

**Брянская государственная
инженерно-технологическая академия**

Е.А.Вощукова

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
СТРОИТЕЛЬНОЙ АКУСТИКИ**

Учебное пособие

Брянск 2011

УДК 534 (075)

Вощукова, Е.А. Физические основы строительной акустики: учебное пособие для студентов очного и заочного обучения (направление подготовки бакалавров «Строительство») / Е.А.Вощукова. – Брянск: БГИТА, 2011. –96 с.

Рассмотрен ряд вопросов, связанных с физикой колебательных и волновых процессов, особенностями распространения звуковых волн в воздухе, процессами отражения и поглощения звука различными поверхностями. Отдельные главы посвящены механизму слухового восприятия и принципам действия источников и приемников звука. Рассматриваются основные методы расчета звукового поля в помещении, влияние характеристик помещения на качество восприятия звуковых сигналов. Особое внимание уделено вопросам влияния шума на организм человека и способам защиты от шума.

Предназначено для студентов, изучающих дисциплины «Физические основы строительной акустики» и «Физические основы шумопоглощения».

Рецензент

Алексеева Г.Д., доцент, канд. физ.-мат. наук

Рекомендовано в качестве учебного пособия научно-методическим советом БГИТА

Протокол № 6 от 30.06.2011

© Брянская государственная
инженерно-технологическая
академия, 2011
© Е.А. Вощукова, 2011

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Физические основы строительной акустики» впервые была включена в учебные планы студентов строительного факультета Брянской государственной инженерно-технологической академии в качестве одного из элективных курсов более десяти лет назад. Начиная с 2003 года, эта дисциплина является обязательной для изучения студентами специальностей «Промышленное и гражданское строительство», «Экономика и управление недвижимостью» и «Городское строительство и хозяйство». При переходе на многоуровневую подготовку специалистов в рамках Федерального Государственного Стандарта ВПО дисциплина «Физические основы строительной акустики» была включена в вариативную часть учебного плана подготовки бакалавров по направлению «Строительство».

В соответствии с требованиями ФГОС ВПО по направлению «Строительство» выпускник, получивший квалификацию бакалавра, должен обладать следующими общепрофессиональными компетенциями:

- - использует основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применяет методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования (