; 2 — поднимающиеся шторы-драпировки; 3 — легкая раздвижная перегородка

ление раковины от зала (для уменьшения времени реверберации) достигается опусканием экрана и изменением положения отражателей на стенах и потолке.

При использовании залов для демонстрации фильмов необходимо изменять ширину сцены в зависимости от размера экрана. Это также может

быть достигнуто применением подвижных отражателей типа ширмы. Одним из возможных приемов оборудования сцены является использование подвижного портала или порталных кулис, с которыми можно совместить отражатели и громкоговорители.

Оркестровая раковина или эстрада позволяют не только регулировать объем зала. Ограждающие поверхности раковины или эстрады обеспечивают структуру ранних отражений, что так важно для музыкальных программ. Поэтому часто оркестровые раковины называют акустическими. Устройство разборной акустической раковины позволяет использовать зал как для концертов, так и для спектаклей и кинопоказа.

В качестве другого примера рассмотрим Дворец молодежи в Целинограде. На схеме продольного разреза (рис. 41) показаны зрительный 1 и спортивный 2 залы. Зрительный зал на 1200 мест, решенный в виде амфитеатра, используется как киноконцертный, зал собраний, конференций и т. д. Универсальный спортивный зал предназначен для спортивных игр и занятий; трибуны и галереи вмещают до 550 зрителей. Зрительный и спортивный залы могут объединяться в единое пространство

через сцену. Спортивная площадка может трансформироваться в сцену; размеры сцены увеличиваются вдвое, позволяя проводить выступления больших балетных, хоровых и танцевальных коллективов, осуществлять театральные и оперные постановки. Трибуны спортивного зала в этом случае изолируются от сцены, но возможно расположение зрителей с двух сторон единого помещения зала-арены, используемого для массовых спортивных выступлений.

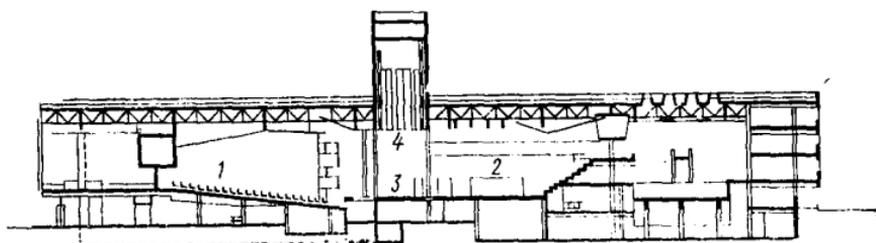


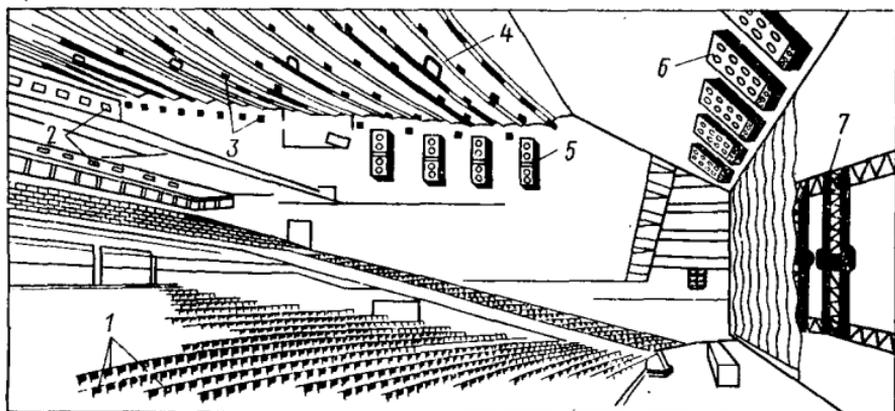
Рис. 41. Дворец молодежи в Целинограде (продольный разрез):  
1 — зрительный зал; 2 — спортивный зал; 3 — сцена; 4 — разделительные занавеси

Трансформация пространства обеспечивается не только подъемом разделительных занавесов, но и подъемом декораций, расположенных в коробке сцены и в потолке зрительного зала. Зрительный зал является залом многоцелевого назначения, поэтому время реверберации должно быть выбрано в соответствии с рис. 11. Для спортивного зала время реверберации могло бы быть меньше, однако в связи с возможным объединением этих залов необходимо рассматривать единый объем с временем реверберации, соответствующим его значению для зрительного зала. Это может вызвать определенные трудности с размещением звукопоглотителей в обоих залах, так как необходимо учитывать не только характер первых отражений, но и возможность появления эха из-за больших размеров объединенных залов. Подобные залы необходимо оборудовать системой звукоусиления.

Интересно решены залы в Ленинграде (4000 мест), Киеве (4000 мест), Тбилиси (2500 мест) и др. Киноконцертный зал «Октябрьский» (Ленинград) имеет прямоугольную симметричную форму в плане. Киноаппаратная встроена в балкон — консоль, так что под ней есть проход в партер. Данное решение обеспечивает хорошие

условия проекции по вертикали, но приводит к сокращению проекционного расстояния. В этом зале впервые в отечественной практике выполнена трансформируемая акустическая раковина, имеющая раздвижные жесткие кулисы и подъемный потолок. Данные поверхности хорошо обеспечивают ранние отражения и позволяют про-

а)



б)

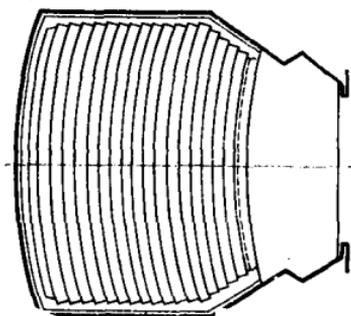


Рис. 42. Акустические устройства (а) и план (б) Кремлевского Дворца съездов (масштаб плана уменьшен)

водить симфонические концерты для 4000 зрителей в условиях естественной акустики. Время реверберации в данном зале равно 1,6 с при объеме зала 32 000 м<sup>3</sup>. При таком же объеме (30 000 м<sup>3</sup>) зала во Дворце культуры «Украина» (Киев) время реверберации меньше — 1,3 с.

Очень интересным примером решения акустики зала универсального назначения является Кремлевский Дворец съездов. Зрительный зал (рис. 42) имеет размеры в плане 55×49 м и высоту 19 м. Объем зала 52 000 м<sup>3</sup>, вместимость 6000 человек, удельный объем 8,7 м<sup>3</sup> на одного человека. Скошенная форма стен и потолка у

сцены способствует равномерному распределению звуковой энергии в зале. Задняя стена имеет криволинейное очертание, однако при радиусе 100 м такая поверхность не будет фокусировать звук.

Для того чтобы можно было использовать зал при различных акустических режимах, потребовалась его обработка специальными звукопоглотителями, иначе при таком большом объеме зал был бы слишком гулким. Звукопоглотители на стенах состоят из слоя капроновой ваты, прикрытой анодированной алюминиевой сеткой и профилированными деревянными рейками. Величину звукопоглощения можно регулировать выдвижными касетами. Нижняя часть боковых стен покрыта искусственной кожей, натянутой на деревянный каркас. Такая конструкция имеет хорошее звукопоглощение на низких частотах.

Подвесной потолок зала состоит из набегающих одна на другую дугообразных звукорассеивающих и в то же время звукопоглощающих панелей из перфорированных алюминиевых листов. За листами расположен слой пористого материала (асбестовое волокно). Часть скошенной части потолка шириной 6 м (от портала) используется для отражения звука.

Для усиления речи используется распределенная система громкоговорителей 1, расположенных в спинках кресел (рис. 42). Усиление музыкальных передач осуществляется с помощью многоканальной стереофонической системы, громкоговорители 6 которой расположены в скошенной части потолка. Кроме того, в зале имеется и амбиофоническая система, используемая дополнительно к стереофонической во время исполнения различных музыкальных программ. Громкоговорители этой системы расположены в верхней части боковых стен 5, на задних стенах балкона, амфитеатра 2, а также на потолке зала 3 и 4. Таким образом, в зале можно создавать условия для высококачественного усиления как речи, так и различных концертных выступлений и оперных спектаклей. Заэкранные громкоговорители 7 совместно с громкоговорителями 5, 2 и 4 используются для звукового сопровождения показа широкоформатных фильмов. Время реверберации составляет около 1,5 с и мало изменяется при различном числе зрителей, так как  $\alpha_{\text{ср}} \geq 0,4$  во всем диапазоне звуковых частот.

## УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ РАБОТА

1. Проанализировать форму и размеры зрительных залов обычных, широкоэкранных и панорамных кинотеатров и использовать полученный материал при выполнении курсового или дипломного проекта.

2. На основе анализа схем залов кинотеатров определить наиболее целесообразные формы плана, исходя из требований акустики, видимости и вместимости.

3. Обобщить проектный материал по залам многоцелевого назначения большой вместимости, связав его с вопросами архитектурной акустики.

4. Для актового зала института или зала клуба в случае неудовлетворительных акустических условий обосновать необходимость использования систем звукоусиления.

5. Проанализировать акустические условия поточных аудиторий с точки зрения целесообразности использования сосредоточенной системы звукоусиления.

6. Проанализировать схемы акустической трансформации залов.

7. Рассмотреть конструкции подвесных потолков и обосновать их применение для залов различного назначения.

# Раздел третий

## СТРОИТЕЛЬНАЯ АКУСТИКА

### Глава VI

## РАСПРОСТРАНЕНИЕ ШУМА В ЗДАНИЯХ. НОРМИРОВАНИЕ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ

### § 16. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ШУМА В ЗДАНИЯХ

Причиной возникновения шума в зданиях являются как внутренние, так и внешние источники. К внутренним источникам относятся инженерное и санитарно-техническое оборудование, громкая музыка, танцы и др.; к внешним — транспорт, промышленные предприятия и др. В практике борьбы с шумом используют следующие методы: борьба с шумом в источнике, звукопоглощение, звукоизоляция. Кроме того, существенным фактором борьбы с шумом может служить архитектурно-планировочное решение, например расположение тихих помещений вдали от шумных зданий и т. п.

Рассмотрим основные виды шума и пути его распространения в здании (рис. 43). Если источник шума не связан с конструкциями, например громкоговоритель, и передача звуковой энергии происходит в результате колебания конструкции, разделяющей два помещения, то такой шум называется *воздушным* (1) (рис. 43). При ударах по междуэтажному перекрытию (ходьба, танцы и т. п.) передача энергии происходит также за счет колебания конструкции; такой шум называется *ударным* (2) (рис. 43).

Пути передачи шума в изолируемое помещение могут быть *прямыми* (1 и 2) и *косвенными* (обходными) (3 и 4). Такая передача возможна в результате того, что колебания, вызванные воздушным или ударным шумом, распространяются по конструкциям всего здания. Вибрирующие конструкции излучают шум в помещения, расположенные даже на значительном расстоянии от источника; такой шум часто называют *структурным*. Структурным будет также шум при излучении его конструкцией, жестко связанной с какими-либо вибрирующими механизмами, например насосными, вентиляционными или

лифтовыми установками 4'. В этом случае путь 3 будет являться косвенным по отношению к прямому 4'.

При распространении шума по зданию косвенными путями происходит уменьшение его интенсивности вследствие поглощения энергии колебаний материалами конструкций, потерей энергии в стыках и распределения энергии на все большую площадь сечения.

В современных зданиях за счет снижения массы ограждающих конструкций, увеличения жесткости сопряжений в стыках и уменьшения их числа наблюдается бо-

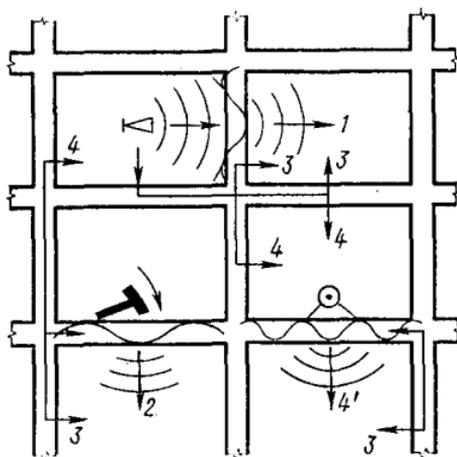


Рис. 43. Распространение шума в здании

лее интенсивная передача шума по косвенным путям. В результате шум распространяется с малым затуханием на большие расстояния от источника, приводя к дискомфортным условиям в ряде помещений.

Применяемые расчетные методы дают возможность оценить косвенную передачу шума лишь для некоторых идеализированных схем зданий. Трудность решения данного вопроса заключается в том, что по конструкциям здания могут распространяться четыре основных типа упругих волн: продольные, изгибные, сдвиговые и крутильные, которые трансформируются при прохождении через стыки с различным вкладом в излучение шума. Обилие параметров волнового движения затрудняет анализ получаемых решений.

Задача может быть решена при статистическом подходе, при котором рассматривается система вибрирующих элементов резонансного типа со многими степенями

свободы. В качестве основной переменной принимается средняя плотность энергии резонансных колебаний, частоты которых попадают в рассматриваемую полосу. В пределах этой частотной полосы усредняются параметры, определяющие энергетический баланс в системе. При статистическом подходе энергосодержание любого элемента здания можно рассматривать как алгебраическую сумму энергии, поступающей от источника, энергии внутренних потерь и потерь на границах, обусловленных утечкой в смежные элементы\*.

В связи с тем что указанные методы еще не стали достоянием инженеров, в дальнейшем рассматриваются лишь прямые пути передачи энергии.

### § 17. НОРМИРОВАНИЕ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ

В соответствии со СНиП II-12—77 «Защита от шума» нормируемыми параметрами звукоизоляции ограждающими конструкциями гражданских зданий, а также вспомогательных зданий и помещений промышленных предприятий является индекс изоляции воздушного шума  $I_v$  (дБ) и индекс приведенного уровня ударного шума под перекрытием  $I_y$  (дБ). В отличие от СНиП II-Л.1—71 изменена форма нормативной кривой изоляции воздушного шума ограждениями жилых зданий. Новая нормативная кривая (рис. 44) устанавливает значения звукоизоляции в третьоктавных полосах частот в диапазоне от 100 до 5000 Гц. Это позволяет, не снижая требований санитарных норм к допустимому в жилых помещениях шуму, более эффективно применять перспективные облегченные конструкции, обеспечивающие определенный экономический эффект.

Индекс изоляции воздушного шума  $I_v$  конструкцией с известной (рассчитанной или измеренной) частотной характеристикой звукоизоляции определяют по формуле

$$I_v = 50 + \Delta_v, \quad (71)$$

где  $\Delta_v$  — поправка, определяемая путем сравнения частотной характеристики изоляции воздушного шума конструкцией с нормативной частотной характеристикой (рис. 44).

\* Калюжный В. В. Распространение звуковых вибраций в многоэтажных каркасных зданиях. — Известия ВУЗов. Строительство и архитектура, 1972, № 5.

Для вычисления поправки  $\Delta_B$  (дБ) необходимо на график 1 рис. 44 нанести частотную характеристику изоляции воздушного шума и определить среднее неблагоприятное отклонение нанесенной характеристики от нормативной. Неблагоприятными отклонениями считаются отклонения вниз от нормативной кривой. Среднее неблагоприятное отклонение принимается равным  $1/18$  суммы

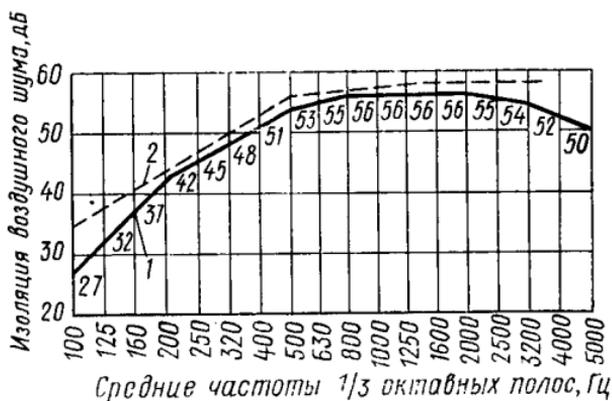


Рис. 44. Нормативные частотные характеристики изоляции воздушного шума:  
1 — по СНиП II-12-77; 2 — по СНиП II-Л.1-71

неблагоприятных отклонений. Если среднее неблагоприятное отклонение близко, но не превышает 2 дБ, а максимальное неблагоприятное отклонение не превышает 8 дБ, то поправка  $\Delta_B = 0$ .

Если среднее неблагоприятное отклонение превышает 2 дБ или максимальное неблагоприятное отклонение превышает 8 дБ, то нормативная кривая смещается вниз (на целое число децибел) так, чтобы среднее и максимальное неблагоприятные отклонения от смещенной нормативной кривой не превышали указанные величины. В этом случае  $\Delta_B$  отрицательна и равна величине смещения нормативной кривой.

Если среднее неблагоприятное отклонение значительно меньше 2 дБ или неблагоприятные отклонения отсутствуют, нормативная кривая смещается вверх (на целое число децибел) так, чтобы среднее неблагоприятное отклонение от смещенной нормативной кривой приближалось, но не превышало 2 дБ, а максимальное неблагоприятное отклонение не превышало 8 дБ. В этом случае

поправка  $\Delta_B$  положительна и равна величине смещения нормативной кривой.

**Пример.** Определить индекс изоляции воздушного шума перегородкой, для которой экспериментальным путем определена частотная характеристика звукоизоляции.

Наносим экспериментальную кривую на график 1 рис. 45. Результаты расчета сведем в табл. 13.

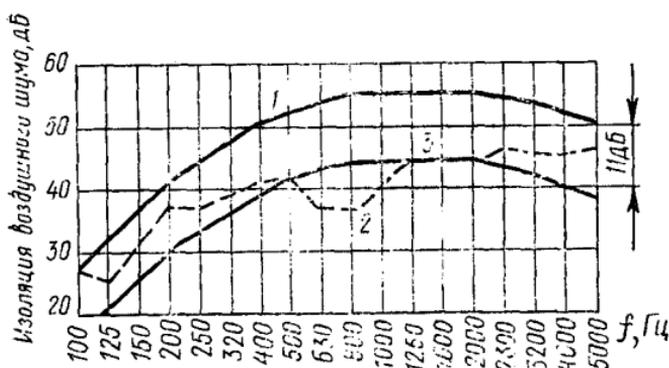


Рис. 45. Определение индекса изоляции воздушного шума перегородкой:

1 — нормативная кривая; 2 — экспериментальная частотная характеристика звукоизоляции; 3 — нормативная кривая после смещения на 11 дБ

Сумма неблагоприятных отклонений от нормативной кривой (гр. 4) равняется 162 дБ. Среднее неблагоприятное отклонение составляет  $162 : 18 = 9$  дБ, что более 2 дБ. Смещаем нормативную кривую на 11 дБ (гр. 5). Сумма неблагоприятных отклонений после смещения на 11 дБ (гр. 6) составляет 18 дБ. Среднее неблагоприятное отклонение равно  $18 : 18 = 1 < 2$  дБ. Если бы не было условия, что максимальное неблагоприятное отклонение не должно превышать 8 дБ, можно было бы сместить нормативную кривую на 9, а не на 11 дБ.

Поправка  $\Delta_B = -11$  дБ и индекс изоляции воздушного шума перегородкой равен  $I_B = 50 + (-11) = 39$  дБ.

Поправка  $\Delta_B$  практически соответствует показателю изоляции воздушного шума  $E_B$ , поэтому легко сопоставить результаты, полученные по СНиП II-Л1—71 и СНиП II-12—77. Можно также отметить, что значение индекса  $I_B$  совпадает в среднем со звукоизоляцией в дБА.

Индекс приведенного уровня ударного шума  $I_U$  (дБ) под перекрытием с известной (рассчитанной или измерен-

Определение индекса изоляции воздушного шума перегородкой

Частота, Гц	Определенные экспериментальным путем значения звукоизоляции, дБ	Нормативные значения звукоизоляции, дБ (по графику I рис. 44)	Отклонение экспериментальных значений от нормативных, дБ	Значения звукоизоляции по нормативной кривой, сдвинутой вниз на 11 дБ	Отклонение экспериментальных значений от нормативных, дБ
1	2	3	4	5	6
100	27	27	0	16	11
125	25	32	— 7	21	4
160	31	37	— 6	26	5
200	38	42	— 4	31	7
250	37	45	— 8	34	3
320	40	48	— 8	37	3
400	41	51	—10	40	1
500	42	53	—11	42	0
630	37	55	—18	44	—7
800	37	56	—19	45	—8
1000	42	56	—14	45	—3
1250	45	56	—11	45	0
1600	45	56	—11	45	0
2000	45	56	—11	45	3
2500	47	55	— 8	44	3
3200	46	54	— 8	43	3
4000	46	52	— 6	41	5
5000	48	50	— 2	39	9

ной) частотной характеристикой звукоизоляции определяют по формуле

$$I_y = 70 - \Delta_y, \quad (72)$$

где  $\Delta_y$  — поправка, определяемая путем сравнения частотной характеристики приведенного уровня ударного шума под перекрытием с нормативной частотной характеристикой приведенного уровня ударного шума. Нормативная частотная характеристика приведенного уровня ударного шума не изменилась (см. рис. 53).

Поправку  $\Delta_y$  определяют аналогично  $\Delta_b$ , за исключением того, что среднее неблагоприятное значение принимается равным не  $1/18$ , а  $1/16$  суммы неблагоприятных отклонений, причем неблагоприятными отклонениями считаются отклонения вверх от нормативной кривой. Поправка  $\Delta_y$  практически равна показателю изоляции ударного шума  $E_y$ .

## ИЗОЛЯЦИЯ ВОЗДУШНОГО ШУМА ОГРАЖДАЮЩИМИ КОНСТРУКЦИЯМИ

### § 18. ЗВУКОИЗОЛЯЦИЯ ОДНОСЛОЙНЫМИ КОНСТРУКЦИЯМИ

Под однослойными конструкциями подразумеваются конструкции, состоящие из одного или нескольких слоев, жестко связанных друг с другом.

Согласно (46), отношение энергии, прошедшей через конструкцию, к энергии, падающей на нее, называется коэффициентом звукопередачи  $\tau$ . Изоляция воздушного шума (дБ) конструкцией без учета косвенной передачи при диффузном падении звука равна

$$R = 10 \lg \frac{1}{\tau}. \quad (73)$$

Основное влияние на передачу звука оказывают изгибные волны. Они образуются, если толщина конструкции меньше  $\frac{1}{6}$  длины волны изгиба на рассматриваемой частоте. Ограждающие конструкции удовлетворяют этому условию во всем нормируемом диапазоне частот. В этом диапазоне длины изгибных волн меньше линейных размеров конструкций, поэтому в качестве модели однослойной конструкции может служить тонкая пластина бесконечной протяженности.

Звуковые волны, падающие на конструкцию, приводят ее в колебательное движение. На низких частотах вблизи частот собственных колебаний конструкции возникают резонансные явления и звукоизоляция во многом зависит от внутреннего трения в материале. Для ограждающих конструкций зданий этот диапазон не характерен, так как он лежит ниже частоты 100 Гц. На более высоких частотах колебательное движение конструкции определяется в основном ее массой (*закон массы*), когда конструкцию можно рассматривать в виде системы не связанных между собой масс, колеблющихся независимо одна от другой, т. е. влиянием жесткости конструкции можно пренебречь. При удвоении массы конструкции или частоты звукоизоляция возрастает в среднем на 6 дБ.

Для легких конструкций данные экспериментальных исследований во многих случаях существенно меньше

расчетных. Это явление нашло свое объяснение в теории так называемых *волновых совпадений*.

Падающие звуковые волны вызывают изгибные колебания конструкции, так как звуковое давление неодинаково в различных точках поверхности. Конструкция предполагается бесконечной протяженности и возбуждается диффузным звуковым полем. Скорость распространения изгибных волн зависит от механических свойств среды и частоты в противоположность скорости продольных колебаний, не зависящей от частоты и постоянной для данной среды (например, для воздуха  $c = 340$  м/с). При низких частотах скорость распространения изгибных волн меньше скорости звука. В конструкции имеют место слабые вынужденные колебания с незначительным излучением звуковой энергии. С увеличением частоты  $f$  уменьшается длина звуковой волны  $\lambda$ , так как  $\lambda = c/f$ . Наконец, при определенной частоте  $f_{гр}$  (*границная частота*) длина изгибной волны  $\lambda_{изг}$  будет равна проекции длины волны  $\lambda$ , т. е. произойдет совпадение волн (волновое совпадение), при котором интенсивность изгибных колебаний резко увеличится. При изменении частоты звука волновое совпадение может быть восстановлено на других углах падения звуковой волны.

Следовательно, волновые совпадения возникают при равенстве геометрических размеров проекций длин звуковой волны на конструкцию и длины волны изгибных колебаний конструкции. При волновом совпадении распределение давления в падающей волне вдоль конструкции точно соответствует распределению амплитуд ее собственных колебаний для той же частоты, что и приводит к интенсивному росту колебаний. Граничную частоту  $f_{гр}$  (Гц) для сплошных плит, начиная с которой может возникнуть волновое совпадение, можно определить по формуле

$$f_{гр} = c^2 / 1,8c_1h, \quad (74)$$

где  $c$  — скорость звука и воздуха, м/с;  $c_1$  — скорость распространения продольных звуковых волн в конструкции, м/с;  $h$  — толщина конструкции, м.

Скорость (м/с) в пластине равна

$$c_1 = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\mu^2)}}, \quad (75)$$

где  $E$  — модуль упругости, кгс/м<sup>2</sup> (Па) ( $1 \text{ кгс/м}^2 \approx 10 \text{ Па}$ );  $\mu$  — коэффициент Пуассона;  $\rho = m/g$  — плотность среды, кг·с<sup>2</sup>/м<sup>4</sup> (здесь  $m$  — масса единицы объема, кг/м<sup>3</sup>);  $g$  — ускорение силы тяжести ( $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ).

**Пример.** Определить граничную частоту для бетонной плиты толщиной 100 мм.

Из табл. 1 прилож. II находим  $c_1 = 3700 \text{ м/с}$ . По формуле (74)

$$f_{\text{гр}} = \frac{3402}{1,8 \cdot 3700 \cdot 0,1} = 174 \text{ Гц.}$$

При увеличении толщины плиты в два раза  $f_{\text{гр}} = 87 \text{ Гц}$ .

Размеры конструкций и их закрепление оказывают меньшее влияние на звукоизоляцию, чем толщина.

В случае шарнирного опирания конструкции по краям на частотах  $f > 2f_{\text{гр}}$  звукоизоляция равна

$$R = 20 \lg \frac{\pi f \rho}{\rho_0 c} + 5 \lg \frac{f}{f_{\text{гр}}} + 10 \lg \eta + 3, \quad (76)$$

где  $\rho$  — поверхностная плотность (масса 1 м<sup>2</sup> конструкции), кг/м<sup>2</sup>;  $\rho_0 c = 41 \text{ МПа} \cdot \text{с/м}$  (см. § 3);  $\eta$  — коэффициент потерь, характеризующий внутреннее трение в материале конструкции.

Волновое совпадение, при котором звукоизоляция резко уменьшается, охватывает область частот от  $f_{\text{гр}}$  до  $2f_{\text{гр}}$ , т. е. примерно в пределах одной октавы. На рис. 45 видно уменьшение звукоизоляции в интервале 500—1000 Гц вследствие явления волнового совпадения.

При  $f > f_{\text{гр}}$  существенное значение имеет цилиндрическая жесткость конструкции при изгибе  $D$  (кгс·см), равная

$$D = \frac{E h^3}{12(1 - \mu^2)}, \quad (77)$$

где  $E$  — модуль упругости материала, кгс/см<sup>2</sup> ( $1 \text{ кгс/см}^2 \approx 10^5 \text{ Па}$ );  $h$  — толщина конструкции, см;  $\mu$  — коэффициент Пуассона.

Частота  $f_{\text{гр}}$  связана с цилиндрической жесткостью зависимостью

$$f_{\text{гр}} = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\rho h / D}. \quad (78)$$

Рост звукоизоляции (при  $f > f_{\text{гр}}$ ) с повышением частоты составляет около 7,5 дБ на октаву, т. е. несколько выше, чем по закону массы (6 дБ на октаву).

Характерная частотная зависимость звукоизоляции дает возможность для достаточно простого графо-аналитического расчета. Частотная характеристика разбивается на три области. В первой области (на низких и средних частотах) звукоизоляция определяется массой, однако наклонная кривая, характеризующая рост звукоизоляции, заменена на горизонтальную, учитывающую ухудшение звукоизоляции вследствие явления волнового совпадения. Во второй области звукоизоляция быстро возрастает — 7,5 дБ на октаву. В третьей области —

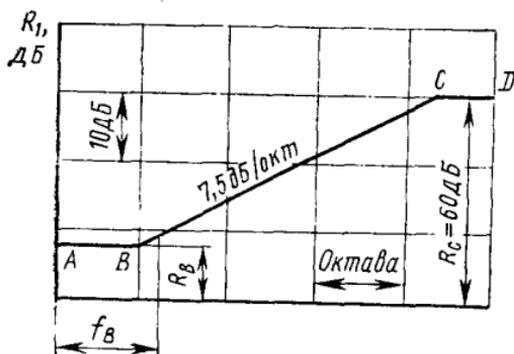


Рис. 46. Частотная характеристика изоляции воздушного шума однослойной конструкцией

снова горизонтальный участок (рис. 46). Данный метод применим для однослойных ограждающих конструкций из бетона, железобетона, кирпича, керамических блоков, гипсобетона и подобных материалов поверхностной плотностью от 100 до 1000 кг/м<sup>2</sup>. Расчет звукоизоляции осуществляется в такой последовательности. Определяют координаты точки *B* ( $f_B$  и  $R_B$ ) частотной характеристики по графикам рис. 47:  $f_B$  — в зависимости от толщины  $h$  (м) конструкции (рис. 47, а) и  $R_B$  — в зависимости от поверхностной плотности  $p$  (кг/м<sup>2</sup>) (рис. 47, б). Из точки *B* (рис. 46) влево проводится прямая до пересечения с осью координат, а из точки *B* вправо — отрезок *BC* с наклоном 7,5 дБ на октаву до точки *C* с ординатой  $R_C = 60$  дБ; из точки *C* вправо проводится горизонтальная прямая *CD*. Далее полученную характеристику звукоизоляции сравнивают с нормативной кривой (см. рис. 44) и определяют индекс изоляции воздушного шума (см. § 17).

**Пример.** Определить индекс изоляции воздушного шума железобетонной панелью толщиной 140 мм (поверхностная плотность составляет 336 кг/м<sup>2</sup>).

Определяем координаты точки *B* по рис. 47. При  $\gamma = 2400 > 1800$  кг/м<sup>3</sup> используем прямую 1 и  $f_B = 260$  Гц. При  $p = 336$  кг/м<sup>2</sup>  $R_B = 38,5$  дБ. Строим частотную характеристику звукоизоляции на рис. 48 и наносим нормативную кривую. Результаты расчета сведем в табл. 14.

Сумма неблагоприятных отклонений (гр. 4) равняется 49,5. Среднее неблагоприятное отклонение составляет  $49,5 : 18 = 2,75 > 2$  дБ. Смещаем нормативную кривую вниз на 2 дБ (гр. 5). Сумма неблагоприятных отклонений после смещения вниз на 2 дБ (гр. 6) равняется 33. Среднее неблагоприятное отклонение равно  $33 : 18 = 1,8 < 2$  дБ. Следовательно, поправка  $\Delta_B = -2$  дБ, а индекс изоляции воздушного шума равен  $I_B = 50 + \Delta_B = 50 - 2 = 48$  дБ.

Для ориентировочной оценки индекса изоляции воздушного шума однослойными ограждающими конструкциями из материалов, указанных выше, можно использовать формулы:

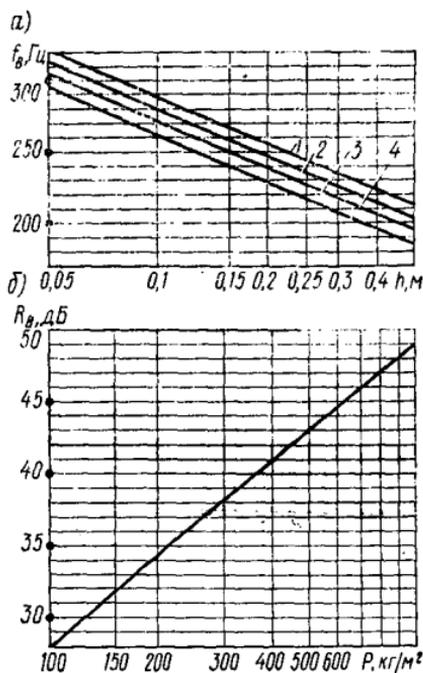
при  $\rho \geq 200$  кг/м<sup>2</sup>

$$I_B = 23 \lg \rho_0 - 10 \text{ дБ}, \quad (79)$$

при  $\rho \leq 200$  кг/м<sup>2</sup>

$$I_B = 13 \lg \rho_0 + 13 \text{ дБ}, \quad (80)$$

Рис. 47. Графики для определения координат точки В:  
а — значения  $f_B$  в зависимости от  $h$ ; 1 — объемная масса  $\gamma > 1800$  кг/м<sup>3</sup>; 2 —  $\gamma = 1600$  кг/м<sup>3</sup>; 3 —  $\gamma = 1400$  кг/м<sup>3</sup>; 4 —  $\gamma < 1200$  кг/м<sup>3</sup>; б — значения  $R_B$  в зависимости от  $\rho$



где  $\rho_0 = k\rho$  — эквивалентная поверхностная плотность, кг/м<sup>2</sup>;  $k$  — коэффициент для сплошных конструкций из материалов  $\gamma > 1800$  кг/м<sup>3</sup>  $k = 1$ ; для конструкций из бетонов на гипсовом вяжущем  $\gamma = 1200 \div 1300$  кг/м<sup>3</sup>  $k = 1,25$ ; для конструкций из бетона и железобетона с круглыми пустотами  $\gamma > 1800$  кг/м<sup>3</sup>  $k$  определяют по формуле

$$k = 1,86 \sqrt[4]{\frac{I}{bh_{пр}^3}}, \quad \text{где } I \text{ — момент инерции сечения, м}^4;$$

$b$  — ширина рассматриваемого сечения, м;  $h_{пр}$  — приведенная толщина сечения, м; для конструкций из бетонов на пористых заполнителях и цементном вяжущем  $k$  определяют по формуле  $k = 2,26 \sqrt{E/m^3}$ , где  $E$  — модуль упругости материала, кгс/м<sup>2</sup> ( $1 \text{ кгс/м}^2 \approx 10 \text{ Па}$ );  $m$  — масса единицы объема, кг/м<sup>3</sup>.

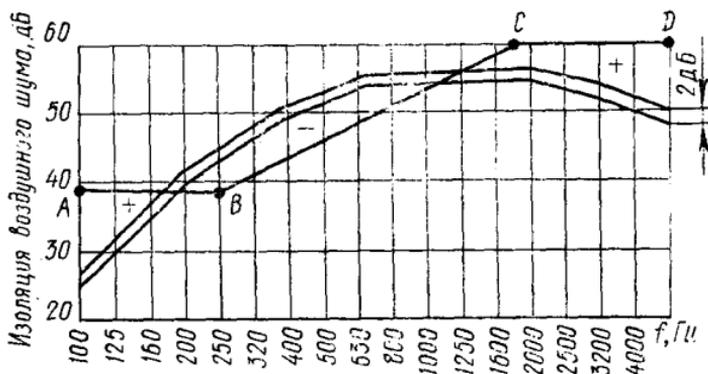


Рис. 48. Определение индекса изоляции воздушного шума железобетонной панелью толщиной 140 мм

Таблица 14

Определение индекса изоляции воздушного шума

Частота, Гц	Вычисленные значения звукоизоляции, дБ	Нормативные значения звукоизоляции, дБ	Отклонение вычисленных значений от нормативных, дБ	Значение звукоизоляции по нормативной кривой, сдвинутой вниз на 2 дБ	Отклонение вычисленных значений от нормативных, дБ
100	38,5	27	11,5	25	13,5
125	38,5	32	6,5	30	8,5
160	38,5	37	1,5	35	3,5
200	38,5	42	-3,5	40	-1,5
250	38,5	45	-6,5	43	-4,5
320	40	48	-8	46	-6
400	43	51	-8	49	-6
500	45,5	53	-7,5	51	-5,5
630	48	55	-7	53	-5
800	50,5	56	-5,5	54	-3,5
1000	53	56	-3	54	-1
1250	55,5	56	-0,5	54	1,5
1600	58	56	2	54	4
2000	60	56	4	54	6
2500	60	55	5	53	7
3200	60	54	6	52	8
4000	60	52	8	50	10
5000	60	50	10	48	12

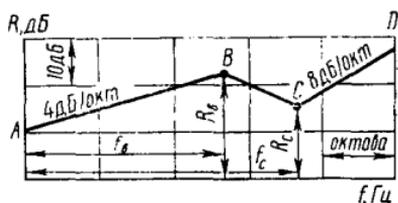
Пример. Ориентировочно оценить изоляцию воздушного шума железобетонной панелью толщиной 140 мм.

Так как  $\rho = 336 \text{ кг/м}^2$  (см. предыдущий пример), то  $I_B$  определяем по формуле (79). Для железобетона  $k=1$  и  $\rho_0 = \rho$ ;  $I_B = 23 \lg 336 - 10 = 58 - 10 = 48 \text{ дБ}$ . В данном случае результат совпал с более точным расчетом.

Если конструкция выполнена из стекла, металла или других материалов, изоляция воздушного шума также определяется графо-аналитическим методом, однако форма частотной характеристики звукоизоляции иная, чем на рис. 46.

Частотная характеристика звукоизоляции состоит из трех прямолинейных отрезков:  $AB$ ,  $BC$  и  $CD$  (рис. 49).

Рис. 49. Частотная характеристика изоляции воздушного шума однослойным плоским ограждением из стекла, металла



Координаты точек  $B$  и  $C$  определяют по табл. 15. Наклон отрезка  $BA$  принимают равным 5 дБ на октаву для глухих однослойных конструкций из органического и силикатного стекла и 4 дБ на октаву для конструкций из других материалов. Наклон отрезка  $CD$  составляет 8 дБ на октаву. Ордината  $R_C$  всегда меньше  $R_B$  вследствие явления волнового совпадения.

Таблица 15

Координаты точек  $B$  и  $C$  для построения частотной характеристики звукоизоляции

Материал	$f_B$ , Гц	$f_C$ , Гц	$R_B$ , дБ	$R_C$ , дБ
Сталь	$6\,000/h$	$12\,000/h$	39	31
Алюминиевые сплавы	$6\,000/h$	$12\,000/h$	32	22
Стекло силикатное	$6\,000/h$	$12\,000/h$	35	29
Стекло органическое	$17\,000/h$	$34\,000/h$	37	30
Асбестоцементные листы	$11\,000/h$	$22\,000/h$	36	30
Сухая штукатурка	$19\,000/h$	$38\,000/h$	36	30

Примечание.  $h$  — толщина ограждения (без учета ребер), мм.

Пример. Найти частотную характеристику изоляции воздушного шума силикатным стеклом толщиной 4 мм.

По табл. 15 определяем координаты точек  $B$  и  $C$ :  $f_B = 6000/4 = 1500$  Гц,  $f_C = 12\,000/4 = 3000$  Гц,  $R_B = 35$  дБ,  $R_C = 29$  дБ. На рис. 50 дано построение частотной характеристики изоляции воздушного шума.

Рассмотренные графо-аналитические методы оценки изоляции воздушного шума имеют большую точность на частотах выше  $f_{гр}$ . На частотах ниже  $f_{гр}$  отличия от действительной звукоизоляции зависят, в частности, от размеров конструкций. Проф. М. С. Седов нашел, что для конструкций ограниченного размера между резонансными частотами происходит затухание колебаний, снижающее интенсивность прохождения звука. Был установлен

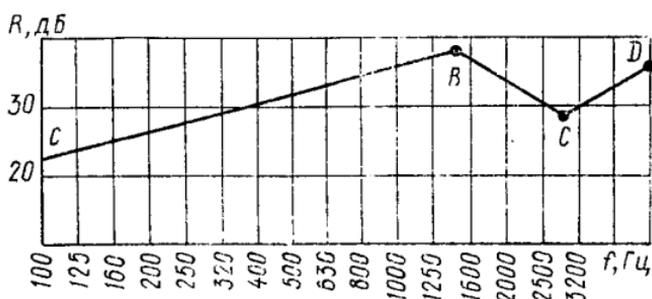


Рис. 50. Частотная характеристика изоляции воздушного шума силикатным стеклом толщиной 4 мм

эффект «пространственно-частотных резонансов», более полно характеризующий механизм прохождения звука через конструкцию, чем явление волнового совпадения. В области средних и низких частот звукоизоляция зависит от массы, частоты звука и в отличие от закона массы оценивается коэффициентом потерь и размерами ограждения. Звукоизоляция увеличивается для конструкций с неизменной изгибной жесткостью, но с повышенным значением коэффициента потерь. Увеличение размеров конструкции несколько повышает ее звукоизоляцию [11].

### § 19. ЗВУКОИЗОЛЯЦИЯ МНОГОСЛОЙНЫМИ КОНСТРУКЦИЯМИ

К многослойным конструкциям относятся стены с гибкими плитами на отnose, отдельные (двойные) конструкции, междуэтажные перекрытия.

Применение конструкций с гибкими плитами на отnose основано на меньшем излучении звука плитами при частотах ниже граничной частоты. Вблизи плиты образуется звуковое поле, в котором происходит периодическое перераспределение энергии из участка среды, при-

легающего к одной полуволне колеблющейся плиты, в участок среды, прилегающий к соседней полуволне, и обратно. Энергия, излучаемая плитой, не уносится звуковой волной, а остается «связанной» с плитой в виде кинетической энергии, присоединенной к плите массы некоторого объема среды. Поэтому, несмотря на наличие *акустических мостиков*, связывающих плиты со стеной, звукоизоляция конструкцией существенно возрастает.

В качестве плит на отnose могут использоваться, например, плиты гипсовой сухой штукатурки, древесностружечные плиты и т. п., прибываемые к деревянным рейкам каркаса. Для уменьшения передачи звука между рейками и стеной предусматриваются звукоизоляционные прокладки. Большое влияние на звукоизоляцию оказывают косвенные пути передачи звука. Снижение звукоизоляции однослойной конструкцией в зданиях за счет косвенной передачи звука составляет в среднем 2 дБ, для отдельных перегородок — 7—8 дБ, а для междуэтажных перекрытий с полами на упругом основании — еще выше. Поэтому практические методы расчета (проф. В. И. Заборов) основаны на большом влиянии косвенной передачи звука на звукоизоляцию ограждающими конструкциями.

Частотная характеристика изоляции воздушного шума стеной с плитами на отnose с двух сторон определяется в такой последовательности. По значениям поверхностной плотности несущей плиты перекрытия  $p_1$  и поперечной стены или перегородки  $p_2$  определяют величину

$$m = p_1/p_2. \quad (81)$$

Величину  $\beta$  находят по формуле

$$\beta = m \sqrt{\left(\frac{c_1 h_1}{c_2 h_2}\right)^3}, \quad (82)$$

где  $c_1$  и  $c_2$  — скорости продольных волн соответственно в несущей плите перекрытия и поперечной стене или перегородке, м/с, принимаемые по табл. 1 прилож. 2,  $h_1$  и  $h_2$  — толщины соответственно несущей плиты перекрытия и поперечной стены или перегородки, м.

Определяют поправку  $\Delta R$ , улучшающую звукоизоляцию за счет гибких плит на отnose, в зависимости от величин  $m$  и  $\beta$  по графику на рис. 51. Поправку  $\Delta R$  при-

бавляют к значениям частотной характеристики изоляции воздушного шума конструкцией, рассчитанной в соответствии с § 18 данного пособия. При устройстве гибкой плиты на отnose с одной стороны стены значение  $\Delta R$  следует принимать равным  $2/3$  от значения, определенного по графику рис. 51.

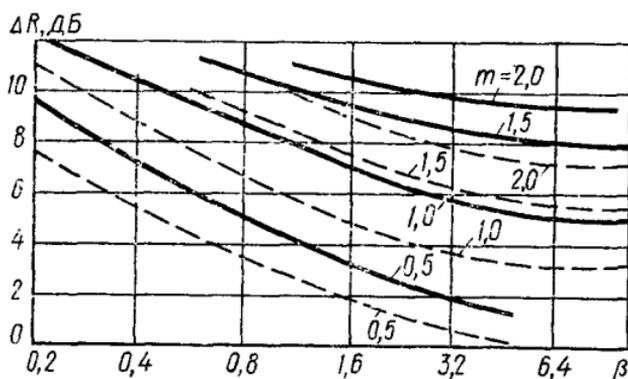


Рис. 51. График для определения повышения изоляции воздушного шума стеной при устройстве гибких плит на отnose с обеих сторон. Сплошные линии — перекрытие с полом на упругом основании, пунктирные — перекрытие без пола на упругом основании

**Пример.** Определить индекс изоляции воздушного шума железобетонной панелью толщиной 140 мм с гибкими плитами на отnose с двух и с одной стороны. Междуэтажное перекрытие состоит из несущей железобетонной плиты толщиной 140 мм и пола не на упругом основании (линолеум).

По формуле (81) находим  $m=336/336=1$ ;

$$\text{По формуле (82), } \beta = 1 \sqrt{\left(\frac{3700 \cdot 0,14}{3700 \cdot 0,14}\right)^3} = 1.$$

По графику рис. 51 определяем  $\Delta R=6$  дБ. К значениям частотной характеристики изоляции воздушного шума (см. пример в § 18), приведенным на рис. 48, добавляем  $\Delta R=6$  дБ при устройстве двух плит и  $2/3 \Delta R=4$  дБ при одной плите (рис. 52). Не приводя результатов вычислений, для панели с двумя плитами на отnose получаем значение индекса изоляции воздушного шума, равное 54 дБ, а с одной плитой — 52 дБ.

Звукоизоляция отдельной перегородкой на низких частотах равна звукоизоляции однослойной конструкцией с суммарной массой двух элементов. На этих частотах отдельная конструкция не имеет преимуществ перед

однослойной, если определять звукоизоляцию по закону массы. Кроме того, возможно даже некоторое понижение звукоизоляции вследствие резонанса конструкции, представляющей собой систему двух масс, соединенных упругостью воздушного промежутка. В качестве упругой связи может быть и мягкий звукопоглотитель.

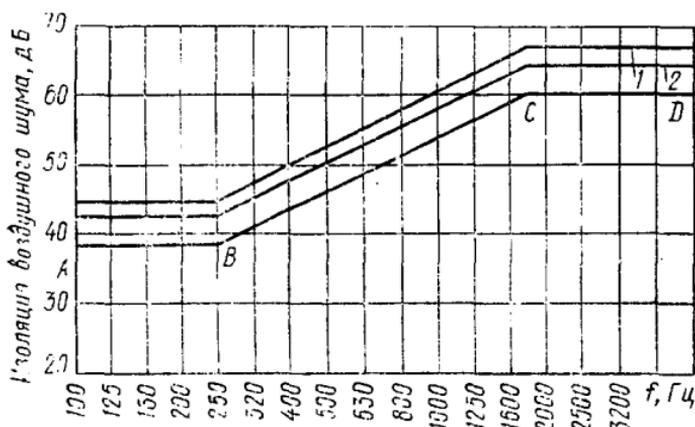


Рис. 52. Определение индекса изоляции воздушного шума железобетонной панелью толщиной 140 мм с гибкими плитами на относе:  
1 — при устройстве двух плит; 2 — при устройстве одной плиты

Если не учитывать жесткую связь по контуру элементов, можно определить частоту собственных колебаний такой системы (Гц) по формуле

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{kg}{p_1} + \frac{kg}{p_2}} = 0,5 \sqrt{\frac{E_d(p_1 + p_2)}{hp_1p_2}}, \quad (83)$$

где  $p_1$  и  $p_2$  — поверхностные плотности соответственно первого и второго элементов, кг/м<sup>2</sup>;  $k = E_d/h$  — приведенный коэффициент жесткости упругого слоя, кгс/м<sup>3</sup> (Па/м);  $E_d$  — динамический модуль упругости материала упругого слоя, кгс/м<sup>2</sup> (Па);  $h$  — толщина слоя, м.

С повышением частоты в характеристике звукоизоляции наблюдаются последовательные минимумы и максимумы. Ухудшение звукоизоляции вызывается резонансами слоя воздуха между элементами конструкции; оно может быть уменьшено введением в воздушный промежуток звукопоглощающего материала. Эффективность звукопоглотителя повышается с уменьшением массы конст-

рукции. Очень большое влияние на звукоизоляцию раздельными перегородками и особенно на частотах выше граничной оказывает косвенная передача звука через жесткие места сопряжения перегородок с междуэтажными перекрытиями. Поэтому улучшение звукоизоляции такими конструкциями практически мало зависит от толщины воздушного промежутка (при  $h \geq 40$  мм) и составляет в среднем 6 дБ.

С точки зрения звукоизоляции наиболее целесообразными являются раздельные перегородки, имеющие плиты одинаковой массы, но с различными жесткостями при изгибе, отличающимися в 6—7 раз. Этого можно достичь применением материалов с различной объемной массой, различных толщин плит, а также изменением жесткости плит конструктивным путем (ребра, впадины и т. п.). Однако эти вопросы еще находятся в стадии теоретической и практической разработки. Высокая звукоизоляция может быть получена для многослойных конструкций, состоящих из отдельных слоев различной плотности и массы и с большими потерями на внутреннее трение. Такие конструкции широко применяются на транспорте; в строительстве они не нашли еще достаточного распространения. Инженерные методы расчета звукоизоляции многослойными конструкциями пока не созданы и основным методом оценки звукоизоляции является экспериментальный. Для некоторых типов конструкций разработаны программы для расчета на ЭВМ коэффициента звукопередачи.

Изоляция воздушного шума междуэтажными перекрытиями в основном определяется несущей плитой. Конструкция пола практически всегда повышает звукоизоляцию, за исключением некоторых типов рулонных покрытий. Так, при настилке на железобетонную плиту толщиной 220 мм линолеума на войлочной подоснове индекс изоляции воздушного шума ухудшается на 1—3 дБ. Это явление объясняется следующим. Слоистые линолеумы состоят из верхнего жесткого слоя износа и упругого слоя подосновы и их можно рассматривать в виде системы «масса — упругость». В области частот собственных колебаний пола происходит довольно существенное ухудшение звукоизоляции. Это ухудшение в резонансной области пропорционально потерям на внутреннее трение в упругом слое. Для улучшения звукоизоляционных свойств слоистых линолеумов необходимо из-

менить массу и жесткость слоев износа и подосновы, т. е. изменить частоту собственных колебаний пола. При увеличении этой частоты расширится интервал между ней и граничной частотой для несущей плиты и изоляция воздушного шума увеличится.

Индекс изоляции воздушного шума  $I_B$  междуэтажным перекрытием с полом на упругом основании определяется по табл. 2 прилож. II в зависимости от величины индекса изоляции воздушного шума несущей плитой перекрытия  $I_{B0}$ . Индекс  $I_{B0}$  определяется так же, как определялся индекс  $I_B$  для однослойных конструкций (§ 18). Параметром, определяющим  $I_B$ , является также собственная частота колебаний пола (масса — упругость — масса), см. (83). Здесь  $p_1$  будет представлять собой поверхностную плотность несущей плиты перекрытия, а  $p_2$  — конструкции пола.

Толщину упругого (звукоизоляционного) слоя  $h$  в обжатом состоянии ( $m$ ) определяют по формуле

$$h = h_0(1 - \varepsilon), \quad (84)$$

где  $h_0$  — толщина упругого слоя в необжатом состоянии, м;  $\varepsilon$  — относительное сжатие материала упругого слоя под нагрузкой, принимаемое по табл. 3 прилож. II.

**Пример.** Определить индекс изоляции воздушного шума междуэтажным перекрытием, состоящим из несущей железобетонной плиты толщиной 140 мм и деревянного пола по лагам, уложенным на упругие прокладки из мягких древесноволокнистых плит толщиной 25 мм.

Индекс изоляции воздушного шума несущей плитой  $I_{B0} = 48$  дБ (см. примеры в § 18).

Толщину мягкой древесноволокнистой плиты в обжатом состоянии находим по формуле (84):

$$h = 0,025(1 - 0,15) = 0,021 \text{ м.}$$

Значение  $\varepsilon$  взято из табл. 3 прилож. II при нагрузке  $1000 \text{ кгс/м}^2$  (10 кПа).

Собственная частота колебаний пола на упругом слое по формуле (83) равна

$$f_0 = 0,5 \sqrt{\frac{12 \cdot 10^4 (336 + 30)}{0,021 \cdot 336 \cdot 30}} = 228 \text{ Гц.}$$

Поверхностная плотность пола по лагам принята равной  $p = 30 \text{ кг/м}^2$ , а значение  $E_d$  взято из табл. 3 прилож. II. По значениям  $f_0 = 228 \text{ Гц}$  и  $I_{B0} = 48$  дБ по табл. 2 прилож. II находим, что индекс изоляции воздушного шума равен  $I_B = 51$  дБ. Если это перекрытие

предназначается для жилого здания, то оно удовлетворяет нормативным требованиям изоляции воздушного шума, так как  $I_B$  нормативное составляет 50 дБ (см. [13]).

## § 20. ЗВУКОИЗОЛЯЦИЯ КОНСТРУКЦИЯМИ С ПРОЕМАМИ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЩЕГО УРОВНЯ ЗВУКОВОГО ДАВЛЕНИЯ В ПОМЕЩЕНИИ

Окна и двери из-за небольшой массы и малой герметичности всегда имеют худшую звукоизоляцию, чем ограждающие конструкции. Общая звукоизоляция конструкции  $R_{\text{общ}}$  может быть определена по формуле (85). Расчет производят в октавных или третьоктавных полосах частот, однако для ориентировочной оценки достаточно определить среднее значение звукоизоляции (дБ):

$$R_{\text{общ}} = R - 10 \lg \frac{\frac{S}{S_1} + 10^{\frac{R-R_1}{10}}}{1 + S/S_1}, \quad (85)$$

где  $R$  — звукоизоляция основной части конструкции, дБ;  $S$  — площадь основной части конструкции, м<sup>2</sup>;  $S_1$  — площадь окон или дверей, м<sup>2</sup>;  $R_1$  — звукоизоляция окон или дверей, дБ.

**Пример.** В стене из гипсобетона толщиной 8 см, разделяющей две комнаты, и площадью 20 м<sup>2</sup> имеется одинарная дверь площадью 2 м<sup>2</sup>. Требуется определить общую среднюю звукоизоляцию стеной с дверью.

Поверхностная плотность стены составляет около 100 кг/м<sup>2</sup>. По формуле (79),  $R = 13 \lg \rho k + 13 = 13 \lg 100 \cdot 1,25 + 13 \approx 40$  дБ. Для двери  $R$  составляет около 20 дБ:

$$R_{\text{общ}} = 40 - 10 \lg \frac{\frac{18}{2} + 10^{\frac{40-20}{10}}}{1 + \frac{18}{2}} \approx 30 \text{ дБ.}$$

Общая звукоизоляция стеной при наличии двери уменьшилась на 10 дБ.

Звукоизоляция ограждающими конструкциями снижается при наличии отверстий, щелей. Это снижение определяется в основном отношением размеров отверстий к длине падающей звуковой волны; если это отношение близко к 1, то прошедшая через отверстие звуковая энергия пропорциональна площади отверстия.

Общую звукоизоляцию конструкции при наличии подобных отверстий или открытых проемов (дБ) определяют по формуле

$$R_{\text{общ}} = R - 10 \lg \frac{1 + \frac{S_1}{S} 10^{R/10}}{1 + S_1/S}, \quad (86)$$

где обозначения аналогичны формуле (85).

**Пример.** Определить звукоизоляцию наружной стеной с окном (при закрытом и открытом окне) при следующих данных:  $R=50$  дБ,  $S=10$  м<sup>2</sup>;  $R_1=30$  дБ;  $S_1=2,5$  м<sup>2</sup>.

По формуле (85) определяем  $R_{\text{общ}}$  при закрытом окне:

$$R_{\text{общ}} = 50 - 10 \lg \frac{\frac{10}{2,5} + 10^{\frac{50-30}{10}}}{1 + 10/2,5} = 37 \text{ дБ.}$$

По формуле (86) определяем  $R_{\text{общ}}$  при открытом окне:

$$R_{\text{общ}} = 50 - 10 \lg \frac{1 + (2,5/10) 10^{50/10}}{1 + 2,5/10} = 7 \text{ дБ.}$$

Из формулы (86) следует, что чем больше  $R$ , тем больше ухудшение звукоизоляции будет иметь место при наличии отверстий или открытых проемов. Поэтому при  $S_1/S \ll 1$  значение  $R_{\text{общ}}$  (дБ) будет практически равно

$$R_{\text{общ}} = 10 \lg \frac{S}{S_1}. \quad (87)$$

Так, в рассмотренном примере  $R_{\text{общ}} = 10 \lg \frac{10}{2,5} = 6$  дБ, что примерно соответствует полученной по формуле (86) величине.

При наличии нескольких источников шума, расположенных за различными ограждающими конструкциями, необходимо определить общий уровень звукового давления в рассматриваемом помещении. Этот уровень равен

$$L = 10 \lg \sum_{i=1}^n S_i \cdot 10^{\frac{L_i - R_i}{10}} - 10 \lg A \text{ дБ}, \quad (88)$$

где  $S_i$  — площади ограждающих конструкций, м<sup>2</sup>;  $L_i$  — уровни звукового давления за конструкциями, дБ;  $R_i$  — звукоизоляция конструкциями, дБ;  $A$  — эквивалентная площадь звукопоглощения в помещении, м<sup>2</sup> (см. § 8).

Для практических целей бывает достаточным определение не частотной характеристики уровней звукового давления, а средних значений  $L$ .

**Пример.** Определить средний уровень звукового давления в помещении при  $A=20 \text{ м}^2$ , если наружная стена с окном выходит на шумную магистраль. За внутренними стенами находятся источники шума одинаковой интенсивности. Характеристики всех ограждающих конструкций приведены в табл. 16.

Таблица 16

Характеристики конструкций

Наименование ограждающих конструкций	$S_i, \text{ м}^2$	$R_i, \text{ лБ}$	$L_i, \text{ лБ}$	$S_i \cdot 10^{\frac{L_i - R_i}{10}}$
Наружная стена	10	50	90	$10 \cdot 10^4$
Окно	2,5	30	90	$250 \cdot 10^4$
Внутренние стены	40	40	70	$4,0 \cdot 10^4$
Дверь	2	20	70	$20 \cdot 10^4$

Определяем  $\sum_{i=1}^n S_i \cdot 10^{\frac{L_i - R_i}{10}} = 284 \cdot 10^4$ ;  $L = 10 \lg 284 \cdot 10^4 - 10 \lg 20 = 64,5 - 13 = 51,5 \text{ дБ}$ .

Наибольшее количество звуковой энергии проникает через окно. Если бы окно обладало такой же звукоизоляцией, что и наружная стена, тогда  $L = 10 \lg 18,5 \cdot 10^4 - 10 \lg 20 = 53 - 13 = 40 \text{ дБ}$ , т. е. средний уровень звукового давления уменьшился бы на 11,5 дБ.

Из формулы (88) видно, что уменьшение шума в помещении может быть получено за счет увеличения звукоизоляции конструкциями начиная с более звукопроводных; уменьшения площадей ограждения, отделяющих более шумные помещения; увеличения звукопоглощения в изолируемом помещении.

#### УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ РАБОТА

1. В § 18 было показано большое влияние на звукоизоляцию граничной частоты. С уменьшением толщины конструкции  $f_{гр}$  смещается в сторону средних частот и за счет явления волнового совпадения звукоизоляция может существенно ухудшаться. Для уменьшения влияния волнового совпадения на звукоизоляцию необходимо повышение  $f_{гр}$  в сторону высоких частот. Другой путь увеличения  $f_{гр}$  состоит в использовании материалов с малой изгибной жесткостью или уменьшении ее конструктивным путем.

Проанализировать влияние  $f_{гр}$  и цилиндрической жесткости на изменение изоляции воздушного шума, сравнив расчетные характеристики с нормативной.

2. Аналогичный анализ провести для толстых массивных конструкций и доказать целесообразность понижения  $f_{гр}$  для увеличения изоляции воздушного шума, связав изменение  $f_{гр}$  с изменением  $D$ .

3. Провести анализ влияния толщины конструкции и ее поверхностной плотности на изменение изоляции воздушного шума. Оценить, что лучше (с точки зрения звукоизоляции): меньшая толщина конструкции при большей объемной массе или, наоборот, при  $\rho = \text{const}$ .

4. Используя формулу (79), оценить изоляцию воздушного шума пустотными панелями и панелями сплошного сечения при  $\rho = \text{const}$  и объяснить различие в звукоизоляции.

5. Используя теорию расчета звукоизоляции, разработанную проф. М. С. Седовым [11], оценить изоляцию воздушного шума однослойными конструкциями на низких частотах и сравнить результаты расчета с графо-аналитическим методом, изложенным в § 18. Это задание требует большей затраты труда на изучение нового метода расчета и может быть рекомендовано в качестве работы по линии СНО.

6. Проанализировать влияние величин  $m$  и  $\beta$  на изменение  $\Delta R$  — поправки, улучшающей звукоизоляцию конструкциями с гибкими плитами на отnose.

7. Оценить улучшение изоляции воздушного шума при увеличении поверхностной плотности и при устройстве гибких плит на отnose.

8. Оценить, как влияет пол на упругом основании на изменение  $\Delta R$  при устройстве гибких плит на отnose.

9. Проанализировать влияние частоты собственных колебаний раздельной конструкции, а также влияние граничных частот  $f_{гр1}$ ,  $f_{гр2}$  двух элементов конструкции на изменение изоляции воздушного шума.

10. Доказать целесообразность изменения значений цилиндрической жесткости для двух элементов раздельной конструкции с точки зрения получения лучшей изоляции воздушного шума при уменьшении расхода строительных материалов.

11. Проанализировать влияние изоляции воздушного шума несущей плитой перекрытия на общую звукоизоляцию перекрытия при различных конструкциях пола и упругих прокладок, используя данные [13].

12. Определить наиболее целесообразное соотношение поверхностных плотностей несущей плиты перекрытия и конструкции пола с точки зрения получения требуемой изоляции воздушного шума при меньшем расходе строительных материалов.

13. Доказать нецелесообразность увеличения изоляции воздушного шума наружными стенами за счет увеличения поверхностной плотности глухих участков конструкции.

14. Установить рациональное соотношение между звукоизоляцией глухими участками стен и заполнением проемов.

15. Проанализировать ухудшение звукоизоляции конструкциями за счет проемов или отверстий при их различной площади и различных значениях изоляции воздушного шума глухими участками конструкции.

16. Используя формулу (88), оценить количественное влияние различных факторов, определяющих изменение уровня звукового давления в помещении. На основе анализа сделать практические выводы.

## Глава VIII

### ИЗОЛЯЦИЯ УДАРНОГО ШУМА МЕЖДУЭТАЖНЫМИ ПЕРЕКРЫТИЯМИ

#### § 21. ЗВУКОИЗОЛЯЦИЯ ПЕРЕКРЫТИЯМИ С РУЛОННЫМИ ПОЛАМИ

Для оценки изоляции ударного шума используют стандартную ударную машину, производящую 10 ударов в секунду, с пятью молотками массой по 0,5 кг, свободно

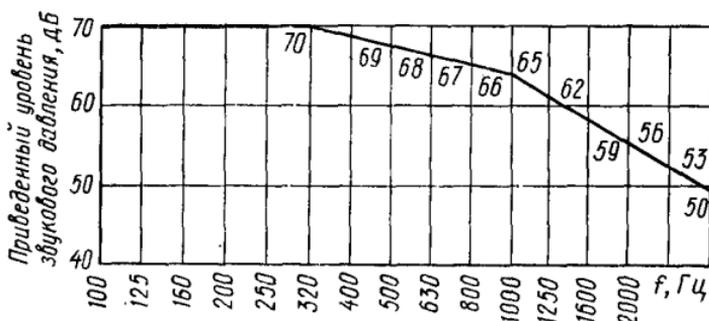


Рис. 53. Нормативная частотная характеристика приведенного уровня ударного шума под перекрытием

падающими с высоты 4 см. Полученные уровни звукового давления под перекрытиями приводят к октавным полосам частот и единому звукопоглощению, равному  $10 \text{ м}^2$ , а затем сравнивают с нормативными (рис. 53). Такие уровни называются приведенными  $L_{II}$ .

В первом приближении явление удара аппроксимируется действием внезапно приложенной к перекрытию силы, действующей в течение некоторого промежутка времени.

В связи с большими теоретическими трудностями, связанными с исследованием излучения звука перекрытиями, обычно принимается, что между уровнем вибрации конструкции  $L_v = 20 \lg \frac{v}{v_0}$  и уровнем звукового дав-

ления  $L$  имеется простая корреляционная связь  $L \sim L_v$ , где  $v$  — колебательная скорость конструкции;  $v_0 = 5 \cdot 10^{-8}$  м/с — пороговое значение колебательной скорости. Задача определения уровня ударного шума сводится к нахождению колебательной скорости перекрытия при работе стандартной ударной машины. Обеспечить нормативные требования изоляции ударного шума с помощью одних несущих плит практически невозможно. Так, удвоение толщины плиты перекрытия снижает уровень  $L_{\text{н}}$  на 9 дБ, а такое же увеличение плотности, модуля упругости и коэффициента потерь повышает изоляцию ударного шума соответственно на 4,5; 1,5 и 3 дБ. Поэтому применяются различные конструкции полов (по упругому основанию, по лагам и упругим прокладкам, рулонные полы). Применение рулонных слоистых полов позволяет значительно повысить изоляцию ударного шума.

Если индекс приведенного уровня ударного шума для несущих плит перекрытий составляет около 80—90 дБ, то перекрытия со слоистыми полами уже имеют  $I_y \approx 67 \div 70$  дБ. Многие ковровые и ворсовые покрытия имеют значения изоляции ударного шума, значительно превышающие нормативные требования. Улучшение звукоизоляции происходит в результате потерь энергии на местное смятие упругого слоя.

В качестве одной из основных звукоизоляционных характеристик рулонных полов является продолжительность стандартного удара  $\tau$  (с) (продолжительность контакта молотка стандартной ударной машины с полом). Частота, с которой начинает проявляться влияние местного смятия, равна (Гц)

$$f_0 = 0,45 / \tau. \quad (89)$$

Величина снижения приведенного уровня ударного шума (дБ) для практических целей может быть определена по формуле

$$\Delta L = 40 \lg \frac{f}{f_0}. \quad (90)$$

Индекс приведенного уровня ударного шума (дБ) под перекрытием определяют по формуле

$$I_y = I_{y_0} - \Delta I_y, \quad (91)$$

где  $I_{y_0}$  — индекс приведенного уровня ударного шума для несущей плиты перекрытия, дБ; принимается по табл. 1

прилож. III;  $\Delta I_y$  — величина, характеризующая уменьшение приведенного уровня ударного шума при наличии рулонного пола; принимается по табл. 2 прилож. III.

**Пример.** Определить индекс приведенного уровня ударного шума под междуэтажным перекрытием, состоящим из несущей железобетонной сплошной плиты толщиной 160 мм и рулонного пола из дублированного теплозвукоизоляционного линолеума на вязально-прошивной подкладке толщиной 3,7 мм.

По табл. 1 прилож. III находим значение  $I_{y0}=82$  дБ, так как  $p=2400 \times 0,16=384$  кг/м<sup>2</sup>, а по табл. 2 прилож. III — значение  $\Delta I_y = 16$  дБ.

По формуле (91),  $I_y=82-16=66$  дБ. Если перекрытие предназначается для жилых зданий, оно соответствует нормативным требованиям, так как  $66 < 67$  (см. [13]).

## § 22. ЗВУКОИЗОЛЯЦИЯ ПЕРЕКРЫТИЯМИ С ПОЛАМИ НА УПРУГОМ ОСНОВАНИИ

К этому типу перекрытий относятся конструкции со сплошным упругим слоем между полом и несущей плитой и конструкции с полом на лагах и упругих прокладках.

Ударные воздействия по полу вызывают периодические изменения напряжения в упругом слое; в нем возникают деформации, на которые расходуется часть энергии, рассеиваемой в виде тепла. Упругий слой работает так же, как и при изоляции воздушного шума отдельными перегородками с промежуточным упругим слоем. При наличии в конструкции перекрытия промежутков возможна передача звука не только через элементы конструкции, но и через эти промежутки.

Снижение уровня ударного шума зависит прежде всего от частоты собственных колебаний пола на упругом основании  $f_0$ . Чем ниже  $f_0$ , тем больше величина снижения уровня ударного шума  $\Delta L$  за счет пола на упругом основании [см. формулу (90)]. Каждое удвоение частоты при  $f > f_0$  приводит к росту улучшения изоляции ударного шума за счет пола на упругом основании на 12 дБ. Начиная со средних частот возможно возникновение волновых процессов в упругом слое, что замедляет рост звукоизоляции с 12 до 6 дБ на октаву.

Расчет изоляции ударного шума сводится к вычислению частотной характеристики снижения уровня ударного шума  $\Delta L$  за счет пола на упругом основании и к сравнению расчетного значения  $\Delta L$  с нормативным. В упругом слое учитывается распространение только про-

дольных колебаний. Учет распространения в полах изгибных колебаний приводит к некоторому повышению уровня шума под перекрытием  $\Delta L'$ . Значение  $\Delta L'$  зависит от толщины упругого слоя и его плотности, а также от толщины пола. Частотные характеристики требуемого снижения приведенного уровня ударного шума  $\Delta L_T$  даны на рис. 54 для несущих конструкций перекрытий, указанных в табл. 1 прилож. III.

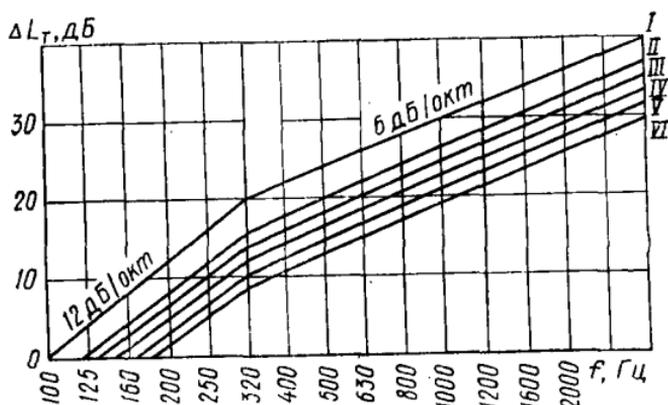


Рис. 54. Частотные характеристики требуемого снижения приведенного уровня ударного шума

Расчет изоляции ударного шума для перекрытия с полами по сплошным или ленточным упругим прокладкам проводят в такой последовательности. Определяют поверхностные плотности ( $\text{кг}/\text{м}^2$ ) элементов перекрытия: несущей части  $p_1$ ; упругой прокладки  $p_c$ ; пола на упругом основании  $p_2$  (при полах по лентам из упругих материалов  $p_c$  определяют как для сплошной прокладки).

В соответствии с табл. 1 прилож. III и рис. 54 устанавливают кривую требуемого снижения приведенного уровня ударного шума  $\Delta L_T$ . Определяют величину приведенного коэффициента жесткости упругого основания  $k = E_d/h$ ,  $\text{кгс}/\text{м}^3$  ( $1 \text{ кгс}/\text{м}^2 \approx 10 \text{ Па}$ ), где  $E_d$  — динамический модуль упругости прокладки, принимаемый по табл. 3 прилож. II;  $h$  — толщина упругой прокладки в обжатом состоянии, определяемая по формуле (88).

Находят резонансную частоту колебаний пола на упругом основании по формуле

$$f_0 = 0,5 \sqrt{k/p_2}. \quad (92)$$

Формула (92) аналогична формуле  $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{kg}{p}}$  (см. § 2) и характеризует колебательную систему с одной степенью свободы, т. е. несущая плита перекрытия принимается неподвижной.

Определяют величину снижения приведенного уровня ударного шума на низких частотах по формуле (90) при  $f \leq 0,7 f_0 \sqrt{p_2/p_c}$  и  $2 < \lambda < 7$ , где  $\lambda = p_1/p_2$ . Графически это выразится в виде прямой, идущей из точки  $f_0$  на оси абсцисс (рис. 55) с наклоном 12 дБ на октаву. Если  $\lambda \leq 2$  или  $\lambda \geq 7$ , то вычисляют величину (дБ)

$$\Delta L_2 = 10 \lg \left[ \left( \frac{\lambda + 1}{\lambda} \right)^2 + \alpha^2 \left( \alpha^2 - 2 \frac{\lambda - 1}{\lambda} \right) \right], \quad (93)$$

где  $\alpha = f/f_0$ .

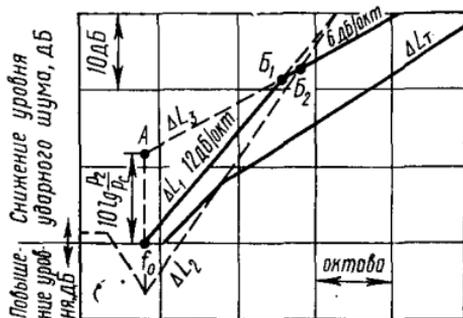


Рис. 55. Построение частотной характеристики снижения приведенного уровня ударного шума

Определяют величину снижения приведенного уровня ударного шума (дБ) на средних и высоких частотах при  $f \geq 0,7 f_0 \sqrt{p_2/p_c}$ :

$$\Delta L_3 = 20 \lg \frac{f}{f_0} + 10 \lg \frac{p_2}{p_c} - 3. \quad (94)$$

Графически из точки  $f_0$  на оси абсцисс (рис. 55) откладывают ординату, равную  $10 \lg \frac{p_2}{p_c} - 3$  (точка А).

Из этой точки проводят прямую с наклоном 6 дБ на октаву. Величины снижения приведенного уровня ударного шума на низких частотах  $\Delta L_1$  и  $\Delta L_2$  соответственно справедливы до пересечения с прямой  $\Delta L_3$  в точках  $B_1$  и  $B_2$ , а величины снижения  $\Delta L_3$  справедливы на участке правее точек  $B_1$  и  $B_2$ .

На график (рис. 55) наносят кривую  $\Delta L_T$  и определяют индекс приведенного уровня ударного шума, учитывая,

что вместо нормативной кривой (см. рис. 53) используют кривую  $\Delta L_T$ .

**Пример.** Определить изоляцию ударного шума междуэтажным перекрытием, состоящим из несущей железобетонной плиты толщиной 140 мм, сплошного слоя минераловатных прошивных плит толщиной 50 мм ( $\gamma \approx 100 \text{ кг/м}^3$ ), стяжки из гипсобетона толщиной 50 мм и пола из линолеума толщиной 30 мм.

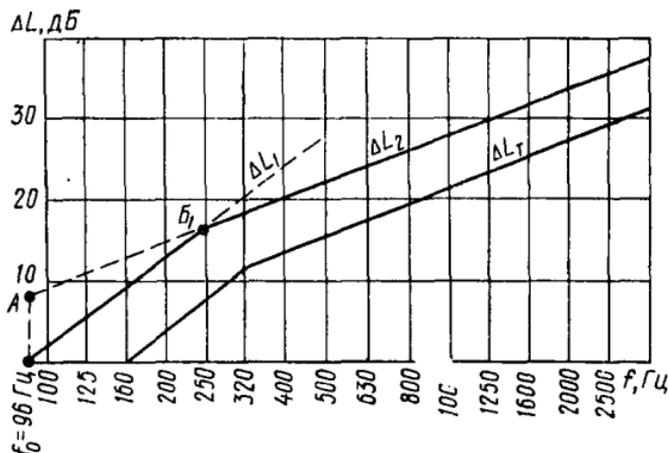


Рис. 56. Построение расчетной частотной характеристики снижения приведенного уровня ударного шума

Определяем поверхностные плотности элементов перекрытия:  $\rho_1 = 2400 \cdot 0,14 = 336 \text{ кг/м}^2$ ;  $\rho_2 = 1200 \cdot 0,05 + 1000 \cdot 0,003 = 63,0 \text{ кг/м}^2$ ;  $\rho_c = 100 \cdot 0,050 = 5 \text{ кг/м}^2$ .

По табл. 1 прилож. III выбираем кривую IV (см. рис. 54). Наносим кривую  $\Delta L_T$  на график (рис. 56).

Нагрузка на прокладку с учетом полезной нагрузки составляет  $P = 63 + 150 = 213 \text{ кг/м}^2$  (2130 Па).

Динамический модуль упругости минераловатных плит равен  $4 \cdot 10^4 \text{ кгс/м}^2$  (0,4 МПа), а относительное сжатие  $\epsilon = 0,65$  (см. табл. 3 прилож. II). Толщина упругой прокладки в обжатом состоянии равна

$$h = h_0 (1 - \epsilon) = 0,05 (1 - 0,65) = 0,0175 \text{ м.}$$

Приведенный коэффициент жесткости составит

$$k = \frac{4 \cdot 10^4}{0,0175} = 2\,285\,714 \text{ кгс/м}^3 \text{ (22,86 МПа/м).}$$

По формуле (91),

$$f_0 = 0,5 \sqrt{\frac{2\,285\,714}{63}} = 96 \text{ Гц.}$$

Значение  $\lambda = 336/63 = 5,3 < 7$ , поэтому для расчета  $\Delta L$  на низких частотах используют формулу (90) и  $\Delta L_1 = 40 \lg \frac{f}{f_0}$ .

Из точки  $f_0=96$  Гц на оси абсцисс (рис. 56) проводим прямую с наклоном 12 дБ на октаву.

Строим график уравнения (94):

$$\Delta L_3 = 20 \lg \frac{f}{96} + 10 \lg \frac{63}{5} - 3 = 20 \lg \frac{f}{96} + 8.$$

Из точки  $f_0=96$  Гц на оси абсцисс откладываем ординату, равную 8 дБ, и проводим через ее конец (точка А) прямую с наклоном 6 дБ на октаву. Вычисление поправки  $\Delta_y$  дано в табл. 17.

Таблица 17

Вычисление поправки  $\Delta_y$

Частота, Гц	Вычисленные значения $\Delta L_3$ , дБ	Требуемое значение $\Delta L_T$ , дБ	Отклонение вычисленных значений от требуемых	Значения для кривой, сдвинутой вверх на 8 дБ	Отклонение вычисленных значений от требуемых, дБ
1	2	3	4	5	6
100	1	0	1	0	1
125	5	0	5	3	2
160	9	0	9	8	1
200	13	4	9	12	1
250	16	8	8	16	0
320	18	12	6	20	-2
400	20	14	6	22	-2
500	22	16	6	24	-2
630	24	18	6	26	-2
800	26	20	6	28	-2
1000	28	22	6	30	-2
1250	30	24	6	32	-2
1600	32	26	6	34	-2
2000	34	28	6	36	-2
2500	36	30	6	38	-2
3200	38	32	6	40	-2

Сумма благоприятных отклонений (гр. 4) равна 98 дБ. Среднее значение  $98:16=6,1$ , что более 2 дБ. Смещаем нормативную кривую на 8 дБ вверх. Сумма неблагоприятных отклонений (гр. 6) составляет 22 дБ. Среднее отклонение  $22:16=1,4 < 2$  дБ.

Таким образом, поправка  $\Delta_y$  равна +8 дБ, а индекс приведенного уровня ударного шума  $I_y=70-\Delta_y=70-8=62$  дБ, что меньше требуемых 67 дБ для междуэтажных перекрытий жилых зданий. Следовательно, данное междуэтажное перекрытие удовлетворяет нормативным требованиям изоляции ударного шума.

При полах по лагам и отдельным упругим прокладкам возможна передача звука через воздушные промежутки. Для достаточно тяжелых несущих плит перекрытий ( $P \approx 300$  кг/м<sup>2</sup>) эта передача незначительна. При меньшей массе конструкции с полами по лагам оказыва-

ется целесообразным заполнять воздушные промежутки звукопоглощающими (легкими) материалами, не создающими жесткого контакта между полом и несущей плитой. Лаги должны быть достаточно легкими, их площадь соприкосновения с несущей плитой наименьшая.

Для междуэтажных перекрытий с упругим слоем из песка использование изложенного практического метода расчета изоляции ударного шума приводит к ошибке, так как большое значение имеют потери энергии колебаний на трение, обусловленное взаимным движением песчинок. Поэтому на средних и высоких частотах улучшение изоляции ударного шума за счет пола по засыпке будет зависеть от толщины слоя песка.

На низких частотах  $\Delta L_1$  определяют по формуле (90), а на средних и высоких частотах (дБ) — по формуле

$$\Delta L_2 = 20 \lg \frac{f}{f_0} + 10 \lg h, \quad (95)$$

где  $h$  — толщина слоя засыпки из песка, см.

Для несущих сплошных или многопустотных плит перекрытий поверхностной плотностью около  $300 \text{ кг/м}^2$  применение засыпок из песка толщиной  $60 \text{ мм}$  может обеспечить требования изоляции как ударного, так и воздушного шумов.

Более простой практический метод определения индекса приведенного уровня ударного шума  $I_\gamma$  под междуэтажным перекрытием, в том числе и с полами по лагам, заключается в следующем. Определяется частота собственных колебаний пола, лежащего на упругом основании, по формуле (92). По табл. 1 прилож. III определяют индекс приведенного уровня ударного шума несущей плиты перекрытия  $I_{\gamma_0}$ .

По табл. 3 прилож. III в зависимости от величины индекса приведенного уровня ударного шума несущей плиты перекрытия  $I_{\gamma_0}$  и частоты собственных колебаний пола  $f_0$  определяют индекс приведенного уровня ударного шума  $I_\gamma$ .

**Пример.** Определить индекс приведенного уровня ударного шума для рассмотренного выше междуэтажного перекрытия.

Значение  $f_0=96 \text{ Гц}$  берем из примера. Значение  $I_{\gamma_0}$  равно  $82 \text{ дБ}$ , так как поверхностная плотность несущей плиты равна  $336 \text{ кг/м}^2$  (см. табл. 1 прилож. III). По табл. 3 прилож. III находим индекс приведенного уровня ударного шума, равный  $63 \text{ дБ}$ , что практически соответствует величине индекса ( $62 \text{ дБ}$ ), полученного более точным расчетом,

**Пример.** Определить индекс приведенного уровня ударного шума под перекрытием, состоящим из несущей железобетонной сплошной плиты толщиной 140 мм и деревянного пола по лагам, уложенным на упругие прокладки из мягких древесноволокнистых плит толщиной 25 мм.

Определяем величины, входящие в формулу (92). По табл. 3 прилож. II находим  $E_d = 12 \cdot 10^4$  кгс/м<sup>2</sup> (1,2 МПа),  $\varepsilon = 0,15$ , так как нагрузка на упругие прокладки составляет до 1000 кгс/м<sup>2</sup> (10 кПа).

По формуле (84),  $h = 0,025(1 - 0,15) = 0,021$  м (см. пример в § 19);

$$k = E_n/h = \frac{12 \cdot 10^4}{0,021} = 5\,714\,296 \text{ кгс/м}^3 (5,714 \text{ МПа/м}).$$

Поверхностную плотность пола по лагам принимаем равной 30 кг/м<sup>2</sup>.

Находим

$$f_0 = 0,5 \sqrt{\frac{5\,714\,296}{30}} = 218 \text{ Гц.}$$

Значение  $I_{y0} = 82$  дБ. По табл. 3 прилож. III находим  $I_y = 62$  дБ, что меньше требуемых 67 дБ для междуэтажных перекрытий жилых зданий.

С учетом данных примера, приведенного в § 19, можно считать, что данное перекрытие удовлетворяет нормативным требованиям изоляции как воздушного, так и ударного шумов.

В рассматриваемых конструкциях перекрытий улучшение изоляции ударного шума достигается за счет упругих материалов. Звукоизоляционные материалы должны сохранять свои свойства в течение всего срока эксплуатации перекрытий (до капитального ремонта). Однако уже в первые месяцы и годы изоляция ударного шума значительно ухудшается (до 2—6 дБ), что объясняется в основном потерей материалами своих упругих свойств. Наиболее целесообразны для применения в конструкциях перекрытий прокладки из супертонкого волокна (диаметр волокон 1—3 мкм и объемная масса не менее 100—150 кг/м<sup>3</sup>). Данные материалы позволяют значительно улучшить эксплуатационные характеристики междуэтажных перекрытий и несколько уменьшить их высоту. Однако проблема уменьшения массы перекрытий должна решаться по пути создания новых конструкций, например многослойных.

Если разделить (по высоте) упругую прокладку обычного трехслойного перекрытия равномерно распределенным слоем материала с достаточно большим инерционным сопротивлением, то получаемую конструкцию можно назвать пятислойной. Основными элементами перекрытия являются три инерционных (пол с его основанием,

равномерно распределенный слой материала и несущая панель) и два упругих слоя. Если добиться рассогласования частот собственных колебаний инерционных слоев (желательно ниже нормируемого в строительстве диапазона частот), то следует ожидать дополнительного (относительно трехслойной конструкции) прироста звукоизоляции.

При одинаковой массе пятислойные перекрытия имеют лучшую звукоизоляцию, чем трехслойные. Улучшение изоляции ударного шума в области низких частот составляет около 12 дБ на октаву, а в области средних и высоких частот — 6 дБ на октаву. В качестве равномерно распределенного слоя можно применять любые строительные материалы с поверхностной плотностью не менее 30 кг/м<sup>2</sup>. При этом необходимо стремиться к тому, чтобы жесткость инерционных элементов пола (плиты пола и равномерно распределенного слоя) составляла не более  $1/20$ — $1/30$  жесткости несущей плиты перекрытия при изгибе, а поверхностная плотность была бы по возможности большей.

Пятислойные конструкции перекрытий позволяют уменьшить поверхностную плотность примерно на 50 кг/м<sup>2</sup>, а стоимость строительных материалов — на 4—8% по сравнению с трехслойными конструкциями при обеспечении нормативных значений звукоизоляции. При использовании прокладок из супертонкого стекловолокна дополнительно уменьшается толщина перекрытий на 30—40 мм.

Большая звукоизоляция также может быть достигнута при устройстве подвесных отдельных потолков. Если потолок будет обладать малой изгибной жесткостью и достаточно изолирован от несущей плиты, возможно получить уменьшение массы перекрытий при обеспечении нормативных значений звукоизоляции (см. данные табл. 1 прилож III). Звукоизоляция увеличивается при размещении в воздушном промежутке звукопоглощающего материала. В этом случае при наличии в потолке перфорации конструкция будет не только звукоизолирующей, но и звукопоглощающей.

#### УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ РАБОТА

1. Двухслойный линолеум, т. е. состоящий из слоев износа (масса) и слоя подосновы (упругость), физически можно рассматривать

как систему с одной степенью свободы, считая, что линолеум лежит на неподвижном основании.

Определять желаемые значения динамического модуля упругости  $E_d$  слоя подосновы и частоты  $f_0$ , чтобы получить лучшую изоляцию ударного шума. Влияние  $f_0$ , а также продолжительности удара  $\tau$  на изменение звукоизоляции можно оценить, используя [1].

2. Определить необходимые характеристики несущих плит и рулонных полов (применительно к жилым зданиям), обеспечивающих нормативные требования изоляции как воздушного, так и ударного шумов. Необходимо учесть, что, если в качестве пола используется поливинилхлоридный линолеум на теплозвукоизоляционной подоснове (ГОСТ 18108—72), рассчитанную величину индекса изоляции воздушного шума следует уменьшить на 1 дБ.

3. Оценить, как характеристики упругих прокладок влияют на изменение изоляции ударного шума междуэтажными перекрытиями.

4. Оценить, как характеристики несущих плит перекрытий влияют на изменение изоляции ударного шума.

5. Проанализировать влияние пола на упругом основании на изоляцию воздушного и ударного шумов.

6. Проанализировать влияние несущих плит перекрытий на изоляцию воздушного и ударного шумов.

7. Провести технико-экономический анализ междуэтажных перекрытий с полами на упругом основании, исходя из необходимости обеспечения нормативных требований изоляции воздушного и ударного шумов.

## **Глава IX**

# **ПРИНЦИПЫ БОРЬБЫ С ШУМОМ ИНЖЕНЕРНОГО И САНИТАРНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

### **§ 23. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ ШУМА**

Инженерное и санитарно-техническое оборудование (насосные установки в системах тепло- и водоснабжения, лифтовые и вентиляционные установки, системы водоснабжения, канализации и мусоропровода) часто является причиной повышенного шумового режима в зданиях. При работе оборудования возникают воздушный шум и структурный шум, обусловленные передачей вибрации от оборудования ограждающим конструкциям.

На рис. 57 в качестве примера приведена схема передачи звуковой энергии из помещения насосной в квартиру.

Общий уровень звукового давления (дБ) в комнате, расположенной над насосной, равен [см. формулу (40)]

$$L = 10 \lg (10^{L_w/10} + 10^{L_c/10} + 10^{L_n/10}), \quad (96)$$

где  $L_w$  — уровень звукового давления, обусловленный энергией, проходящей через междуэтажное перекрытие (воздушный шум);  $L_c$  — уровень звукового давления, обусловленный излучением звуковой энергии вибрирующими ограждающими конструкциями (структурный шум);  $L_n$  — уровень звукового давления, обусловленный энергией внешних источников шума.

Зная общий уровень звукового давления и уровень внешнего шума, можно определить уровень звукового давления в комнате от оборудования при отсутствии внешних шумовых помех. Для этого может быть использована табл. 1. Значение  $L_w$  определяют, рассматривая прохождение звука через перекрытие в предположении диффузности звуковых полей в комнате и в помещении насосной.

Изоляция воздушного шума (дБ) перекрытием равна

$$R = L_y - L_w + 10 \lg \frac{S}{A}, \quad (97)$$

где  $L_y$  — уровень звукового давления в помещении насосной, дБ;  $S$  — площадь междуэтажного перекрытия, м<sup>2</sup>.  $A$  — эквивалентная площадь звукопоглощения в комнате, м<sup>2</sup>.

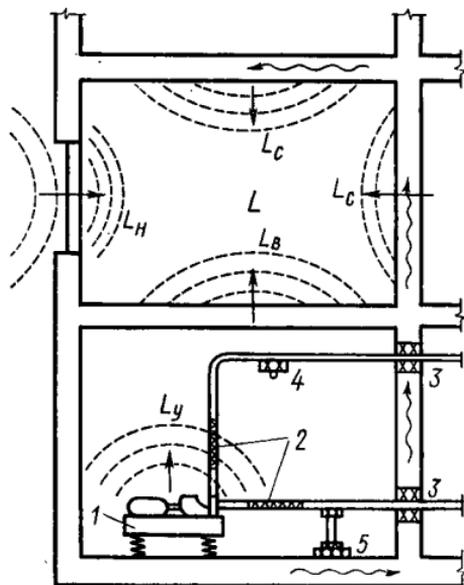


Рис. 57. Схема передачи звуковой энергии из помещения насосной в квартиру; мероприятия по виброизоляции:

1 — фундамент на амортизаторах; 2 — гибкие вставки; 3 — изоляция трубопроводов; 4 — кронштейн с упругой прокладкой; 5 — стойка с упругой прокладкой

При  $S \simeq A$ , что близко к действительности,  $L_B$  (дБ) равно

$$L_B \simeq L_y - R. \quad (98)$$

Значение изоляции воздушного шума  $R$  ориентировочно определяют по формулам (73) или (74) в зависимости от поверхностной плотности перекрытия.

**Пример.** Определить значения уровней звукового давления  $L_B$  и  $L_C$ , обусловленных воздушным и структурным шумом, если в помещении насосной уровень звукового давления  $L_y = 90$  дБ, а в комнате  $L = 55$  дБ. Междуэтажное перекрытие выполнено из сплошной железобетонной плиты (тяжелый бетон) толщиной 160 мм и рулонного пола.

Поверхностная плотность плиты  $p = 2500 \cdot 0,16 = 400$  кг/м<sup>2</sup>. По формуле (73)  $R = 23 \lg 400 - 10 \simeq 50$  дБ. По формуле (98),  $L_B = 90 - 50 = 40$  дБ.

Без учета влияния внешнего шума  $L = 10 \lg (10^{L_B/10} + 10^{L_C/10})$ , откуда  $L_C = 10 \lg (10^{L/10} - 10^{L_B/10}) = 10 \lg (10^{55/10} - 10^{40/10}) = 55$  дБ.

Можно не вычислять величины, расположенные в скобках, так как в соответствии с табл. 1 при разнице уровней в 15 дБ (55—40) поправка составляет 0,2 дБ. Таким образом, в данном примере шумовой режим в комнате целиком определяется структурным шумом.

Если неизвестно значение изоляции воздушного шума междуэтажным перекрытием (или иным ограждением), возможен следующий простой метод. В помещении с источником шума записывают шум на магнитофон, затем воспроизводят его с тем же уровнем, но при выключенной установке. В комнате шум измеряют дважды: при работе установки (воздушный и структурный шумы  $L_B$  и  $L_C$ ) и при выключенной установке, но работающем магнитофоне (только воздушный шум  $L_B$ ). Производя энергетическое вычитание второго значения из первого, находят значение  $L_C$ .

Определим, за счет каких мероприятий можно уменьшить уровень шума в изолируемом помещении. При диффузном звуковом поле в помещении с источником шума плотность звуковой энергии оценивается формулой (55):

$$\epsilon_y = \frac{4W_y}{cA_y}, \quad (99)$$

где  $W_y$  — звуковая мощность, излучаемая источником;  $A_y$  — эквивалентная площадь звукопоглощения.

Плотность звуковой энергии в комнате равна

$$\epsilon = \frac{\tau S \epsilon_y}{A}, \quad (100)$$

где  $\tau$  — коэффициент звукопередачи, связанный с изоляцией воздушного шума соотношением  $R = 10 \lg \frac{1}{\tau}$ .

Подставляя  $\epsilon_y$  в (100), получим

$$\epsilon = \frac{4\tau SW_y}{cAA_y}. \quad (101)$$

Из формулы (101) следует, что снижение  $\epsilon$  может быть достигнуто уменьшением: площади междуэтажного перекрытия  $S$ ; коэффициента звукопередачи  $\tau$ ; звуковой мощности  $W_y$  установки; увеличением звукопоглощения  $A$  в комнате и звукопоглощения  $A_y$  в насосной. Однако не все эти мероприятия целесообразны для уменьшения шума в комнате. Например, при увеличении звукопоглощения  $A_y$  уровень шума будет в основном уменьшаться в помещении насосной. Изменение других характеристик также трудно ( $W_y$ ,  $A$ ) или даже невозможно ( $S$ ). Поэтому основное влияние на шумовой режим в комнате оказывает структурный шум. Лишь при  $\tau = 10^{-3}$  ( $R = 30$  дБ), что практически не может быть для перекрытий, не имеющих щелей, трещин и т. п., изменение  $A_y$  может вызвать заметное изменение  $\epsilon$ . Основным мероприятием по уменьшению структурного шума является виброизоляция всех агрегатов.

#### § 24. РАСЧЕТ ВИБРОИЗОЛИРУЮЩИХ ОСНОВАНИЙ

Отношение силы, передающейся от установки на фундамент, к возмущающей силе называется коэффициентом виброизоляции (см. § 2), равным

$$\mu = \frac{1}{f^2/f_0^2 - 1}. \quad (102)$$

Под виброизоляцией понимается величина

$$R = 20 \lg \frac{1}{\mu}. \quad (103)$$

При отношении  $f/f_0 \geq 3$  формула (103) может быть записана в более простой форме

$$R \simeq 20 \lg \left( \frac{f}{f_0} \right)^2 = 40 \lg \frac{f}{f_0}, \quad (104)$$

совпадающей с записью формулы (90).

Следовательно, для хорошей виброизоляции (малые значения  $\mu$ ) необходимо, чтобы частота собственных колебаний установки  $f_0$  была мала по сравнению с частотой возмущающей силы  $f$ .

Механическая установка на фундаменте и амортизаторах, опирающаяся на неподвижное основание, представляет собой систему с шестью степенями свободы и с таким же числом собственных частот колебания. Однако в практических расчетах возможно учесть только вертикальные колебания, принимая (Гц)

$$f_0 \leq f/(3 \div 4), \quad (105)$$

где

$$f = n/60; \quad (106)$$

здесь  $n$  — частота вращения установки в минуту.

Величина  $f_0$  может быть рассчитана по формуле (9).

Круговые частоты равны  $\omega_0 = 2\pi f_0$  и  $\omega = 2\pi f$ . Общая жесткость всех амортизаторов в вертикальном направлении должна быть не более величины  $k_z$ , определяемой по формуле

$$k_z = m\omega_z^2 = 2\pi f_z^2 \frac{P}{g}, \quad (107)$$

где  $P$  — общая масса установок, включая фундамент, кг; рекомендуется массу фундамента принимать в два-три раза больше массы установок.

Рабочая высота амортизатора (высота деформируемой его части) из упругих материалов (например, резины, пробки) равна

$$H = \frac{E_n F_p}{k_z}, \quad (108)$$

где  $F_p$  — площадь поперечного сечения всех амортизаторов, определяемая по формуле

$$F_p = P/\sigma, \quad (109)$$

где  $\sigma$  — расчетное статическое напряжение в упругом материале амортизатора, кгс/см<sup>2</sup> (Па).

Необходимо отметить, что резиновые амортизаторы под действием нагрузки деформируются, не изменяя своего объема. Поэтому резиновые амортизаторы (при выполнении их в виде прямоугольников) по ширине и

длине не должны более чем в два-три раза превышать высоту.

По данным проф. И. И. Клюкина, если сравнить передачу вибрации через один резиновый амортизатор площадью  $F$  с 25 амортизаторами той же площади, то в первом случае передача будет на 5—20 дБ больше в диапазоне частот 400—3200 Гц. Поэтому листовая резина, как имеющая малую деформацию, не является виброизолятором.

При расчете пружинных амортизаторов вначале определяют их жесткость и расчетную нагрузку с учетом влияния динамических усилий, а затем, зная допускаемые напряжения на сдвиг и кручение материала амортизатора, определяют диаметр проволоки, число рабочих витков и высоту пружины.

При расчетах виброизоляции и снижения уровня шума считают, что масса и жесткость перекрытия значительно превышают массу агрегата и упругость амортизаторов, и поэтому их не учитывают. Однако при установке вибрирующего оборудования на междуэтажное перекрытие виброизоляция ниже, чем при установке на массивном фундаменте, так как волновые процессы в амортизаторе и изгибные колебания перекрытия препятствуют дальнейшему росту виброизоляции с повышением частоты.

## § 25. МЕРОПРИЯТИЯ ПО БОРЬБЕ С ШУМОМ

Выбор мероприятий по борьбе с шумом рассмотрим на примере насосных установок. Прежде всего необходимо предусмотреть мероприятия, обеспечивающие полную локализацию вибрации в пределах насосной. Виброизоляция фундаментов насосных установок достигается постановкой между ними и полом амортизаторов. Изоляция трубопроводов достигается устройством в них гибких вставок длиной не менее 600 мм. Места прохода трубопроводов через стены тщательно изолируют минеральной ватой, войлоком, асбестовым волокном и др. Крепление трубопроводов (после устройства вставок) достигается или их подвеской, или подстановкой под них стоек. В том и другом случае трубопроводы должны опираться на поддерживающую конструкцию через упругие прокладки. Трубопроводы в пределах котельной (бойлерной) не должны жестко соприкасаться со стенами.

Схема мероприятий по виброизоляции насосной показана на рис. 57.

Если индекс изоляции воздушного шума междуэтажного перекрытия или стены меньше 50 дБ ( $R \approx 50$  дБ) и уровень воздушного шума сопоставим с уровнем структурного шума, необходимо устройство подвесного потолка или гибкой стенки на отnose. В качестве гибкой стенки можно использовать листы плоской асбофанеры толщиной 6 мм, прикрепленные к деревянным рейкам размером 50×50 мм с шагом 800—1000 мм. Листы крепят на шурупах через упругую прокладку, чтобы уменьшить жесткие контакты.

Подвесной потолок может быть выполнен, например, из плит гипсовой сухой штукатурки, которую следует прикрепить к деревянным брускам размером 50×50 мм, расположенным с шагом 800—1000 мм. Брусочки крепят к несущей плите перекрытия. Воздушный промежуток заполняют минеральной ватой, шлаковатой или другим звукопоглощающим материалом. Между брусками и нижней поверхностью перекрытия или между брусками и сухой штукатуркой укладывают прокладки из звукоизоляционных материалов.

#### УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ РАБОТА

1. Используя метод, описанный в § 23, определить составляющие шума (воздушный и структурный шум) в помещении, расположенном рядом с каким-либо шумным помещением. Оценить точность данного практического метода при различной интенсивности воздушного и структурного шумов.

2. Используя формулы (98), (101) и др., количественно оценить влияние  $S$ ,  $\tau$ ,  $W_u$ ,  $A$  и  $A_u$  на плотность звуковой энергии, проникающей в изолированное помещение. Доказать целесообразность тех или иных мероприятий в зависимости от конкретных данных.

3. Показать, почему формулы, определяющие виброизоляцию (104) и звукоизоляцию (90), одинаковы. Проанализировать влияние отношения  $f/f_0$  на виброизоляцию.

4. Показать возможность учета в практических расчетах виброизоляции только вертикальных колебаний, т. е. возможность рассмотрения системы с одной степенью свободы. Для этого необходимо выполнить расчеты для системы с шестью степенями свободы, используя дополнительную литературу [10].

5. Аналогично § 25 определить мероприятия по борьбе с шумом лифтовых установок. Для этого желательно проведение натуральных измерений с оценкой составляющих воздушного и структурного шумов.

6. Аналогично § 25 определить мероприятия по борьбе с шумом вентиляционных установок. Мероприятия по уменьшению шума, распространяющегося в каналах, указаны в [12].

## **СТРОИТЕЛЬНО-АКУСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ БОРЬБЫ С ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ ШУМОМ**

### **§ 26. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОЖИДАЕМЫХ УРОВНЕЙ ЗВУКОВОГО ДАВЛЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ**

В производственных зданиях различают воздушные, ударные и структурные шумы. Для одноэтажных производственных зданий более характерны воздушные шумы, распространяющиеся от источника по воздушной среде. Ударные и особенно структурные шумы более существенны в многоэтажных зданиях. Вибрация инженерного и технологического оборудования, удары, воздушный шум возбуждают колебания несущих и ограждающих конструкций, которые в свою очередь излучают шум даже на значительном расстоянии от источника возбуждения колебаний.

Следует отметить, что возможности улучшения шумового режима при комплексном применении строительно-акустических методов (звукоизоляция, звукопоглощение, экранирование, рациональное архитектурно-планировочное и конструктивное решения) часто используются не полностью или не используются вовсе, что приводит к существенному удорожанию мероприятий по борьбе с шумом.

При проектировании и расчете шумоглушения строительно-акустическими методами необходимо прежде всего определение ожидаемых уровней звукового давления в производственных помещениях до осуществления мероприятий по борьбе с шумом.

Наиболее полной акустической характеристикой источника шума является звуковая мощность  $W$  (см. § 3 и 4). Эта характеристика шума практически не зависит от особенностей помещения, т. е. звукопоглощения, архитектурно-планировочного решения и т. д. Если измерять не только уровень звуковой мощности, но и распределение уровней по октавным полосам частот (октавные уровни звуковой мощности), а также характеристику направленности излучения, то этих данных достаточно для определения уровней и спектров шума, создаваемых источ-

ником в любом производственном помещении. Поэтому данные характеристики должны быть указаны в технической документации заводов-изготовителей, выпускающих технологическое оборудование.

Уровни звукового давления в расчетных точках определяют в зависимости от взаимного расположения расчетных точек и источников шума. Внутри помещений расчетные точки обычно выбирают на рабочих местах, расположенных в зоне отраженного от ограждающих поверхностей звука, и в зоне как отраженного, так и прямого звука, т. е. в непосредственной близости от источника. В обоих случаях расчетные точки должны быть расположены на уровне головы работающего (на высоте 1,2—1,5 м от пола).

Зона отраженного звука определяется величиной предельного радиуса  $r_{\text{пр}}$  (см. § 7), т. е. расстоянием от источника, на котором уровни звукового давления отраженного и прямого звука равны. Согласно формуле (64),  $r_{\text{пр}}$  характеризуется величиной  $B$  — постоянной помещения. Постоянную помещения  $B$  определяют умножением постоянной помещения на среднегеометрической частоте 1000 Гц ( $B_{1000}$ ) на частотный множитель  $\mu$  ( $B = B_{1000} \mu$ ). Постоянная помещения  $B_{1000}$  определяется по табл. 1 прилож. IV в зависимости от объема  $V$  (м<sup>3</sup>) и типа помещения, а множитель  $\mu$  — по табл. 2 прилож. IV.

**Пример.** Определить предельный радиус для механосборочного цеха объемом 1000 м<sup>3</sup>.

По табл. 1 прилож. IV находим значение  $B_{1000} = V/20 = 1000/20 = 50$  м<sup>2</sup>.

По формуле (64),  $r_{\text{пр}} \approx \sqrt{50/50} = 1$  м.

На частоте 4000 Гц и при  $V = 1000$  м<sup>3</sup>  $\mu = 2,4$  (см. табл. 2 прилож. IV),  $B = 50 \cdot 2,4 = 120$  м<sup>2</sup> и  $r_{\text{пр}} = \sqrt{120/50} = 1,55$  м.

На расстоянии от источника, большем  $r_{\text{пр}}$ , можно предположить, что звуковое поле диффузно; в этом случае уровень звукового давления  $L$  связан с уровнем звуковой мощности  $L_w$  зависимостью (60). Таким образом, зная по паспорту данной установки уровень звуковой мощности, можно определить уровень звукового давления.

Данная формула расчета уровней звукового давления, основанная на статистической теории, дает заниженные значения уровней в ближней к источнику части помещения и завышенные — в дальней. Понижение отраженной энергии по мере удаления от источника объясня-

ется увеличением длин пробега отраженных звуковых волн (см. § 7) и рассеиванием отраженной энергии за счет расширения фронта звуковой волны (см. § 3). Например, в низких помещениях со звукопоглощающими потолками энергия первых отражений, составляющая значительную часть всей отраженной энергии (см. § 7 и 8), практически остается в ближней к источнику зоне. На удаленные участки поступает энергия более поздних отражений и энергия первых отражений от ближних к рассматриваемой точке поверхностей. Величина последних также незначительна, так как поступающая сюда прямая энергия ослаблена.

Неравномерность распределения звуковой энергии также часто создается за счет того, что отдельные локальные участки поверхностей, влияющие на формирование отраженного поля, имеют коэффициенты звукопоглощения, значительно отличающиеся от среднего. Для уточнения метода расчета найдены эмпирические коэффициенты, учитывающие нарушение диффузности звукового поля, которые используют в точных расчетах; коэффициенты приведены в [12; 13].

Если имеется несколько источников шума с известными уровнями звуковой мощности или уровнями звукового давления, суммарный уровень может быть определен по формулам (40) и (41). Энергетическое сложение уровней возможно производить при сравнительно небольшом количестве источников шума, размещенных на ограниченной площади. Например, формулы дают завышенные уровни для текстильных, ткацких и других цехов, когда сотни и тысячи станков расположены на огромных площадях. В этом случае правильнее осуществлять суммирование уровней по уточненным формулам, приведенным в [12, 13], или определять уровни для отдельных производственных участков.

Таким образом, зная паспортные характеристики шума источников, их количество и расположение в помещении, можно определить суммарные уровни звукового давления (а также спектры), которые сравниваются с допустимыми уровнями. В табл. 3 прилож. IV приведены частотные характеристики уровней звукового давления на рабочих местах некоторых предприятий и цехов.

Если источники шума расположены в смежном с изолируемым помещением и воздушный шум проникает через ограждающие конструкции, то ожидаемые уровни

звукового давления  $L_i$  в расчетной точке изолируемого помещения будут равны:

$$L_i = L_W - \Delta L_{W_i} - 10 \lg B_n + 6 \text{ дБ}; \quad (110)$$

$$\Delta L_{W_i} = 10 \lg B_{ш} - 10 \lg S_i + R_i \text{ дБ}, \quad (111)$$

где  $L_W = 10 \lg \sum_k^m 10^{0,1L_{Wk}}$  — суммарный октавный уро-

вень звуковой мощности, излучаемой всеми источниками, находящимися в шумном помещении, дБ (определяют по табл. 1);  $m$  — общее количество источников в шумном помещении;  $B_n$  и  $B_{ш}$  — соответственно постоянные изолируемого и шумного помещений в данной октавной полосе частот,  $\text{м}^2$  (определяют по табл. 1 прилож. IV);  $S_i$  — площадь рассматриваемого ограждения или элемента ограждения, через которое шум проникает в изолируемое помещение,  $\text{м}^2$ ;  $R_i$  — изоляция воздушного шума этого ограждения или элемента, дБ (определяют в соответствии с гл. VII).

**Пример.** Лаборатория запроектирована в цехе. Разделяющая стена предусматривается из гипсобетона толщиной 80 мм. В цехе предполагается установить 20 одинаковых станков с известными по паспорту октавными уровнями звуковой мощности. Определить ожидаемые октавные уровни звукового давления в цехе (шумное помещение) и в лаборатории (изолируемое помещение). Объем цеха  $1000 \text{ м}^3$ , а лаборатории —  $100 \text{ м}^3$ .

Для среднегеометрических частот октавных полос 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 и 8000 Гц уровни звуковой мощности соответственно равны 90, 95, 98, 100, 97, 92, 85 и 85 дБ.

Суммарный октавный уровень звуковой мощности для всех 20 станков равен [по формуле (41)]

$$L_W = L_{Wk} + 10 \lg 20 = L_{Wk} + 13 \text{ дБ}.$$

Для рассматриваемых частот значения  $L_W$  равны 103 (90+13), 108, 111, 113, 110, 105, 98, 98 дБ.

Определяем постоянные помещения по табл. 1 прилож. IV.  $B_{ш1000}$  для  $V=1000 \text{ м}^3$  составляет  $50 \text{ м}^2$  ( $1000/20$ ). В соответствии с табл. 2 прилож. IV значения  $B_{ш}$  для остальных частот будут равны:  $50 \cdot 0,65=32,5$ ;  $50 \cdot 0,62=31$ ;  $50 \cdot 0,64=32$ ;  $50 \cdot 0,75=37,5$ ;  $50 \cdot 1,5=75$ ;  $50 \cdot 2,4=120$ ;  $50 \cdot 4,2=210 \text{ м}^2$ .

$B_{н1000}$  для  $V=100 \text{ м}^3$  составляет  $10 \text{ м}^2$  ( $100/10$ ). Значения  $B_n$  для остальных частот равны:  $10 \cdot 0,8=8$ ;  $10 \cdot 0,75=7,5$ ;  $10 \cdot 0,7=7$ ;  $10 \cdot 0,8=8$ ;  $10 \cdot 1,4=14$ ;  $10 \cdot 1,8=18$ ;  $10 \cdot 2,5=25 \text{ м}^2$ .

Площадь гипсобетонной перегородки, отделяющей изолируемое помещение от цеха, составляет  $20 \text{ м}^2$ . Частотную характеристику изоляции воздушного шума перегородкой определяем в соответствии с § 18.

Поверхностная плотность перегородки составляет  $P = 1350 \cdot 0,08 = 108 \text{ кг/м}^2$ .

На рис. 47 находим  $f_B = 270 \text{ Гц}$ , а  $R_B = 28,5 \text{ дБ}$ .

Строим частотную характеристику звукоизоляции  $ABCD$  (рис. 58). В связи с тем что на рис. 58 уровни звукового давления даны для  $1/3$  октавных полос, а для промышленных зданий расчеты ведутся в октавных полосах частот, необходимо к значениям уровней прибавить 5 дБ. Таким образом, для среднегеометрических частот октавных полос 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 и 8000 Гц значения  $R$  будут равны 33,5; 33,5; 34; 40; 47,5; 55; 62,5 и 65 дБ.

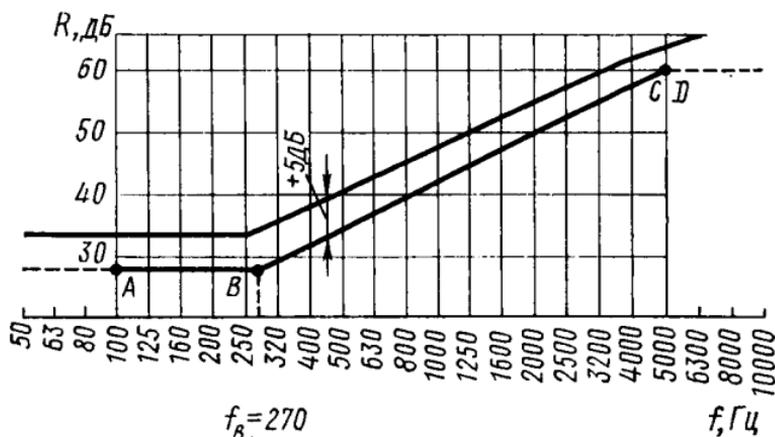


Рис. 58. Частотная характеристика изоляции воздушного шума гипсобетонной перегородкой толщиной 80 мм

Определяем значения  $\Delta L_{wi}$  по формуле (111). Для частоты 63 Гц  $\Delta L_{wi} = 10 \lg 32,5 - 10 \lg 20 + 33,5 = 35,5 \text{ дБ}$ .

Для остальных частот  $\Delta L_i$  равно 35,5; 36; 43; 51,5; 61; 70,5; 75 дБ.

По формуле (110) определяем  $L_i$ . Для частоты 63 Гц  $L_i = 103 - 35,5 - 10 \lg 8 + 6 = 64,5 \text{ дБ}$ . Для остальных частот  $L_i$  равно 70; 72,5; 67; 54,5; 35; 21 и 15 дБ.

Уровни звукового давления в цехе можно определить по формуле (60).

Так как  $B = A / (1 - \alpha_{ср})$ , а  $\alpha_{ср}$  для акустически необработанного цеха составляет около 0,1, то  $A = 0,9 B$ . Для рассматриваемых частот эквивалентная площадь звукопоглощения  $A$  равна  $32,5 \cdot 0,9 = 29$ ; 28; 29; 38; 45; 67,5; 108 и 189  $\text{м}^2$ .

Более точно значение  $A$  можно определить по формуле

$A = \frac{BS}{B + S}$ , где  $S$  — суммарная площадь ограждающих поверхностей. Принимаем цех размером в плане  $12 \times 18 \text{ м}$  и высотой 4,8 м,  $S \approx 700 \text{ м}^2$ . Тогда значения  $A$  для рассматриваемых частот равны 31; 30; 30,5; 35,5; 46,5; 67,5; 102,5 и 162  $\text{м}^2$ . Для данного случая расхождения несущественны.

По формуле  $L = L_w - 10 \lg A + 6$  для частоты 63 Гц значение  $L = 90 - 10 \lg 31 + 6 = 81 \text{ дБ}$ . Для остальных частот  $L$  равно 86; 89; 91; 87,5; 79,5; 71 и 69 дБ.

## § 27. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБУЕМОГО УМЕНЬШЕНИЯ УРОВНЕЙ ЗВУКОВОГО ДАВЛЕНИЯ

До выбора мероприятий по борьбе с шумом необходимо определить требуемое снижение уровней звукового давления  $\Delta L_{\text{тр}}$  в каждой октавной полосе частот.

Требуемое снижение при одновременной работе всех источников шума в помещении (дБ) определяют по формуле

$$\Delta L_{\text{тр}} = L - L_{\text{н}}, \quad (112)$$

где  $L$  — уровень звукового давления, создаваемый всеми источниками шума в расчетной точке;  $L_{\text{н}}$  — допускаемый по нормам уровень звукового давления в расчетной точке, дБ.

Допустимые уровни звукового давления и уровни звука (дБА) на постоянных рабочих местах приведены в [13].

**Пример.** Для данных предыдущего примера определить соответствие нормативным требованиям для лаборатории и на рабочих местах в цехе, считая, что указанные 20 станков работают одновременно более 4 ч в смену. Характер шума широкополосный, поэтому никаких поправок к нормативным значениям не требуется (табл. 18 и 19).

Как видно из табл. 18 и 19, превышение допустимых уровней звукового давления имеет место на частотах 125—2000 Гц. Если на этих частотах уровень шума в цехе будет понижен, то соответственно улучшится шумовой режим в лаборатории.

Таблица 18

**Определение соответствия нормативным требованиям  
для лаборатории**

Наименование	Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Уровни звукового давления в лаборатории, дБ	64,5	70	72,5	67	54,5	35	21	15
Допустимые уровни звукового давления, дБ	71	61	54	49	45	42	40	38
Превышение допустимых уровней звукового давления, дБ	—	9	18,5	18	9,5	—	—	—

## Определение соответствия нормативным требованиям для цеха

Наименование	Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Уровни звукового давления в цехе, дБ	81	86	89	91	87,5	79,5	71	69
Допустимые уровни звукового давления, дБ	99	92	86	83	80	78	76	74
Превышение допустимых уровней звукового давления, дБ	—	—	3	8	7,5	1,5	—	—

### § 28. ВЫБОР СТРОИТЕЛЬНО-АКУСТИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ ПО БОРЬБЕ С ШУМОМ

Выше указывалось, что основными методами борьбы с производственным шумом являются борьба с ним в источнике, звукоизоляция, звукопоглощение, индивидуальная защита.

Средства звукоизоляции в целом ряде случаев позволяют весьма существенно ослабить уровень шума как отдельных объектов, так и шумных помещений в целом. Для уменьшения шума на рабочих местах необходимо прежде всего локализовать шум в самих установках путем устройства звукоизолирующих кожухов, устанавливаемых на отдельные узлы. Для уменьшения массы кожухов их внутренняя поверхность покрывается звукопоглощающими материалами.

Отдельные шумящие установки могут быть изолированы от остальной площади помещений ограждающими конструкциями. Наоборот, при большом числе интенсивных источников шума и малом количестве работающих целесообразно сделать звуко- и виброизолированную кабину с дистанционным управлением для обслуживающего персонала. Меньшая масса конструкций достигается применением многослойных ограждений, вибродемпфирующих и звукопоглощающих материалов.

В том случае, когда источник не может быть ни устранен, ни ослаблен, ни огражден звукоизоляционной преградой, возможна борьба с шумом средствами звуко-

поглощения. Метод звукопоглощения оправдывает себя при незначительном начальном звукопоглощении: средний коэффициент звукопоглощения в октавной полосе со среднегеометрической частотой 1000 Гц не должен превышать 0,25. Необходимо, кроме того, учитывать, что практическая величина уменьшения уровня шума составляет в среднем по помещению около 6—8 дБ, что позволяет рекомендовать этот метод при небольших уровнях производственного шума. При больших уровнях шума метод звукопоглощения следует считать дополнительным к другим, более эффективным методам борьбы с шумом.

Наибольшую эффективность звукопоглощения можно получить в точках, расположенных в зоне отраженного звука (вдали от источников), где звуковое поле полностью определяется плотностью энергии отраженных звуковых волн.

Уменьшение уровня шума за счет звукопоглощения увеличивается с уменьшением объема помещений. Однако большее значение, чем объем, играет высота помещения. Эффективность звукопоглощения для производственных помещений с большой площадью пола при относительно небольшой высоте зависит от отношения расстояния между источником шума и расчетной точкой к высоте помещения ( $l/h$ ). При  $l/h=0,5$  эффективность звукопоглощения составляет 2—4 дБ; при  $l/h=2$ —10 дБ; при  $l/h=6$ —12 дБ. Если в помещении расположено большое количество равномерно распределенных по площади пола источников шума приблизительно с одинаковой мощностью, то уменьшение уровня шума за счет звукопоглощения на рабочих местах (1,5—2,0 м от источника) может достигать 5—6 дБ.

Для достижения наибольшего эффекта звукопоглощения целесообразно обрабатывать поглотителями не только поверхности потолка. Так, в вытянутых в плане цехах целесообразно обрабатывать звукопоглотителями верхнюю часть стен, а также располагать поперечные диафрагмы с двусторонним расположением поглотителей. В цехах квадратной формы в плане или близкой к ней и имеющих значительные площади целесообразны как поперечные, так и продольные звукопоглощающие диафрагмы. Диафрагмы представляют собой двусторонний звукопоглотитель в виде щитов, подвешиваемых к потолку или к верхней части колонн. Дополнительное размещение звукопоглотителя в виде диафрагм не толь-

ко увеличивает площадь поглотителя, но и уменьшает распространение звуковой энергии по длине и ширине цеха, так как диафрагмы являются одновременно и экранами. Такие же звукопоглощающие диафрагмы желательны и для разделения (в верхней части) отдельных пролетов цеха, если это не противоречит технологии производства (рис. 59).

В последнее время стали широко применяться штучные звукопоглотители (щиты, конусы, призмы, шары), подвешиваемые к несущим конструкциям покрытий (см.

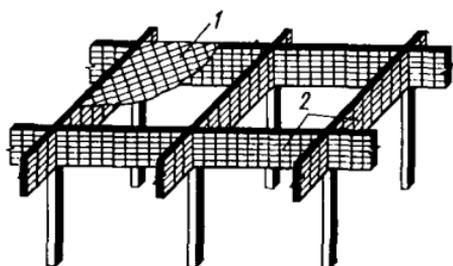


Рис. 59. Размещение звукопоглотителей:

1 — на потолке; 2 — в виде продольных и поперечных диафрагм

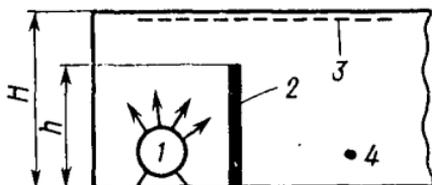


Рис. 60. Экранирование источника шума:

1 — источник шума; 2 — экран; 3 — звукопоглотитель на потолке; 4 — рабочее место

рис. 18). В помещениях с достаточно диффузным звуковым полем штучные звукопоглотители целесообразно размещать у потолка (на расстоянии до 0,5 м). В цехах, где доля прямого звука преобладает над отраженным, более выгодно размещать штучные поглотители на минимально возможном расстоянии от источника шума.

Основным критерием для оценки эффективности звукопоглотителя является частотная характеристика звукопоглощения и ее соответствие имеющемуся спектру шума, т. е. максимальному участку в спектре шума должен соответствовать и максимум звукопоглощения. Следует также учитывать, что ухо человека наиболее чувствительно к звуковым воздействиям в области высоких частот (1000—3000 Гц). Рассмотрим некоторые возможности архитектурно-планировочных решений по борьбе с шумом.

С увеличением числа источников шума увеличивается и уровень шума [см. формулы (40) и (41)]. Поэтому с точки зрения борьбы с шумом желательно уменьшение

числа источников шума в помещении, что вызовет сокращение производственной площади. Однако непрерывное развитие производственных площадей и повышение коэффициента использования их (что диктуется технологическими требованиями и имеет большие экономические преимущества) практически исключает этот путь борьбы с шумом.

Более реальным является группировка оборудования по степени шумности. Если имеется два источника и уровень шума одного превышает уровень шума другого более чем на 6 дБ, то с шумом более слабого источника можно не считаться, так как увеличение общего уровня за счет него будет менее 1 дБ (см. табл. 1). Группирование отдельных объектов и производственных процессов, уровень шума которых превышает основной шумовой фон помещения на 6 дБ, а также их полная или частичная изоляция могут дать вполне определенный эффект снижения шума.

Частичную изоляцию рабочих мест можно осуществить с помощью экранов. Эффективность экрана зависит от звукопоглощения, а также от отношения расстояния между источником и расчетной точкой  $l$  к длине помещения  $L$ , ширине  $B$  и высоте  $h$ . Экран эффективен и в помещении без звукопоглощающей обработки внутренних поверхностей при  $l/L$ ,  $l/B$ ,  $l/h$  меньше 0,5. При величине данного отношения более 1,0 применение экранов даже в помещении со звукопоглощением мало эффективно. Эффективность экрана можно повысить при его расположении как можно ближе к источнику и за счет увеличения размеров экрана. Кроме того, можно уменьшить отраженную звуковую энергию, попадающую в область за экраном, за счет расположения звукопоглотителя на соответствующих участках ограждающих поверхностей. Таким образом, применение экранов целесообразно при малых значениях  $l/L$ ,  $l/B$  и  $l/h$ ; звукопоглощение, наоборот, более эффективно при больших значениях этих отношений. Следовательно, использование звукопоглощения позволит не только повысить эффективность экранирования, но и получить при этом снижение шума по всему помещению. При определенных условиях возможно получить уменьшение уровня шума за экраном до 10 дБ.

При размещении экрана и звукопоглотителя по схеме рис. 60 достаточно, чтобы площадь звукопоглотителя

была в 3—4 раза больше площади открытого проема над экраном. Если отношение  $H/h \geq 0,6 \div 0,8$ , снижение уровня шума на рабочем месте может составить до 12—15 дБ. Рекомендуется одновременное использование экранов и штучных звукопоглотителей, располагаемых как у источника шума, так и в месте размещения экрана. Уменьшение уровня шума на рабочем месте может составить до 15 дБ и более. Если в помещении есть источники интенсивного шума, которые периодически включаются в течение рабочего дня, то на время работы этих источников они могут быть отделены от основной части цеха передвижными перегородками. Такие перегородки могут иметь звукоизоляцию до 20 дБ.

Кроме борьбы с шумом в самих помещениях необходимо учитывать и то влияние, которое они оказывают на менее шумные помещения. Часто планировка решается только с учетом требований технологии. В результате шумные помещения размещаются рядом с тихими, тяжелое вибрирующее оборудование располагается на междуэтажных перекрытиях и т. п., что требует больших дополнительных затрат на повышенную звукоизоляцию, большую жесткость и прочность конструкций. Во многих случаях рациональная планировка без ущерба технологии процесса может принести как уменьшение шумности производства, так и прямой экономический эффект. Таким образом, в здании целесообразно группировать помещения по степени их шумности. Этот же принцип желательно применить к размещению самих зданий на производственной территории, что особенно важно при размещении производства рядом с жилой застройкой.

## § 29. РАСЧЕТ ЗВУКОПОГЛОЩЕНИЯ

Величина снижения уровней звукового давления (дБ) за счет акустической обработки производственных помещений в зоне отраженного звука равна

$$\Delta L = 10 \lg \frac{B_1}{B}, \quad (113)$$

где  $B$  и  $B_1$  — постоянные помещения до и после акустической обработки.

Постоянную помещения  $B_1$  вычисляют поэтапно. Вначале определяют эквивалентную площадь звукопоглоще-

ния поверхностями ( $m^2$ ), не занятыми звукопоглотителями  $A'$ , по формуле

$$A' = \alpha_{\text{ср}}(S - S_{\text{обл}}), \quad (114)$$

где  $\alpha_{\text{ср}}$  — средний коэффициент звукопоглощения в помещении до его обработки;  $\alpha_{\text{ср}} = B/(B+S)$ ;  $S$  — суммарная площадь ограждающих поверхностей помещения,  $m^2$ ;  $S_{\text{обл}}$  — площадь звукопоглощающей облицовки,  $m^2$ .

Затем рассчитывают величину суммарного добавочного звукопоглощения  $\Delta A$  ( $m^2$ ) по формуле

$$\Delta A = \alpha_{\text{обл}} S_{\text{обл}} + A_{\text{шт}} n, \quad (115)$$

где  $\alpha_{\text{обл}}$  — коэффициент звукопоглощения конструкции облицовки;  $A_{\text{шт}}$  — эквивалентная площадь звукопоглощения одного штучного звукопоглотителя,  $m^2$  [12, 13];  $n$  — количество штучных звукопоглотителей.

Средний коэффициент звукопоглощения акустически обработанного помещения рассчитывают по формуле

$$\alpha_{\text{ср1}} = (A' + \Delta A)/S. \quad (116)$$

Постоянную помещения определяют по формуле

$$B_1 = \frac{A' + \Delta A}{1 - \alpha_{\text{ср1}}}. \quad (117)$$

**Пример.** Для данных предыдущих примеров рассчитать звукопоглощение для цеха и лаборатории.

В соответствии с табл. 19 требуется уменьшить уровни звукового давления в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 250, 500, 1000, 2000 Гц соответственно на 3; 8; 7,5 и 1,5 дБ. Постоянные помещения  $B$  для этих частот равны 32; 37,5; 50 и 75  $m^2$ .

По формуле (114) определяем  $A'$ . Для частоты 250 Гц

$$\alpha_{\text{ср}} = \frac{B}{B + S} = \frac{32}{32 + 700} = 0,044$$

(суммарная площадь ограждающих поверхностей  $S=700 m^2$ ). Для остальных частот  $\alpha_{\text{ср}}$  равно 0,051; 0,067 и 0,097.

Принимаем площадь звукопоглощающей облицовки  $S_{\text{обл}} = 300 m^2$  (потолок и верхняя часть стен). Для частоты 250 Гц

$$A' = \alpha_{\text{ср}}(S - S_{\text{обл}}) = 0,044(700 - 300) = 17,6 m^2.$$

Для остальных частот  $A'$  равно 20; 26,8 и 38,8  $m^2$ .

В качестве звукопоглотителя выбираем акустические плиты «Акмигран», имеющие коэффициенты звукопоглощения на рассчитываемых частотах 0,15; 0,50; 0,85 и 0,80.

Добавочное звукопоглощение по формуле (115) для частоты 250 Гц равно  $\Delta A = \alpha_{\text{обл}} S_{\text{обл}} = 0,15 \cdot 300 = 45 m^2$ ; для остальных час-

тог —  $0,50 \cdot 300 = 150 \text{ м}^2$ ;  $0,85 \cdot 300 = 255 \text{ м}^2$  и  $0,80 \cdot 300 = 240 \text{ м}^2$ . По формуле (116)  $\alpha_{\text{ср1}}$  для частоты 250 Гц составляет

$$\alpha_{\text{ср1}} = (A' + \Delta A)/S = (17,6 + 45)/700 = 0,09.$$

Для остальных частот  $\alpha_{\text{ср1}}$  равно:

$$(20 + 150)/700 = 0,24; \quad (26,8 + 255)/700 = 0,40;$$

$$(38,8 + 240)/700 = 0,40.$$

Постоянная помещения для частоты 250 Гц равна

$$B_1 = \frac{A' + \Delta A}{1 - \alpha_{\text{ср1}}} = \frac{17,6 + 45}{1 - 0,09} = 68,8 \text{ м}^2.$$

Для остальных частот  $B_1$  равно:

$$\frac{20 + 150}{1 - 0,24} = 224 \text{ м}^2; \quad \frac{26,8 + 255}{1 - 0,40} = 470 \text{ м}^2 \text{ и}$$

$$\frac{38,8 + 240}{1 - 0,40} = 465 \text{ м}^2.$$

Уменьшение уровня звукового давления на частоте 250 Гц по формуле (113) составляет

$$\Delta L = 10 \lg \frac{B_1}{B} = 10 \lg \frac{68,8}{32} = 3 \text{ дБ}.$$

Для остальных частот

$$\Delta L = 10 \lg \frac{224}{37,5} = 8 \text{ дБ}; \quad \Delta L = 10 \lg \frac{470}{50} = 10 \text{ дБ};$$

$$\Delta L = 10 \lg \frac{465}{75} = 8 \text{ дБ}.$$

Поставленная задача выполнена, так как согласно табл. 19 требовалось уменьшить уровни звукового давления на 3; 8; 7,5 и 1,5 дБ. В цехе уровни звукового давления после акустической обработки потолка и верхней части стен соответствуют нормативным требованиям.

В лаборатории уровни звукового давления при увеличении звукопоглощения в цехе понизятся соответственно на те же величины  $\Delta L$ . Превышение нормативных значений в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами 250, 500 и 1000 Гц теперь составит  $18,5 - 3 = 15,5$  дБ;  $18 - 8 = 10$  дБ и  $9,5 - 8 = 1,5$  дБ.

Дополнительно находим значение  $\Delta L$  для цеха на частоте 125 Гц:  $B = 31 \text{ м}^2$ ;  $\alpha_{\text{ср}} = 0,042$ ;  $A' = 16,8 \text{ м}^2$ ;  $\alpha = 0,05$ ;  $\Delta A = 15 \text{ м}^2$ ;  $\alpha_{\text{ср1}} = 0,045$ ;  $B_1 = 33,3 \text{ м}^2$ ;  $\Delta L = 0$  дБ. Никакого уменьшения уровня звукового давления нет, так как  $\alpha$  очень мало — 0,05. Следовательно, в лаборатории на данной частоте необходимо уменьшение уровня на 9 дБ (см. табл. 18).

Для уменьшения шума в лаборатории возможны следующие мероприятия: дальнейшее увеличение звукопоглощения в цехе, увеличение звукопоглощения в лаборатории или повышение звукоизоляции перегородки, отделяющей лабораторию от цеха.

Оценим эффективность звукопоглощения в цехе и в лаборатории. Для того чтобы на частоте 125 Гц понизить уровень звукового

давления в цехе на 9 дБ, потребуется увеличение постоянной помещения  $B_1$  до величины, определяемой из выражения  $\Delta L = 10 \lg \frac{B_1}{B} = 9$  дБ. Так как  $B = 31 \text{ м}^2$ , то  $B_1 = 257 \text{ м}^2$ . На частоте 250 Гц  $\Delta L = 18,5$  дБ.

Следует отметить, что уменьшение уровня звукового давления в цехе на 18,5 дБ вообще невозможно, так как максимально возможное снижение уровня (дБ) за счет звукопоглощения равно

$$\Delta L \approx 10 \lg \frac{1}{\alpha_{\text{ср}}} . \quad (118)$$

Значение  $\alpha_{\text{ср}} = 0,042$  и  $\Delta L$  составляет 14 дБ.

По формуле  $A = \frac{BS}{B+S}$  определяем значение звукопоглощения на частоте 125 Гц:

$$A = \frac{257 \cdot 700}{257 + 700} = 188 \text{ м}^2.$$

Уменьшение уровня звукового давления (дБ) в лаборатории за счет увеличения звукопоглощения в ней равно  $\Delta L = 10 \lg \frac{B_1}{B}$ .

В лаборатории постоянная помещения на частоте 125 Гц равна 8 м<sup>2</sup>. Зная требуемую величину  $\Delta L = 9$  дБ и  $B = 8 \text{ м}^2$ , определяем значение  $B_1$ :

$$\Delta L = 10 \lg \frac{B_1}{8} = 9 \text{ дБ}; \quad B_1 = 63,6 \text{ м}^2.$$

По формуле  $A = \frac{BS}{B+S}$  определяем значение звукопоглощения при  $S = 130 \text{ м}^2$ .

$$A = \frac{63,6 \cdot 130}{63,6 + 130} = 42,8 \text{ м}^2.$$

Применяя «Акмигран» с  $\alpha = 0,05$ , получим требуемую площадь звукопоглотителя  $42,8/0,05 \approx 850 \text{ м}^2$ , значительно превышающую имеющуюся площадь.

Очевидно, для обработки лаборатории требуется иной поглотитель, имеющий максимум звукопоглощения на частотах 125—500 Гц. Примем перфорированную конструкцию с заполнением из супертонкого стекловолокна, со значениями  $\alpha$  на частотах 125, 250, 500 Гц соответственно равными 0,66; 1,0 и 1,0 (см. табл. 2 прилож. 1). Требуемая площадь звукопоглощения равна  $42,8/0,66 = 65 \text{ м}^2$ .

Можно сравнить значения  $A$  для цеха и лаборатории, необходимые для уменьшения уровня звукового давления на 9 дБ; они равны 188 и 42,8 м<sup>2</sup>. Видно, что при обработке цеха расходуется в 4,5 раза больше звукопоглотителей. Поэтому целесообразно звукопоглотителями обрабатывать лабораторию, а не цех. Однако при обработке цеха уменьшается уровень шума и в цехе, в чем нет необходимости, так как там уровень уже соответствует нормативным требованиям.

Необходим, кроме того, анализ целесообразности увеличения изоляции воздушного шума перегородкой. В гл. VII (§ 18) было

показано, что для однослойных конструкций при увеличении поверхностной плотности в два раза звукоизоляция увеличивается на 5—6 дБ. Если увеличим толщину перегородки в два раза, уровни звукового давления в лаборатории на всех частотах уменьшатся на 5—6 дБ. Поэтому использование звукопоглощения, звукоизоляции и обоих методов совместно должно быть обосновано соответствующим технико-экономическим анализом.

## УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ РАБОТА

1. Задаваясь различными размерами производственных помещений, оценить расхождение в расчете уровней звукового давления по формуле (60) и по уточненной формуле, учитывающей нарушение диффузности звукового поля (значения коэффициентов приведены в [12; 13]). Считая, что последняя формула более точная, так как она базируется на данных натуральных измерений, определить допустимость использования формулы (60) с точностью  $\pm 2$  дБ.

2. Показать ошибочность использования формул (40) и (41) при энергетическом суммировании уровней звукового давления нескольких источников, расположенных на значительном расстоянии друг от друга. Используя данные [12, 13], более точно провести энергетическое суммирование. Сделать вывод о границах допустимости использования формул (40) и (41).

3. Для оценки снижения уровня звукового давления за счет звукопоглощения в § 29 использовалась формула  $\Delta L = 10 \lg \frac{B_1}{B}$ .

СНиП «Защита от шума» [13] рекомендует уточнение формулы за счет коэффициента  $\psi$ . Показать возможность использования формулы (113) в практических расчетах, задаваясь точностью  $\pm 1$  дБ.

4. Более подробно проанализировать задачу уменьшения шума в изолируемом помещении за счет: а) звукопоглощения в шумном и изолируемом помещениях; б) увеличения звукоизоляции разделяющего ограждения; в) совместного применения звукопоглощения в изолируемом помещении и увеличения звукоизоляции. При определенных объемах помещений установить наиболее целесообразные величины уменьшения уровней звукового давления за счет указанных мероприятий, исходя из технико-экономического анализа.

5. Показать роль звукопоглощения в смежных помещениях на изменение уровня воздушного шума в изолируемом помещении, проникающего через ограждающую конструкцию с определенной величиной звукоизоляции.

6. Используя [12, 13], рассчитать эффективность акустического экрана для условий большой аудитории и экспериментально проверить точность расчета. Если в наличии будет шумомер без анализатора, то возможно оценить эффективность экрана в общих уровнях звукового давления и уровнях шума. Показать, почему в последнем случае эффективность может оказаться несколько меньше при определенных характеристиках источника шума.

7. Экспериментально оценить эффективность экранов при их различных характеристиках, а также в помещениях различного размера. На основании экспериментальных данных получить определенные зависимости.

Последние два пункта могут выполняться по линии СНО.

# Раздел четвертый

## БОРЬБА С ШУМОМ В ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВЕ

### Глава XI

## ОЦЕНКА ШУМА В ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКЕ

### § 30. ИСТОЧНИКИ ШУМА В ГОРОДАХ

Основными источниками внешнего шума в городах и других населенных пунктах являются транспортные потоки на улицах и дорогах, железнодорожные поезда, средства воздушного транспорта, трансформаторы и источники шума внутри групп жилых домов.

В крупных городах уровни уличных шумов возрастают в среднем на 1 дБ в год, и эта тенденция роста сохранится в ближайшие десятилетия. Так, уровни шума на транспортных магистралях, соответствующие перспективным условиям движения (1980—1990), увеличатся на 7—10 дБА. Поэтому борьба с шумом в градостроительстве весьма актуальна.

Если бы удалось значительно снизить уровень шума всех видов транспорта, не было бы и проблемы борьбы с шумом в градостроительстве. Однако эта задача, как показывают прогнозы отечественных и зарубежных специалистов, не может быть радикально решена в ближайшие 40 лет (см. [3]).

Следует отметить, что в Москве разработан и осуществлен, часть автомобильных дорог располагаются под землей — это проект застройки Северного Чертанова. Все инженерные сооружения, трансформаторные подстанции. Поэтому население этого района будет полностью защищено от городского шума. Данный опыт строительства будет использован в практике борьбы с шумом в градостроительстве.

Рациональное использование архитектурно-планировочных и строительно-акустических методов борьбы с шумом должно основываться на учете всех основных источников шума и определении ожидаемого шума на территории застройки и в зданиях.

Различают следующие методы борьбы с шумами: в источнике, архитектурно-планировочные (зонирование

территории, здания-экраны нежилого назначения, шумозащищенные жилые дома-экраны, выемки, кавальеры, стенки-экраны, полосы зеленых насаждений) и строительные акустические (устройство окон и наружных ограждений с повышенной звукоизоляцией).

Шумовая характеристика транспортного потока по ГОСТ 20444—75 оценивается эквивалентным уровнем звука  $L_{\text{ЭКВ}}$  (дБА), рассчитываемым по результатам измерений уровней звука на расстоянии 7,5 м от первой полосы движения по формуле

$$L_{\text{ЭКВ}} = 10 \lg \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n t_i \cdot 10^{0,1L_i}, \quad (119)$$

где  $T$  — период времени усреднения уровней звука, с;  $t_i$  — временной интервал, в течение которого уровень звука находится в заданных пределах, с;  $i$  — номер интервала уровней ( $i=1, 2, \dots, n$ ).

Если считать, что  $T$  составляет 100%, то  $t_i$  выражают в процентах от  $T$ . Величину  $L_{\text{ЭКВ}}$  определяют на основании измерений уровней звука (дБА) в течение определенного времени, зависящего от интенсивности транспортных потоков  $n$ , ед/ч: при  $n > 1000$  ед/ч должно быть произведено 300 отсчетов уровней звука (продолжительность измерений не менее 10 мин, интервал между отсчетами от 2 до 3 с); при  $n = 500 \div 1000$  ед/ч — 600 отсчетов (продолжительность измерений не менее 20 мин); при  $n < 500$  ед/ч — 900 отсчетов (продолжительность измерений не менее 30 мин).

Уровни звука могут записываться на ленте регистратора уровней, считываться с измерительного прибора (шумомера) или регистрироваться специальным счетчиком.

По существу, эквивалентный уровень звука данного непостоянного шума представляет собой уровень звука постоянного, широкополосного неимпульсного шума, оказывающего такое же воздействие на человека, как и непостоянный шум (см. [13]).

**Пример.** Определить соответствие транспортного шума допустимому для жилых комнат дома, расположенного в существующей застройке. Измерения шума проводились в дневное время в течение 30 мин (количество отсчетов — 900).

Измеренные уровни звука разбиваем на интервалы по 5 дБА и результаты заносим в табл. 20.

По формуле (119),  $L_{\text{ЭКВ}} = 10 \lg \frac{1}{100} 29\,706\,642 \approx 55$  дБА.

Результаты измерения уровней звука

Интервалы уровней звука, дБА	Среднее значение уровня звука $L_i$ , дБА	Количество отсчетов с уровнем $L_i$	Время воздействия уровня звука, с	Время воздействия уровня звука, %	Значение $t_i \cdot 10^{0,1L_i}$
38—42	40	369	738	41	$41 \cdot 10^{0,1 \cdot 40} =$ $= 410\,000$
43—47	45	163	326	18,1	572 322
48—52	50	144	288	16	1 600 000
53—57	55	123	246	13,7	4 320 000
58—62	60	76	152	8,4	8 400 000
63—67	65	18	36	2	6 324 000
68—72	70	7	14	0,8	8 000 000
Итого . . . . .		900	1800	100	29 706 642

В соответствии с [13] определяем поправки: характер шума — 0 дБА; место расположения объекта — +5 дБА; время суток — +10 дБА.

Допускаемый уровень  $L_{\text{АЭКВ}}$  равен 30 дБА (см. [13]); с учетом поправок  $L_{\text{АЭКВ}} = 30 + 5 + 10 = 45$  дБА. Следовательно, превышение эквивалентного уровня звука над допустимым составляет 10 дБА (55—45).

Расчетные шумовые характеристики транспортных потоков (дБА) на расстоянии 7,5 м от оси первой полосы (колеи) движения на улицах и дорогах для условий движения транспорта в час «пик» определяют по табл. 1 прилож. V.

Шумовые характеристики потоков железнодорожных поездов  $L_{\text{АЭКВ}}$  (дБА) на расстоянии 7,5 м от оси ближайшей колеи определяют по табл. 2 прилож. V с поправкой по табл. 3 прилож. V.

Шумовые характеристики источников шума внутри групп жилых домов  $L_{\text{АЭКВ}}$  (дБА) на расстоянии 7,5 м от границ источников шума определяют по табл. 4 прилож. V.

### § 31. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОЖИДАЕМОГО ШУМА НА ТЕРРИТОРИИ ЗАСТРОЙКИ И В ЗДАНИЯХ

Зная характеристики источников шума, можно определить ожидаемый уровень звука (дБА) в расчетной точке на территории застройки:

$$L_{\text{Атерп}} = L_{\text{АЭКВ}} - \Delta L_{\text{Ар}} - \Delta L_{\text{АЭКр}} - \Delta L_{\text{Азел}}, \quad (120)$$

где  $L_{A \text{ экв}}$  — шумовая характеристика источника шума, дБА;  $\Delta L_{Ar}$  — снижение уровня звука, дБА, в зависимости от расстояния между источником шума и расчетной точкой;  $\Delta L_{A \text{ экр}}$  — снижение уровня звука экранами на пути распространения звука, дБА;  $\Delta L_{A \text{ зел}}$  — снижение уровня звука полосами зеленых насаждений, дБА (см. табл. 5 прилож. V).

При распространении сферических звуковых волн интенсивность звука изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния  $r^2$ , а при распространении цилиндрических волн — обратно пропорционально расстоянию  $r$ . Поэтому если имеется точечный источник шума с известным уровнем звукового давления или уровнем звука ( $L$ ) на расстоянии  $r$ , то уровень  $L_1$  (дБ) на расстоянии  $r_1$  будет равен

$$L_1 = L - 20 \lg \frac{r_1}{r}, \quad (121)$$

т. е. при каждом удвоении расстояния уровень снижается на 6 дБ без учета поглощения звука в воздухе.

При линейном источнике (дБ)

$$L_1 = L - 10 \lg \frac{r_1}{r}, \quad (122)$$

т. е. при каждом удвоении расстояния уровень снижается на 3 дБ.

К линейным источникам относят железнодорожные поезда и непрерывный поток автомобильного транспорта, а к точечным — все остальные источники городского шума.

На рис. 61 приведен усредненный график снижения уровня звука при удалении от источника при  $r = 7,5$  м. Данные этого графика несколько отличаются от результатов, получаемых по формулам (121) и (122), так как

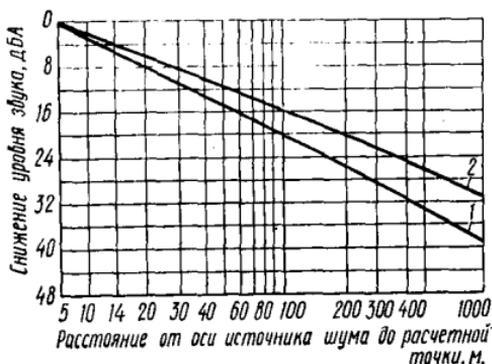


Рис. 61. График снижения уровня звука при удалении от источника шума:

1 — транспортные потоки с интенсивностью движения  $n < 500$  ед/ч, внутриквартальные источники шума, трансформаторные подстанции; 2 — транспортные потоки с интенсивностью движения  $n > 500$  ед/ч, железнодорожные поезда

В действительности отдельные виды источников трудно отнести к точечным или линейным; кроме того, учтено небольшое затухание при распространении звука в воздухе.

**Пример.** Определить уровень звука от потока пассажирских и грузовых поездов на расстоянии 200 м при интенсивности движения 10 пар/ч пассажирских и 5 пар/ч грузовых поездов и средней скорости движения 80 км/ч.

По табл. 2 прилож. V находим значение  $L_{\text{экв}}$  для пассажирских поездов, равное 76 дБА, и 83 дБА — для грузовых поездов. Поправка к этим значениям уровней равна +1 дБА (см. табл. 3 прилож. V). Энергетически складываем уровни 77 (76+1) и 84 (83+1) дБА. При разнице в 7 дБ добавка к более высокому уровню равна 0,8 дБ (см. табл. 1). Следовательно, общий эквивалентный уровень будет равен  $84+0,8 \approx 85$  дБА.

Снижение уровня на расстоянии 200 м равно 20 дБА (рис. 61), поэтому уровень звука в искомой точке будет равен  $85-20=65$  дБА.

Ожидаемый уровень звука в помещении (дБА) равен

$$L_{\text{пом}} = L_{\text{тер2}} - \Delta L_{\text{ок}}, \quad (123)$$

где  $L_{\text{тер2}}$  — уровень звука на территории в 2 м от окна помещения, дБА, определяемый по формуле (122) без учета снижения уровня звука полосами зеленых насаждений;  $\Delta L_{\text{ок}}$  — снижение уровня звука конструкцией окна, дБА, определяемое по табл. 6 прилож. V.

Требуемое снижение уровней звука на территории или в помещении (дБА) определяют по формулам:

$$\Delta L_{\text{тр.тер}} = L_{\text{тер1}} - L_{\text{экв.доп}}; \quad (124)$$

$$\Delta L_{\text{тр.пом}} = L_{\text{пом}} - L_{\text{экв.доп}}, \quad (125)$$

где  $L_{\text{экв.доп}}$  — допустимый уровень звука, дБА, на территории или в помещении, определяемый по [13].

#### УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ РАБОТА

1. Показать различие между уровнями звука и эквивалентными уровнями звука. Показать невозможность использования эквивалентных уровней звука для оценки импульсного шума.

2. Используя дополнительную литературу [3], учесть все факторы, влияющие на затухание звука при его распространении над ровной поверхностью. Результаты сравнить с данными рис. 61.

3. Используя дополнительную литературу [3], учесть все факторы, влияющие на затухание звука при его распространении в условиях городской застройки. Результаты сравнить с данными рис. 61.

4. Определить эквивалентные уровни звука транспортных потоков на улицах, прилегающих к институту, по табл. 1 прилож. V и ГОСТ 20444—75.

5. Показать, как влияет продолжительность измерений уровней звука на точность определения  $L_{\text{экв}}$  по формуле (119).

## **БОРЬБА С ШУМОМ В ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВЕ**

### **§ 32. АРХИТЕКТУРНО-ПЛАНИРОВОЧНЫЕ МЕТОДЫ БОРЬБЫ С ШУМОМ**

Мероприятия по снижению шума в городской застройке и в зданиях необходимо предусматривать в проектах по планировке, застройке, озеленению и благоустройству на всех стадиях проектирования. Так, при районной планировке необходимо решить вопрос о размещении аэропортов и транспортных коммуникаций; на стадии разработки генерального плана города должно быть решение планировочной структуры, сокращающей число источников шума и ограничивающей территории их распространения; на стадии проектирования жилых районов и микрорайонов необходимо решение планировочной и объемно-пространственной композиции застройки и благоустройства, эффективно использующее шумозащитные качества городской среды.

В процессе формирования генерального плана необходимо создавать шумовые карты по магистральной сети от предполагаемого транспортного потока. Такая карта позволит более рационально наметить мероприятия по борьбе с шумом как градостроительного, так и административного характера по организации движения городского транспорта.

При проектировании городов и других населенных пунктов необходимо осуществлять четкое разделение территории по функциональному использованию на зоны: селитебную, промышленную, коммунально-складскую и внешнего транспорта.

При размещении промышленных и коммунально-складских зон следует обеспечивать выполнение норм допустимого шума. В пределах селитебной территории возможно размещение промышленных предприятий, не создающих уровней шума, превышающих нормы допустимого шума и не требующих устройства железнодорожных подъездных путей. Промышленные и коммунально-складские зоны, рассчитанные на большие грузопотоки по транспортным магистралям, как правило, не должны расчленять селитебные зоны на части и вклиниваться в них.

Автомобильные дороги I, II и III категорий не должны пересекать территории городов и других населенных пунктов. В городах необходимо предусматривать обходные железнодорожные линии для пропуска транзитных грузовых поездов.

Сортировочные станции следует размещать за пределами населенных пунктов.

Новые железнодорожные линии и станции следует отделять от жилой застройки защитной зоной шириной не менее 200 м для железнодорожных линий I и II категорий, не менее 150 м для железнодорожных линий III и IV категорий и не менее 100 м от станционных путей, считая от оси крайнего железнодорожного пути. При размещении железнодорожной линии в выемке или устройстве вдоль линии шумозащитных экранов минимальные значения ширины защитной зоны могут быть уменьшены на основании акустического расчета, но не менее чем до 50 м.

При проектировании сети улиц и дорог следует использовать элементы рельефа в качестве естественных преград на пути распространения шума. При необходимости прокладки магистральных улиц и дорог на насыпях и эстакадах должно быть предусмотрено устройство шумозащитных экранов на основе акустического расчета.

При построении улично-дорожной сети следует предусматривать максимально возможное укрупнение межмагистральных территорий, уменьшение количества перекрестков и других транспортных узлов, устройство плавных криволинейных сопряжений дорог.

При планировке селитебной территории предприятия бытового обслуживания, торговли, общественного питания, коммунальные предприятия, административно-хозяйственные, общественные учреждения, объекты связи следует размещать в зоне, примыкающей к источникам шума: транспортным магистралям, гаражам, автостоянкам, промышленным предприятиям. Жилую застройку, детские ясли-сады, учреждения здравоохранения и дома-интернаты для престарелых необходимо размещать в зоне, наиболее удаленной от источников шума.

Жилая застройка при отсутствии мер по защите от шума должна располагаться на расстоянии не менее 100 м от края проезжей части скоростных дорог и дорог преимущественно грузового движения, не менее 75 м от

магистральных улиц общегородского значения, не менее 50 м от магистральных улиц районного значения и не менее 25 м от жилых улиц.

Свободная планировка участков, прилегающих к транспортным магистралям, может применяться лишь на основе соответствующих обоснований. Наиболее целесообразное решение — застройка магистралей протяженными зданиями-экранами, препятствующими распространению звука в глубь застройки. Экранами могут быть также искусственные и естественные элементы рельефа местности (выемки, земляные кавальеры, насыпи, холмы и др.), а также различные сооружения (подпорные ограждающие и специальные защитные стенки и др.). Уменьшение уровня звука за экранами определяется размерами экрана, расстоянием от него источника шума и расчетной точки, положением расчетных точек по отношению к верху экрана, наконец соотношением длин звуковых волн и экрана. Вследствие явления дифракции звуковые волны огибают экран, поэтому за экраном практически всегда будет шум того или иного уровня.

Точный расчет снижения шума экранами достаточно сложен, что определяет целесообразность использования практического метода. Расчет эффективности снижения шума экранами без учета затухания при удалении от источника ведется в следующей последовательности. Вычерчивают в масштабе поперечный разрез и план места расположения источника шума, экрана и расчетной точки (рис. 62). Источник шума располагается на наиболее удаленной полосе движения транспорта на высоте 1 м от поверхности дорожного покрытия. Определяют расстояния  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $\delta = (a+b) - c$  в соответствии со схемами рис. 62.

По табл. 1 прилож. VI определяют снижение уровня звука экраном  $\Delta L'_{\text{экp}}$  (дБА) в зависимости от  $\delta$ .

Определяют углы  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  (рис. 62) при принятой длине экрана и затем снижение уровня звука  $\Delta L_{\text{экp}\alpha_1}$  и  $\Delta L_{\text{экp}\alpha_2}$  (дБА) в зависимости от  $\Delta L'_{\text{экp}}$  и углов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  по табл. 2 прилож. VI.

По табл. 3 прилож. VI в зависимости от разности величин  $\Delta L_{\text{экp}\alpha_1}$  и  $\Delta L_{\text{экp}\alpha_2}$  (дБА) определяют поправку  $\Lambda$  (дБА), прибавляемую к меньшей величине  $\Delta L_{\text{экp}\alpha_1}$  или  $\Delta L_{\text{экp}\alpha_2}$ :

$$\Delta L_{\text{экp}} = \Delta L_{\text{экp}\alpha} + \Lambda. \quad (126)$$

Величина  $\Delta L_{\text{экран}}$  определяет эффективность снижения уровня звука (дБА) экранирующим сооружением в расчетной точке.

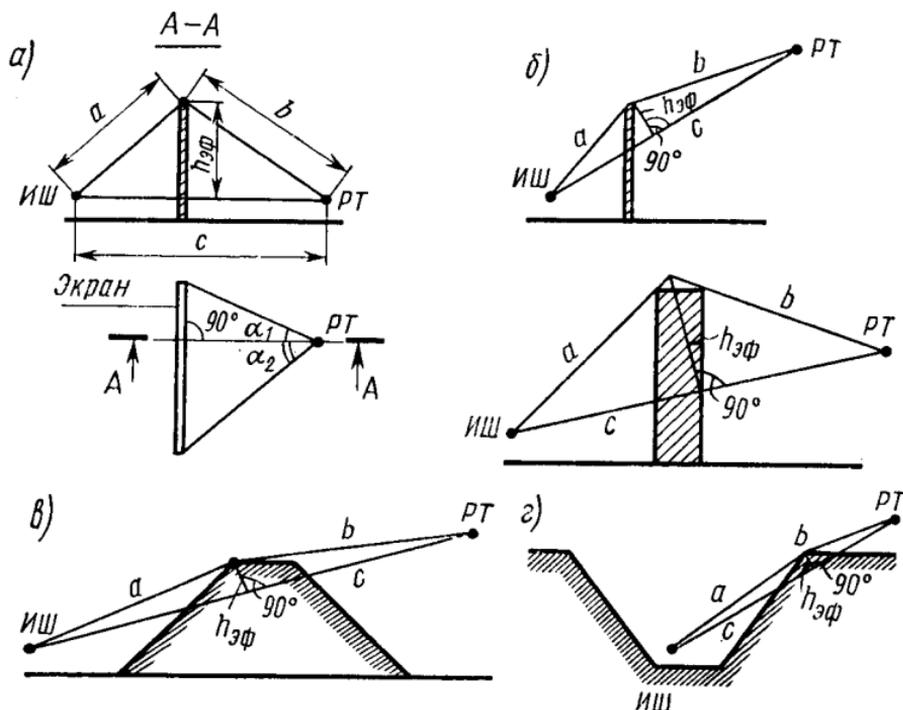


Рис. 62. Расчетные схемы для определения снижения уровня звука экранами:

$a$  — стенка;  $b$  — стенка и здание;  $в$  — насыпь;  $г$  — выемка; ИШ — источник шума; РТ — расчетная точка;  $h_{\text{эф}}$  — эффективная высота экрана

**Пример.** Для данных рис. 63 определить эффективность снижения шума зданием, являющимся экраном для расчетной точки.

Расстояния  $a$ ,  $b$  и  $c$  соответственно равны 53, 48 и 61 м,  $\delta = (53 + 48) - 61 = 40$  м.

По табл. 1 прилож. VI находим  $\Delta L'_{\text{экран}} = 24$  дБА (при значениях  $\delta > 6$  принимаем максимальную величину  $\Delta L'_{\text{экран}}$ ).

Углы  $\alpha_1 = 45^\circ$ ,  $\alpha_2 = 65^\circ$ .

По табл. 2 прилож. VI находим  $\Delta L_{\text{экран}\alpha_1} = 3,5$  дБА;  $\Delta L_{\text{экран}\alpha_2} = 8,2$  дБА.

Разность  $\Delta L_{\text{экран}\alpha_2} - \Delta L_{\text{экран}\alpha_1} = 8,2 - 3,5 = 4,7$  дБА.

По табл. 3 прилож. VI находим  $\Lambda = 1,7$  дБА.

Определяем эффективность экрана:  $\Delta L_{\text{экран}} = \Delta L_{\text{экран}\alpha_1} + \Lambda = 3,5 + 1,7 = 5,2$  дБА.

Небольшое снижение уровня звука обусловлено расположением расчетной точки вдали от здания (около 30 м) и около одной торцевой стороны; при приближении расчетной точки к зданию значения углов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  увеличатся и  $\Delta L_{\text{экран}\alpha}$  также возрастет, что приведет к повышению значения  $\Delta L_{\text{экран}}$ .

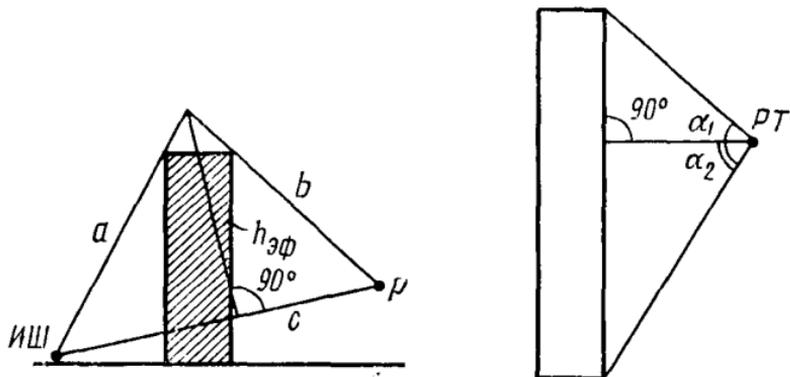


Рис. 63. Определение снижения уровня звука зданием

Снижение уровня звука экраном  $\Delta L_{\text{Дэкр}}$  (дБА) от источников шума внутри групп жилых домов и трансформаторов следует принимать по табл. 4 прилож. VI; при этом длина экрана принимается в два раза больше длины источника шума. Значение эффективной высоты экрана принимается согласно рис. 62.

Одним из наиболее эффективных способов защиты жилой среды от транспортного шума является строительство домов-экранов вдоль транспортных магистралей. На рис. 64 показано снижение уровня звука за зданием-экраном (без учета затухания звука с расстоянием). Цифры на кривых равных уровней показывают снижение уровня звука (дБА) по сравнению с уровнем на транспортной магистрали.

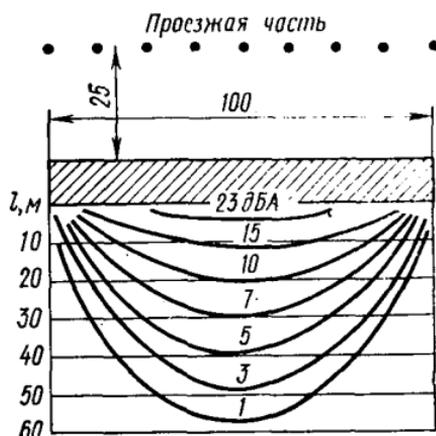


Рис. 64. Снижение уровня звука за зданием — экраном без учета затухания звука с расстоянием (размеры даны в метрах)

Если в качестве экрана используется жилой дом, то необходимы специальные мероприятия по улучшению шумового режима в самом доме (такие дома иногда называют шумозащищенными). Дома могут иметь такое планировочное решение, при котором окна всех жилых помещений квартиры ориентированы на дворовый фа-

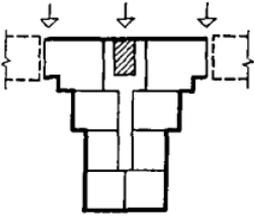
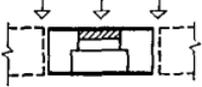
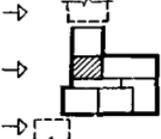
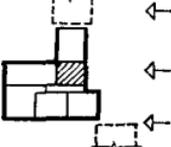
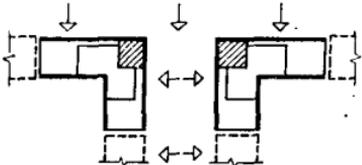
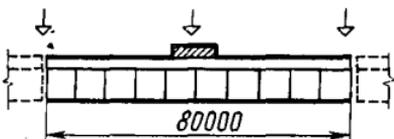
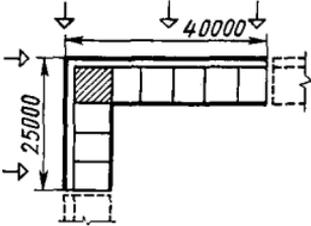
Планировочная схема блок-секций	Типы блок-секций	Ориентация по странам света жилых комнат
	Секционный; рядовая	Юг, восток, запад
	—>>—	—>>—
	—>>—	Восток
	—>>—	Запад
	Секционный; угловая	Юг, восток, запад
	Галерейный; рядовая	—>>—
	Галерейный; угловая	—>>—

Рис. 65. Примеры планировочных схем жилых домов — экранов (стрелкой показано направление распространения транспортного шума)

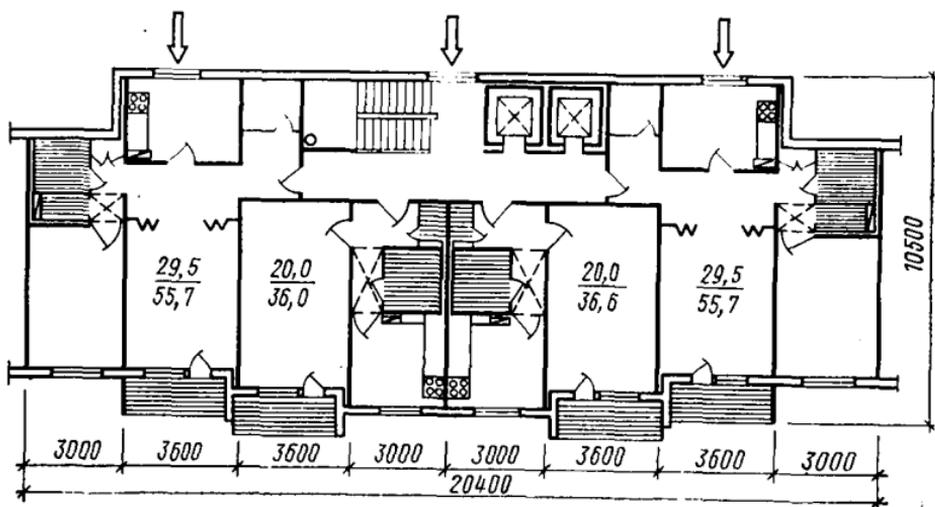


Рис. 66. Четырехквартирная секция 9—12-этажного жилого дома-экрана

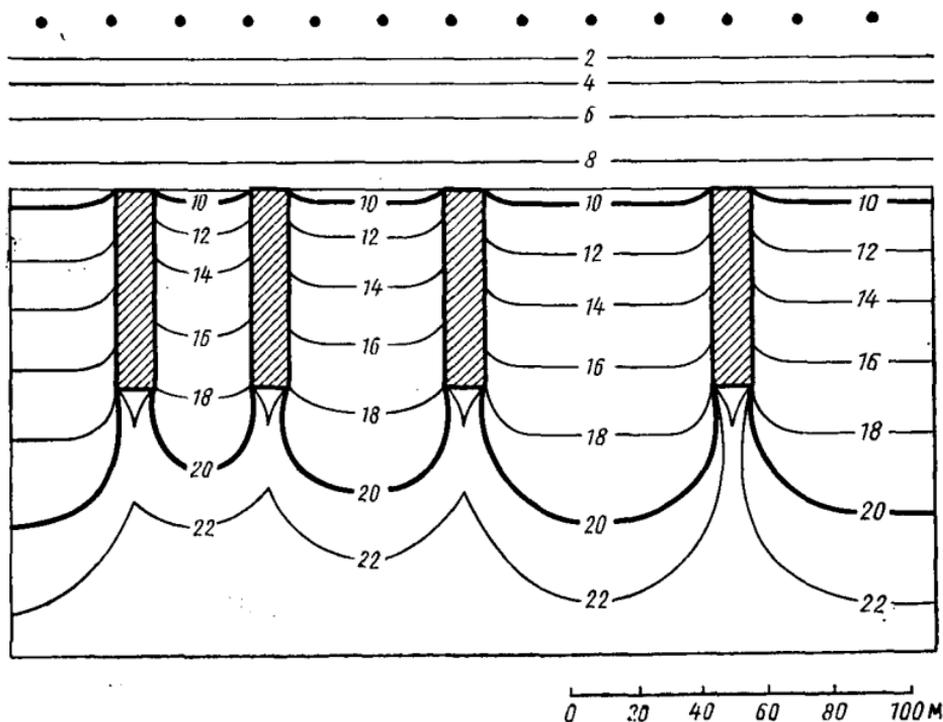


Рис. 67. Карта шума примагистральной территории для строчной застройки

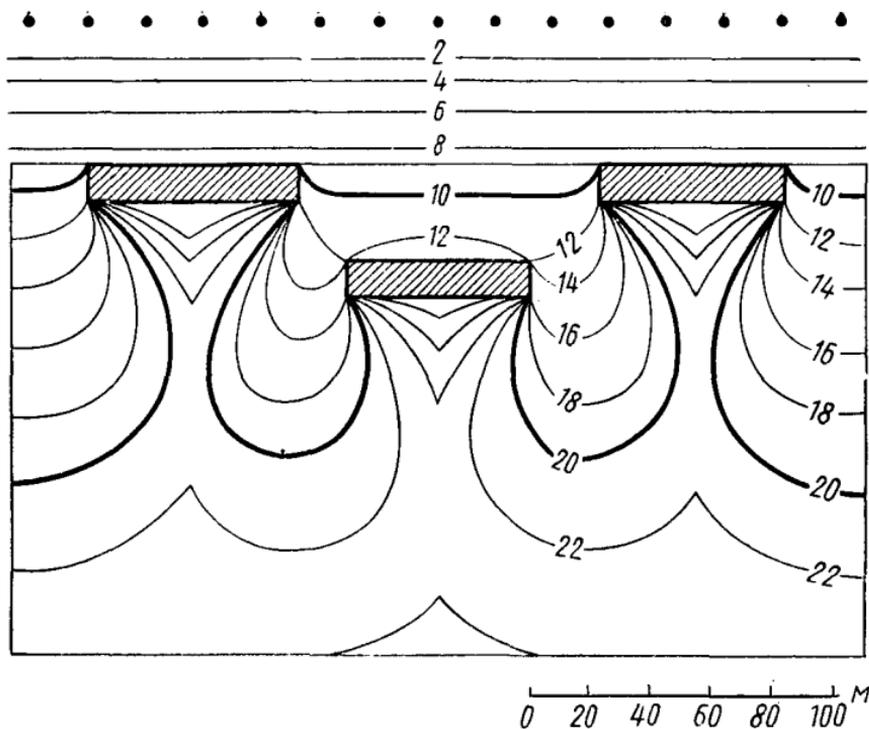


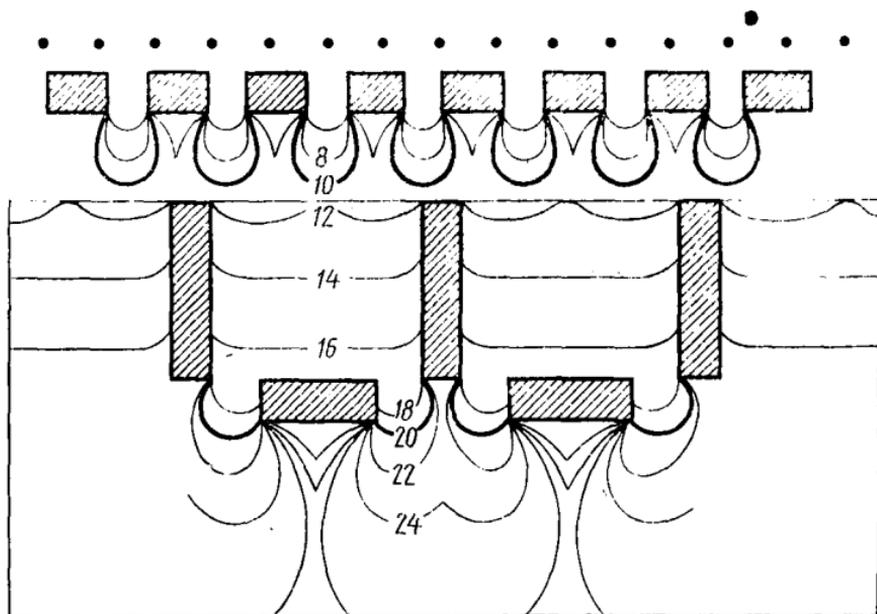
Рис. 68. Карта шума примагистральной территории для периметральной застройки

сад в сторону звуковой тени за домом. Возможно и обычное планировочное решение с устройством шумозащитных окон при условии обеспечения нормативного воздухообмена (см. § 33). Наконец, возможно расположение части жилых комнат квартиры (спален) со стороны дворового фасада, а общие и другие помещения могут быть ориентированы на транспортную магистраль.

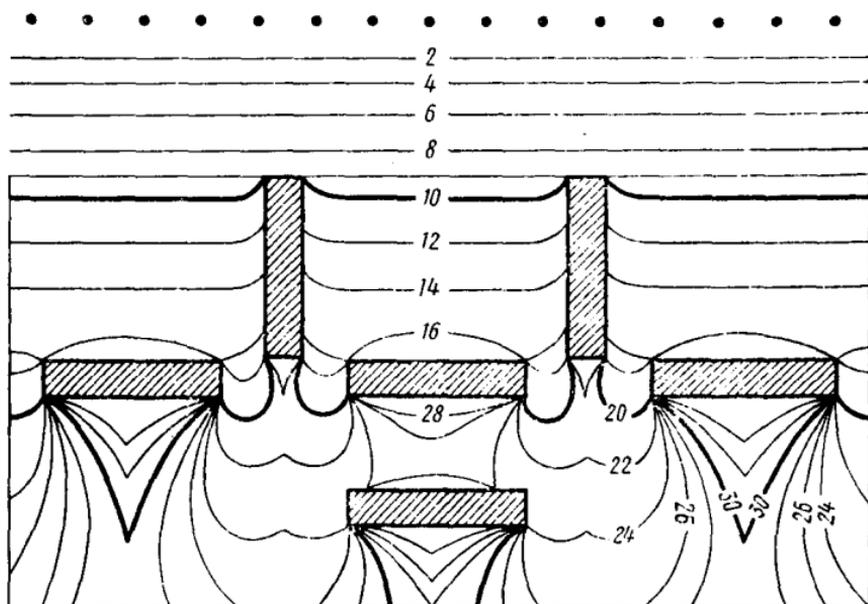
Дома первого типа нельзя размещать вдоль северных сторон магистралей, так как при этом не обеспечиваются нормативные условия ориентации и инсоляции квартир. В домах второго типа нарушена непосредственная связь жилых помещений с внешней средой. Дома третьего типа можно размещать вдоль любых сторон магистралей, однако часть помещений квартир не защищена от шума.

На рис. 65 даны примеры планировочных схем указанных типов домов-экранов, а на рис. 66 — четырехквартирная секция 9—12-этажного жилого дома-экрана.

По условиям защиты от шума внутриквартальной территории высота домов-экранов не должна быть ниже



0 20 40 60 80 100 м



0 20 40 60 80 100 м

Рис. 69. Карты шума примагистральной территории для групповой застройки

9 этажей. В таких домах целесообразно размещение предприятий торгового и бытового назначения путем пристройки их со стороны галерей и нежилых помещений квартир.

Для некоторого снижения шума в городской застройке могут использоваться зеленые насаждения. Если посадки густолиственные, со смыкающимися кронами, высотой не менее 5—8 м и шириной не менее 10 м, снижение уровня звука  $\Delta L_{\text{Азел}}$  может составить от 4 до 12 дБА (см. табл. 5 прилож. V).

Для выявления шумового режима на территории застройки в целом и по отдельным участкам микрорайонов часто используют карты шума, представляющие собой кривые равных уровней, нанесенные на схему плана; они характеризуют уменьшение уровня шума при удалении от магистрали. Такие карты получены в результате экспериментальных исследований в натуре и на моделях для большинства характерных планировочных схем (см. [3]). В качестве примера на рис. 67—69 даны карты шума для строчной, периметральной и групповой застройки с экранами.

### § 33. СТРОИТЕЛЬНО-АКУСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ БОРЬБЫ С ШУМОМ

В гл. VII (§ 20) было показано, что звукоизоляция наружных стен в основном обусловлена звукоизоляцией оконных проемов. Однако при использовании облегченных (слоистых) конструкций стен их звукоизоляция не должна быть ниже 40 дБ, иначе при применении окон с повышенной звукоизоляцией (более 30 дБ) через стены будет проходить ощутимая часть звуковой энергии.

В табл. 6 прилож. V приведены значения звукоизоляции для окон жилых зданий. Следует отметить, что снижение уровня звука окном с открытой форточкой составляет около 10 дБА.

**Пример.** Для данных примера, рассмотренного в § 31, определить уровни звука в жилой комнате и требуемую звукоизоляцию окна для достижения нормативных требований.

На расстоянии 2 м от окна уровень звука равен 65 дБА;  $\Delta L_{\text{Аок}}$  для открытого окна равно 10 дБА. По формуле (123) определяем  $L_{\text{Апом}} = L_{\text{Атер2}} - \Delta L_{\text{Аок}} = 65 - 10 = 55$  дБА.

Если примем значение допустимого уровня звука для условий дневного времени  $L_{\text{А экв доп}} = 45$  дБА (см. пример в § 30), то очевидно, что при открытой форточке уровень звука в жилой комнате

превышает нормативные требования на 10 дБА (55—45); они будут выполняться лишь в осеннее и зимнее время при закрытых окнах.

Если шум проникает через окна в помещения другого назначения, то ожидаемый уровень звукового давления можно определить по более точной формуле, учитывающей звукопоглощение в помещении:

$$L_{\text{пом}} = L_{\text{тер}2} - R_{\text{ок}} + 10 \lg S - 10 \lg B + 6, \quad (127)$$

где  $R_{\text{ок}}$  — изоляция воздушного шума окнами, дБ; ( $R_{\text{ок}} \approx \Delta L_{\text{ок}}$ );  $B$  — постоянная помещения, м<sup>2</sup>;  $S$  — площадь окна, м<sup>2</sup>.

Для уменьшения транспортного шума МНИИТЭП разработал специальные раздельно-сближенные окна с двойным остеклением, а также с тройным остеклением, имеющие примерно на 15 дБ большую звукоизоляцию, чем обычные спаренные окна.

#### УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ РАБОТА

1. Для конкретных данных определить наиболее целесообразные границы применения экранирующих сооружений.

2. Оценить эффективность здания-экрана в зависимости от его длины, высоты и расположения расчетной точки и сделать практические выводы о целесообразности размещения застройки в зоне акустической тени.

3. Используя планировочные схемы (см. рис. 65), разработать курсовой или дипломный проект жилого дома-экрана с проведением всех необходимых акустических расчетов.

4. Оценить возможность уменьшения транспортного шума для конкретных условий.

5. Используя схемы рис. 67—69, а также [3], разработать варианты застройки, обеспечивающие получение акустического комфорта на большей территории.

6. Оценить технико-экономическую целесообразность использования архитектурно-планировочных методов борьбы с шумом (увеличение расстояния от магистрали, зонирование территории и т. п.).

Анализ можно провести на примере курсового и дипломного проекта, а затем сделать обобщающие выводы.

7. Сравнить эффективность уменьшения транспортного шума за счет увеличения звукоизоляции окон и удаления застройки от магистрали.

8. С помощью шумомера получить акустическую характеристику определенного городского участка и оценить эффективность архитектурно-планировочных и строительно-акустических методов борьбы с шумом.

9. Проанализировать формулы (127) и (110); показать их сходство и различие.

# Приложения

Приложение I

Таблица 1

Значение коэффициента  $\mu$ ,  $\text{м}^{-1}$ , при температуре  $20^\circ \text{C}$

Относительная влажность воздуха, %	Значение коэффициента $\mu$ на частоте, Гц	
	2000	4000
30	0,0119	0,0379
40	0,0104	0,0287
50	0,0096	0,0244
60	0,0093	0,0224
70	0,0085	0,0213
80	0,0081	0,0204

Таблица 2

Коэффициенты звукопоглощения материалами и конструкциями

Материалы или конструкции	Коэффициенты звукопоглощения при среднегеометрических частотах октавных полос, Гц					
	125	250	500	1000	2000	4000
<i>Полы</i>						
Пол, натертый мастикой, на деревянных балках	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,06
Паркет по асфальту	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
Паркет по деревянному основанию	0,10	0,10	0,10	0,08	0,06	0,06
5-миллиметровая резина на полу	0,04	0,04	0,08	0,12	0,03	0,10
Ковер шерстяной обычного типа	0,08	0,08	0,20	0,26	0,27	0,37
То же, на войлочной подкладке	0,11	0,14	0,37	0,43	0,27	0,30

Материалы или конструкции	Коэффициенты звукопоглощения при среднегеометрических частотах октанных полос, Гц					
	125	250	500	1000	2000	4000
Линолеум толщиной 5 мм по твердому основанию	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04
<i>Стены и потолки</i>						
Бетон	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Бетон окрашенный	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Стена кирпичная нештукатуренная	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07
Стена кирпичная оштукатуренная и окрашенная масляной краской	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03
Мрамор, гранит и др.	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Сухая штукатурка	0,02	0,05	0,06	0,08	0,05	0,05
Сухая штукатурка на расстоянии 5 см от поверхности	0,30	0,25	0,15	0,08	0,05	0,05
Деревянная обшивка (сосна) толщиной 19 мм	0,10	0,10	0,10	0,08	0,08	0,11
Деревянная панель толщиной 5—10 мм с воздушным промежутком (около 50 мм)	0,25	0,15	0,06	0,05	0,04	0,04
Остекление	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
<i>Занавеси и драпировки</i>						
Свободно висящая ткань в виде драпри при $p$ , кг/м <sup>2</sup> :						
0,35	0,04	0,04	0,11	0,17	0,30	0,35
0,60 (бархат)	0,10	0,30	0,50	0,50	0,72	0,65
0,65 (портьеры плюшевые складками)	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65
<i>Звукопоглотители</i>						
Цилиндрические сегменты из 3-миллиметровой фанеры, покрытой мягким оргалитом:						
длина хорды 40 см, стрела выноса 35 см,	0,35	0,29	0,26	0,11	0,08	0,07
длина хорды 70 см, стрела выноса 32 см;	0,30	0,34	0,35	0,32	0,28	0,26

Продолжение табл. 2 прилож. 1

Материалы или конструкции	Коэффициенты звукопоглощения при среднегеометрических частотах октавных полос, Гц					
	125	250	500	1000	2000	4000
Панели по каркасу из брусков 8×10 см, обитые фанерой с шагом ячеек 0,5×0,7 м и с воздушной прослойкой толщиной 10 см при толщине фанеры 3 мм	0,32	0,35	0,19	0,13	0,11	0,10
Перфорированные конструкции из 3-миллиметровой фанеры по деревянным рамкам 60×60 см, заполненные асбестовой ватой в мешковине, толщиной 50 мм, при диаметре отверстий:						
4 мм и расстоянии по центрам отверстий 40 мм	0,27	0,43	0,36	0,25	0,15	0,13
6 мм и расстоянии по центрам отверстий 25 мм	0,20	0,46	0,58	0,52	0,42	0,31
Инсулит толщиной 20 мм	0,15	0,18	0,29	0,32	0,29	0,30
Арболит толщиной 20 мм	0,15	0,25	0,39	0,42	0,43	0,42
Плиты из пористой керамики толщиной 30 мм	0,15	0,20	0,26	0,50	0,66	0,57
Маты из дутьевого стекловолокна толщиной 25 мм, расположенные за жесткими перфорированными древесноволокнистыми плитами	0,30	0,42	0,72	0,87	0,76	0,79
Гипсовые перфорированные плиты с пористым наполнителем, выпускаемые Беличским комбинатом строительных материалов (УССР):						
без воздушного промежутка	0,10	0,25	0,50	0,90	0,65	0,40
с воздушным промежутком 100 мм	0,20	0,70	0,90	0,70	0,65	0,35

Материалы или конструкции	Коэффициенты звукопоглощения при среднегеометрических частотах октавных полос, Гц					
	125	250	500	1000	2000	4000
Плиты минераловатные, акустические, выпускаемые комбинатом «Красный строитель» (г. Воскресенск Московской области):						
перфорированные (ПА/о) без воздушного промежутка	0,05	0,15	0,65	0,90	0,80	0,40
то же, с воздушным промежутком 100 мм	0,20	0,50	0,90	0,80	0,75	0,40
отделочные с набрызгом (ПА/с), без воздушного промежутка	0,05	0,10	0,60	0,80	0,85	0,80
то же, с воздушным промежутком 100 мм	0,15	0,60	0,90	0,85	0,80	0,75
гладкие декоративные (ПА/д), без воздушного промежутка	0,05	0,55	0,50	0,50	0,25	0,10
то же, с воздушным промежутком 100 мм	0,30	0,60	0,50	0,50	0,25	0,10
Пористые акустические плиты «Акмигран», выпускаемые Павшинским комбинатом гипсовых и термоизоляционных изделий (Москва) размером 300×300:						
плиты без воздушного промежутка	0,05	0,15	0,50	0,85	0,80	0,70
плиты с воздушным промежутком 100 мм	0,25	0,60	0,75	0,80	0,80	0,70
Плиты «Винипор» полужесткие с огнестойкой пропиткой толщиной 30 мм (ТУ В-66—70)	0,15	0,25	0,56	0,85	1,0	1,0

Материалы или конструкции	Коэффициенты звукопоглощения при среднегеометрических частотах октавных полос, Гц					
	125	250	500	1000	2000	4000
Маты из супертонкого стекловолнока толщиной 50 мм (ТУ 21-01-224—69), покрытые стеклотканью ССТЭ-6 (ГОСТ 19907—74)	0,4	0,85	0,98	1,0	0,93	0,97
Маты из супертонкого базальтового волокна толщиной 50 мм (РСТ УССР 5013—76), покрытые оболочкой из декоративной стеклоткани (ТСД ТУ 6-11-51—74)	0,2	0,9	1,0	1,0	0,95	0,95
Плиты «Силакпор» толщиной 45 мм	0,31	0,34	0,49	0,60	0,76	0,93
Прошивные минераловатные маты толщиной 100 мм (ТУ 21-24-51—73). Облицовка: гипсовая плита размером 500×500 (ТУ 400-1-283—73), подклеенная бязью, перфорация диаметром 7—9 мм — 13%	0,40	0,89	0,97	0,76	0,70	0,71
Супертонкое стекловолноко толщиной 100 мм (ТУ 21-01-224—69). Облицовка: стеклоткань Э-0,1 (ГОСТ (19907—74), гипсовая плита размером 500×500, перфорация диаметром 7—9 мм — 13%	0,66	1,0	1,0	1,0	0,96	0,7
<i>Отверстия</i>						
Проем сцены	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Отверстие оркестровой ямы	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4

Примечание. Для среднегеометрической частоты, равной 63 Гц, значения коэффициента звукопоглощения могут быть взяты примерно в два раза меньше по сравнению с частотой 125 Гц, а для частоты 8000 Гц — примерно такие же, что и для частоты 4000 Гц.

Таблица 3

Эквивалентная площадь звукопоглощения, м<sup>2</sup>, зрителями и креслами

Зрители и кресла	Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц					
	125	250	500	1000	2000	4000
Зрители на мягком кресле	0,25	0,30	0,40	0,45	0,45	0,40
То же, на жестком кресле	0,20	0,25	0,30	0,35	0,35	0,35
Кресло деревянное жесткое	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05
Кресло с обивкой сиденья и спинки искусственной кожей	0,08	0,10	0,12	0,10	0,10	0,08
Полумягкое кресло, обитое тканью	0,08	0,10	0,15	0,15	0,20	0,20
Мягкое кресло, обитое тканью с пористым наполнителем сиденья и спинки	0,15	0,20	0,20	0,25	0,30	0,30

Таблица 4

Значения функции  $\varphi(\alpha_{ср}) = -\ln(1 - \alpha_{ср})$  в зависимости от  $\alpha_{ср}$ 

Десятые доли $\alpha_{ср}$	Сотые доли $\alpha_{ср}$									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,1	0,10	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,19	0,20	0,21
0,2	0,22	0,24	0,25	0,26	0,27	0,29	0,30	0,32	0,33	0,34
0,3	0,36	0,37	0,39	0,40	0,42	0,43	0,45	0,46	0,48	0,49
0,4	0,51	0,53	0,54	0,56	0,58	0,60	0,62	0,64	0,65	0,67
0,5	0,69	0,71	0,73	0,76	0,78	0,80	0,82	0,84	0,87	0,89
0,6	0,92	0,94	0,97	0,99	1,02	1,05	1,08	1,11	1,14	1,17
0,7	1,20	1,24	1,27	1,31	1,35	1,39	1,43	1,47	1,51	1,56
0,8	1,61	1,66	1,72	1,77	1,83	1,90	1,97	2,04	2,12	2,21

Пример. Для  $\alpha_{ср} = 0,39$  находим из таблицы  $\varphi(\alpha_{ср}) = 0,49$ .

Скорость продольных волн  $c_1$  для материалов

Наименование материала	Скорость $c_1$ , м/с
Бетон, железобетон	3700
Гипсобетон, шлакобетон	4000
Шлакопемзобетон, легкий бетон	3500
Кирпичная кладка	2300

Таблица 2

Значение индекса изоляции воздушного шума перекрытиями  $I_B$ , дБ, в зависимости от индекса изоляции воздушного шума несущей плитой перекрытия  $I_{B0}$ , дБ, и собственной частоты колебаний пола  $f_0$ , Гц

Конструкция пола	$f_0$ , Гц	Значение $I_B$ , дБ, в зависимости от $I_{B0}$ , дБ				
		41	44	47	50	53
Деревянные полы по лагам, уложенным на упругие ленточные прокладки, имеющие значение $E_d = 5 \cdot 10^4 \div 12 \cdot 10^4$ кгс/м <sup>2</sup> (Па)	150	51	52	53	54	55
	220	48	50	51	52	54
	350	46	47	49	51	53
	500	44	46	48	50	52
Пол на монолитной стяжке или сборных плитах с поверхностной плотностью 60—120 кг/м <sup>2</sup> по упругому слою толщиной 20—25 мм в обжатом состоянии, имеющему значение $E_d = 3 \times 10^4 \div 10 \cdot 10^4$ кгс/м <sup>2</sup>	100	50	51	52	53	54
	150	48	49	51	52	53
	220	45	47	49	51	53
Пол на монолитной стяжке или сборных плитах с поверхностной плотностью 60—120 кг/м <sup>2</sup> по засыпке из песка или шлака толщиной 50—60 мм, имеющей значение $E_d = 8 \cdot 10^5 \div 13 \cdot 10^5$ кгс/м <sup>2</sup> (Па)	220	50	51	52	53	54
	350	47	49	50	52	53
	500	45	47	49	51	53

Примечания: 1. 1 кгс/м<sup>2</sup>  $\approx$  10 Па.

2. При увеличении толщины упругих прокладок до 40 мм в обжатом состоянии следует к значению  $I_B$  прибавить 1 дБ.

3. При увеличении толщины засыпки до 90—100 мм следует к значению  $I_B$  прибавить 1 дБ.

Значения динамического модуля упругости  $E_d$  и относительного сжатия  $\epsilon$  материалов упругих слоев в зависимости от нагрузки  $p$  на них и плотности

Материал	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Значения $E_d$ , кгс/м <sup>2</sup> , и $\epsilon$ в зависимости от нагрузки $p$ на упругий слой, кгс/м <sup>2</sup>					
		200		500		1000	
		$E_d$	$\epsilon$	$E_d$	$\epsilon$	$E_d$	$\epsilon$
Плиты теплоизоляционные из минеральной ваты на синтетическом связующем по ГОСТ 9573—72: полужесткие жесткие	100—125	4,5·10 <sup>4</sup>	0,5	5,5·10 <sup>4</sup>	0,55	7·10 <sup>4</sup>	0,7
	126—150	5·10 <sup>4</sup>	0,45	6·10 <sup>4</sup>	0,5	8·10 <sup>4</sup>	0,6
Плиты минераловатные на синтетическом связующем по ТУ 21-24-52—73: полужесткие жесткие	70—90	3,6·10 <sup>4</sup>	0,5	4,5·10 <sup>4</sup>	0,55	5,6·10 <sup>4</sup>	0,65
	95—110	4·10 <sup>4</sup>	0,4	5·10 <sup>4</sup>	0,45	6·10 <sup>4</sup>	0,55
Маты минераловатные прошивные по ТУ 21-24-51—73 То же	75—125	4·10 <sup>4</sup>	0,65	5·10 <sup>4</sup>	0,7	—	—
	126—175	5·10 <sup>4</sup>	0,5	6,5·10 <sup>4</sup>	0,55	—	—
Плиты древесноволокнистые мягкие по ГОСТ 4598—74 Шлак крупностью до 15 мм Песок прокаленный	250	10·10 <sup>4</sup>	0,1	11·10 <sup>4</sup>	0,1	12·10 <sup>4</sup>	0,15
	500—800	80·10 <sup>4</sup>	0,08	90·10 <sup>4</sup>	0,09	—	—
	1300—1500	120·10 <sup>4</sup>	0,03	130·10 <sup>4</sup>	0,04	—	—

Примечания: 1. Для нагрузок, не указанных в таблице, величины  $E_d$  и  $\epsilon$  следует принимать по линейной интерполяции.

2. При переводе значений  $E_d$  и  $p$  в СИ принимается 1 кгс/м<sup>2</sup> = 10 Па.

Значения индекса  $I_{y0}$  приведенного уровня ударного шума под несущей плитой перекрытия и номера кривой  $\Delta L_T$  на рис. 54

Поверхностная плотность несущей плиты перекрытия, кг/м <sup>2</sup>	Значения $I_{y0}$ , дБ	Номер требуемой кривой $\Delta L_T$ на рис. 54
<i>Со сплошными и многпустотными плитами</i>		
150	91	I
200	88	II
250	86	III
300	84	IV
350	82	V
450	80	VI
<i>С отдельными потолками</i>		
150	88	II
200	84	IV
250	82	V
300	80	VI

Таблица 2

Величина  $\Delta I_y$ , характеризующая уменьшение приведенного уровня ударного шума под перекрытием при наличии рулонного пола

Покрытие пола	Толщина, мм	$\Delta I_y$ , дБ
1	2	3
Теплозвукоизоляционный поливинилхлоридный линолеум на основе из лубяных волокон	5,5	22
То же	3,5	16
Поливинилхлоридный линолеум с подосновой из нитрона	3,6	19
То же	5,1	25
Теплозвукоизоляционный линолеум на иглопробивной латексированной основе из лубяных волокон, горячее дублирование	3,8	18
Теплозвукоизоляционный линолеум на иглопробивной основе из вторичных отходов с защитным синтетическим слоем, горячее дублирование	4,5	22
Теплозвукоизоляционный линолеум на иглопробивной основе из поливинилхлоридных волокон, холодное дублирование	3,7	20

Покрытие пола	Толщина, мм	$\Delta I_y$ , дБ
1	2	3
Дублированный теплозвукоизолирующий линолеум на вязально-прошивной подкладке	3,7	16
Двухслойный релин на войлочной подоснове	3,7	16
Ворсолин беспетлевой на вязально-прошивной подкладке	4,5	20
Ворсолин беспетлевой с рифленой поверхностью	4,2	19

Таблица 3

Значение индекса приведенного уровня ударного шума под перекрытием  $I_y$  в зависимости от индекса приведенного уровня ударного шума несущей плиты перекрытия  $I_{y0}$  и частоты собственных колебаний пола  $f_0$

Конструкция пола	$f_0$ , Гц	Значение $I_y$ в зависимости от $I_{y0}$ , дБ					
		91	88	86	84	82	80
		3	4	5	6	7	8
1	2	3	4	5	6	7	8
Деревянные полы по лагам, уложенным на упругие ленточные прокладки, имеющие значение $E_d = 5 \cdot 10^4 \div 12 \times 10^4$ кгс/м <sup>2</sup>	150	66	65	63	62	61	61
	220	68	67	65	64	62	61
	350	71	69	67	66	64	63
Пол на монолитной стяжке или сборных плитах с поверхностной плотностью 60 кг/м <sup>2</sup> по упругому слою, имеющему значение $E_d = 3 \times 10^4 \div 10 \cdot 10^4$ кгс/м <sup>2</sup>	60	68	65	63	61	58	56
	100	70	67	65	64	63	62
	150	75	72	70	68	67	65
	200	77	75	73	71	69	67
То же, по слою из песка или шлака, имеющему значение $E_d = 8 \times 10^5 \div 13 \cdot 10^5$ кгс/м <sup>2</sup>	150	69	67	65	64	62	61
	250	74	72	70	68	67	66
	350	78	76	74	73	71	70
Пол на монолитной стяжке или сборных плитах с поверхностной плотностью 120 кг/м <sup>2</sup> по упругому слою, имеющему значение $E_d = 3 \times 10^4 \div 10 \cdot 10^4$ кгс/м <sup>2</sup>	60	66	63	61	59	57	55
	100	70	67	65	64	62	60
	150	74	71	69	67	65	63
	200	75	72	71	69	67	65

1	2	3	4	5	6	7	8
То же, по слою из песка или шлака, имеющему значение $E_d = 8 \times 10^5 \div 13 \cdot 10^5$ кгс/м <sup>2</sup>	150	68	65	63	62	60	59
	250	72	70	68	66	65	64
	350	76	74	72	71	69	68

Примечания: 1. При поверхностной плотности монолитной стяжки или сборной плиты пола между 60 и 120 кгс/м<sup>2</sup> индексы  $I_y$  следует определять по линейной интерполяции с округлением до целого числа.

2. При переводе в СИ принимается  $1 \text{ кгс/м}^2 \approx 10 \text{ Па}$ .

Приложение IV

Таблица 1

Определение постоянной помещения  $V_{1000}$

Описание помещения	$V_{1000}, \text{ м}^3$
С небольшим количеством людей (металлообрабатывающие и металлургические цехи, вентиляционные камеры, генераторные, машинные залы, испытательные стенды и т. п.)	$\frac{V}{20}$
С жесткой мебелью и большим количеством людей или с небольшим количеством людей и мягкой мебелью (лаборатории, ткацкие и деревообрабатывающие цехи, кабинеты и т. п.)	$\frac{V}{10}$
С большим количеством людей и мягкой мебелью (рабочие помещения административных зданий, конструкторские залы, аудитории, помещения аэропортов и вокзалов, залы ожидания, кассы, жилые помещения и т. п.)	$\frac{V}{6}$
Помещения со звукопоглощающей облицовкой потолка и части стен	$\frac{V}{1,5}$

Таблица 2

Определение частотного множителя  $\mu$

Объем помещения $V, \text{ м}^3$	Значения $\mu$ при среднегеометрических частотах, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$\leq 200$	0,8	0,75	0,7	0,8	1	1,4	1,8	2,5
200—1000	0,65	0,62	0,64	0,75	1	1,5	2,4	4,2
$> 1000$	0,5	0,5	0,55	0,7	1	1,6	3,0	6,0

Таблица 3

**Частотные характеристики уровней звукового давления  
на рабочих местах**

Наименования предприятий и цехов	Суммарный уровень звуко- вого давления, дБ	Уровни звукового давления, дБ, при среднегеометрических частотах октавных полос, Гц							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Цехи мельниц ремонт- ных заводов	115	105	100	104	108	106	103	96	85
Формовочные цехи за- водов железобетонных конструкций	110	103	100	98	101	102	102	100	90
Цехи дробления кам- ня	112	91	93	100	100	105	107	108	82
Лесопильные цехи де- ревообделочных комби- натов	100	83	90	85	98	92	92	90	85
Ремонтно - строитель- ные цехи	105	83	90	90	100	100	93	85	80
Компрессорные цехи	100	88	88	90	94	92	88	78	70
Заводы искусственно- го волокна	100	80	86	83	86	89	90	90	82
Прядильные цехи	98	80	83	90	85	88	85	82	80
Шелкоткацкие комби- наты	101	80	82	89	93	87	87	88	90
Ткацкие цехи	102	85	90	90	92	95	95	90	88
Мартеновские цехи	96	91	90	87	89	86	80	73	70
Конверторные цехи	98	80	85	88	92	92	92	88	81
Кузнечно - штамповоч- ные цехи	114	108	109	105	106	106	102	100	91
Кузнечно-прессовые цехи	111	100	105	104	103	103	102	98	91
Механосборочные це- хи	92	85	80	85	85	82	80	78	75
Прессовые цехи	100	90	95	95	93	90	88	88	82
Заготовительные цехи механических заводов	100	90	92	93	93	90	85	85	83
Сборочные цехи меха- нических заводов	105	82	90	95	100	95	95	95	90
Шариковые цехи под- шипниковых заводов	105	80	85	100	98	95	95	90	85
Локомотивные депо: цехи подъемочного ре- монта	95	94	82	75	73	75	70	63	60
отделение ремонта элект- рических машин	93	88	88	85	82	80	75	75	75
сварочное отделение	100	92	98	90	80	75	70	65	60

Таблица 1

## Эквивалентные уровни звука на улицах и дорогах городов

Категории улиц и дорог	Число полос движения проезжей части в обоих направлениях	Эквивалентный уровень звука, $LA_{ЭКВ}$ , дБА
Скоростные дороги	6	86
Магистральные улицы и дороги: общего городского значения:		
непрерывного движения	6	84
регулируемого	8	85
>	4	81
районного значения	6	82
>	4	81
дороги грузового движения	6	82
>	2	79
>	4	81
Улицы и дороги местного значения:		
жилые улицы	2	73
>	4	75
дороги промышленных и коммунально-складских районов	2	79

Таблица 2

## Шумовые характеристики потоков железнодорожных поездов

Поезда	Эквивалентный уровень звука $LA_{ЭКВ}$ , дБА, при интенсивности движения, пар/ч											
	1	2	3	4	5	6	8	10	15	20	25	30
Пассажирские	66	69	71	72	73	74	75	76	78	79	80	81
Электропоезда	72	75	77	78	79	80	81	82	84	85	86	87
Грузовые	76	79	81	82	83	84	85	86	88	89	90	91

Таблица 3

Поправки к значениям  $LA_{ЭКВ}$ , приведенным в табл. 2

Поправка к эквивалентному уровню звука $LA_{ЭКВ}$ , дБА	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
Средняя скорость движения поездов, км/ч: пассажирских и грузовых электропоездов	40	43	47	40	50	60	80	100	80	90	100

Таблица 4

## Шумовые характеристики источников шума внутри групп жилых домов

Источники шума	Эквивалентный уровень звука $L_{\text{Экв}}$ , дБА
Разгрузка товаров и погрузка тары	70
Работа мусороуборочной машины	71
Игры детей	74
Купание детей в плескательных бассейнах	76
Спортивные игры:	
настольный теннис	58
теннис	61
хоккей	65
баскетбол	66
городки	71
волейбол	74
футбол	75

Таблица 5

## Ориентировочные величины снижения уровня звука полосами зеленых насаждений

Полосы зеленых насаждений	Ширина полосы, м	Снижение уровня звука $\Delta L_{\text{Зел}}$ , дБА
Однорядная при шахматной посадке деревьев внутри полосы с двухъярусной живой изгородью на переднем плане	10—15	4—5
То же	15—20	5—8
Двухрядная при расстояниях между рядами 3—5 м; ряды аналогичны однорядной посадке	21—25	8—10
Двух- или трехрядная при расстояниях между рядами 3 м; ряды аналогичны однорядной посадке	26—30	10—12

Снижение уровней звука конструкцией окна

Конструкция окна	Толщина стекла, мм	Толщина воздушного промежутка между стеклами, мм	Снижение уровня звука, дБ, при условиях прилегания по периметру	
			без уплотняющих прокладок	с уплотняющими прокладками из пенополиуретана
С открытой форточкой, узкой створкой или фрамугой	—	—	10	—
Одинарное	3	—	18	20
	6	—	21	23
Спаренное (ГОСТ 11214—65)	3 и 3	57	22	24
	6 и 3	57	26	28
	6 и 4	57	27	29
Раздельно - сближенное (по альбому МНИИТЭП РС—8109)	3 и 3	90	24	26
	6 и 3	90	28	30
Раздельное (ГОСТ 11214—65)	6 и 3	120	30	33

Снижение уровня звука, дБА, экраном в зависимости от  $\delta$ 

Разность длин путей прохождения звукового луча $\delta$ , м	Снижение уровня звука экраном $\Delta L'_{\text{Экр}}$ , дБА	Разность длин путей прохождения звукового луча $\delta$ , м	Снижение уровня звука экраном $\Delta L'_{\text{Экр}}$ , дБА
0,005	6	0,48	16
0,02	8	0,83	18
0,06	10	1,4	20
0,14	12	2,4	22
0,28	14	6,0	24

Таблица 2

Снижение уровня звука, дБА, экраном в зависимости от  $\Delta L'_{\text{экр}}$  и углов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ 

$\Delta L'_{\text{экр}}$ , дБА	Снижение уровня звука экраном, дБ, при углах $\alpha_1$ и $\alpha_2$ , град								
	45	50	55	60	65	70	75	80	85
6	1,2	1,7	2,3	3,0	3,8	4,5	5,1	5,7	6,0
8	1,7	2,3	3,0	4,0	4,8	5,6	6,5	7,4	8,0
10	2,2	2,9	3,8	4,8	5,8	6,8	7,8	9,0	10,0
12	2,4	3,1	4,0	5,1	6,2	7,5	8,8	10,2	11,7
14	2,6	3,4	4,3	5,4	6,7	8,1	9,7	11,5	13,3
16	2,8	3,6	4,5	5,7	7,0	8,6	10,4	12,4	15,0
18	2,9	3,7	4,7	5,9	7,3	9,0	10,8	13,0	16,8
20	3,2	3,9	4,9	6,1	7,6	9,4	11,3	13,7	19,7
22	3,3	4,1	5,1	6,3	8,9	9,8	11,9	14,5	20,7
24	3,5	4,3	5,8	6,5	8,2	10,2	12,6	15,4	22,6

Таблица 3

Поправка  $\Delta$  в зависимости от разности

Разность между $\Delta L_{\text{экр}} \alpha_1$ и $\Delta L_{\text{экр}} \alpha_2$ , дБА	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
Поправка $\Delta$ , дБА	0	0,8	1,5	2	2,4	2,6	2,8	2,9	3	3	3	3

Таблица 4

## Снижение уровня звука экраном от источников шума внутри групп жилых домов в зависимости от эффективной высоты экрана

Расстояние между источником шума и экраном, м	Снижение уровня звука экраном $\Delta L_{\text{экр}}$ , дБА, при расстоянии между экраном и расчетной точкой, м									
	5		10		20		50		100	
	Эффективная высота экрана, м									
	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3
2	19	29	18	28	18	28	18	27	18	27
5	17	26	16	25	15	24	15	23	15	23
10	16	25	15	23	14	23	13	21	13	21
20	15	24	14	23	13	20	12	18	11	18
50	15	23	13	21	12	19	10	17	10	15
100	15	23	13	21	11	18	10	17	9	14

## ЛИТЕРАТУРА

1. Архитектура гражданских и промышленных зданий. Т. II. Основы проектирования/Под ред. В. М. Предтеченского. — М.: Стройиздат, 1976.
2. Ганус К. Архитектурная акустика. — М.: Госстройиздат, 1963.
3. Градостроительные меры борьбы с шумом/Осипов Г. Л., Прутков Б. Г., Шишкин И. А., Карагодина И. Л. — М.: Стройиздат, 1975.
4. Гусев Н. М. Основы строительной физики. — М.: Стройиздат, 1975.
5. Заборов В. И. Теория звукоизоляции ограждающих конструкций. — М.: Стройиздат, 1969.
6. Качерович А. Н. Акустика зрительного зала. — М.: Искусство, 1968.
7. Клюкин И. И. Борьба с шумом и звуковой вибрацией на судах. — Л.: Судостроение, 1971.
8. Ковригин С. Д., Захаров А. В., Герасимов А. И. Борьба с шумами в гражданских зданиях. — М.: Стройиздат, 1969.
9. Пособие по акустическому проектированию залов многоцелевого назначения средней вместимости. — М.: Стройиздат, 1972.
10. Пособие по акустической виброизоляции центробежных машин. — М.: Стройиздат, 1972.
11. Седов М. С., Бобылев В. Н. Расчет звукоизоляции однослойных ограждений на низких частотах. Горький, 1976.
12. Справочник проектировщика. Защита от шума/Под ред. Е. Я. Юдина. — М.: Стройиздат, 1974.
13. СНиП II-12—77. Защита от шума. — М.: Стройиздат, 1978.

## ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- |                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| Акустика архитектурная 5          | Граничная частота 100                       |
| — строительная 5                  | Громкость звука 20                          |
| Артикуляция 39                    | Децибелы 19                                 |
| Болевой порог восприятия звука 19 | Диффузность звукового поля 28               |
| Борьба с шумом 5                  | Добавочное звукопоглощение 35               |
| Виброизоляция 129                 | Закон массы 99                              |
| Волновое совпадение 100           | Звук 7                                      |
| — уравнение 12                    | Звуковое давление 12                        |
| Волны звуковые 7                  | — поле 7                                    |
| — изгибные 8                      | Звуковая мощность 16                        |
| — отраженные 24                   | Звукоизоляция однослойными конструкциями 99 |
| — плоские 12                      | — многослойными конструкциями 106           |
| — поперечные 7                    | — конструкций с проемами 112                |
| — продольные 7                    | Звукопоглотители 44                         |
| — сферические 12                  | Звукопоглощение 24                          |
| Время реверберации 30, 34         |   |
| — рекомендуемое (реверберации) 36 |   |

- Изоляция воздушного шума** 99  
— ударного шума 116  
**Импеданс** 15, 26  
**Индекс звукоизоляции** 95, 117  
**Интенсивность звука** 15
- Колесания вынужденные** 10  
— свободные 8  
**Коэффициент виброизоляции**  
129  
— жесткости приведенный 109,  
119  
— звукопередачи 25  
— звукопоглощения 24  
— звукопоглощения средний 28  
— отражения 25  
— Пуассона 101
- Лучевой эскиз** 28
- Методы борьбы с шумом** 5, 6  
**Модуль упругости динамический** 109, 119
- Нормирование шума** 22  
— звукоизоляции 95, 117
- Передача звука прямая** 93  
— — косвенная 93  
**Плотность звуковой энергии**  
16  
**Показатель звукоизоляции** 97  
**Постоянная помещения** 32  
**Предельный радиус** 32
- Реверберация** 30  
— искусственная 78
- Системы амбифонические** 75
- звукоусиления распределенные 76  
— — сосредоточенные 76  
— звуковоспроизведения девятиканальные 77  
— — трехканальные 77  
**Скорость звука в воздухе** 7  
— распространения продольных волн 100  
— — изгибных волн 100  
**Сопротивление активное** 11  
— реактивное 11  
**Спектр шума** 17
- Удельное акустическое сопротивление** 15  
**Уровень звука** 23  
— звукового давления 19  
— интенсивности 19  
— мощности 22
- Фокусирование звука** 41
- Цилиндрическая жесткость** 101
- Частота колебаний** 7  
— резонансная 9
- Шум** 5  
— воздушный 93  
— структурный 93  
— ударный 93
- Эквивалентная площадь звукопоглощения** 25  
**Эхо** 41  
**Эхо-камера** 78  
**«Эхо порхающее»** 41

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
Введение . . . . .	5

### РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ

#### ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ АКУСТИКИ

Глава I. Колебания и звук . . . . .	7
§ 1. Звуковые волны . . . . .	7
§ 2. Колебательные системы . . . . .	8
§ 3. Основные физические величины, характеризующие звуковое поле . . . . .	12
§ 4. Восприятие шума человеком . . . . .	19
§ 5. Принципы измерения и нормирования шума . . . . .	22
Глава II. Распространение звука в помещениях . . . . .	24
§ 6. Отражение и поглощение звука в помещениях . . . . .	24
§ 7. Основные методы расчета звукового поля . . . . .	26

### РАЗДЕЛ ВТОРОЙ

#### АРХИТЕКТУРНАЯ АКУСТИКА

Глава III. Факторы, определяющие акустику залов . . . . .	34
§ 8. Время реверберации . . . . .	34
§ 9. Некоторые критерии акустического качества залов . . . . .	38
§ 10. Форма залов и их отдельных поверхностей . . . . .	40
§ 11. Звукопоглощающие материалы и конструкции . . . . .	44
Глава IV. Проектирование залов с естественной акустикой	
§ 12. Основные акустические требования, определяющие выбор объемно-планировочных решений залов . . . . .	46
§ 13. Залы с естественной акустикой . . . . .	52
Учебно-исследовательская работа . . . . .	73
Глава V. Принципы проектирования залов, оборудованных электроакустическими системами . . . . .	75

§ 14. Основные особенности залов, оборудованных электроакустическими системами . . . . .	75
§ 15. Залы, оборудованные электроакустическими системами . . . . .	81
Учебно-исследовательская работа . . . . .	92

## РАЗДЕЛ ТРЕТИЙ СТРОИТЕЛЬНАЯ АКУСТИКА

<b>Глава VI. Распространение шума в зданиях. Нормирование звукоизоляции . . . . .</b>	<b>93</b>
§ 16. Распространение шума в зданиях . . . . .	93
§ 17. Нормирование звукоизоляции . . . . .	95
<b>Глава VII. Изоляция воздушного шума ограждающими конструкциями . . . . .</b>	<b>99</b>
§ 18. Звукоизоляция однослойными конструкциями . . . . .	99
§ 19. Звукоизоляция многослойными конструкциями . . . . .	106
§ 20. Звукоизоляция конструкциями с проемами. Определение общего уровня звукового давления в помещении . . . . .	112
Учебно-исследовательская работа . . . . .	114
<b>Глава VIII. Изоляция ударного шума междуэтажными перекрытиями . . . . .</b>	<b>116</b>
§ 21. Звукоизоляция перекрытиями с рулонными полами . . . . .	116
§ 22. Звукоизоляция перекрытиями с полами на упругом основании . . . . .	118
Учебно-исследовательская работа . . . . .	125
<b>Глава IX. Принципы борьбы с шумом инженерного и санитарно-технического оборудования . . . . .</b>	<b>126</b>
§ 23. Определение составляющих шума . . . . .	126
§ 24. Расчет виброизолирующих оснований . . . . .	129
§ 25. Мероприятия по борьбе с шумом . . . . .	131
Учебно-исследовательская работа . . . . .	132
<b>Глава X. Строительно-акустические методы борьбы с производственным шумом . . . . .</b>	<b>133</b>
§ 26. Определение ожидаемых уровней звукового давления в производственных помещениях . . . . .	133
§ 27. Определение требуемого уменьшения уровней звукового давления . . . . .	138
§ 28. Выбор строительно-акустических мероприятий по борьбе с шумом . . . . .	139
§ 29. Расчет звукопоглощения . . . . .	143
Учебно-исследовательская работа . . . . .	147

## РАЗДЕЛ ЧЕТВЕРТЫЙ

### БОРЬБА С ШУМОМ В ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВЕ

Глава XI. Оценка шума в городской застройке . . . . .	148
§ 30. Источники шума в городах . . . . .	148
§ 31. Определение ожидаемого шума на территории застройки и в зданиях . . . . .	150
Учебно-исследовательская работа . . . . .	152
Глава XII. Борьба с шумом в градостроительстве . . . . .	153
§ 32. Архитектурно-планировочные методы борьбы с шумом . . . . .	153
§ 33. Строительно-акустические методы борьбы с шумом . . . . .	162
Учебно-исследовательская работа . . . . .	163
Приложения . . . . .	164
Литература . . . . .	180
Предметный указатель . . . . .	180

**Сергей Дмитриевич Ковригин**

### АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНАЯ АКУСТИКА

Зав. редакцией В. Г. Акатова  
Редактор Т. Ф. Мельникова  
Мл. редактор Ю. П. Кочергина  
Художник В. В. Гарбузов  
Художественный редактор Т. А. Дурасова  
Технический редактор Л. А. Муравьева  
Корректоры Р. И. Самофатова, Г. И. Кострикова

ИБ № 2137

Изд. № Стр.-338. Сдано в набор 23.08.79. Подп. в печать 28.04.80. Т-08451. Формат 84×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>. Бум. тип. № 1. Гарнитура литературная. Печать высокая. Объем 9,66 усл. печ. л. 9,67 уч.-изд. л. Тираж 22 000 экз. Зак. № 2868. Цена 30 коп.

Издательство «Высшая школа»,  
Москва, К-51, Неглинная ул., д. 29/14  
Московская типография № 8 Союзполиграфпрома  
при Государственном комитете СССР  
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли,  
Хохловский пер., 7.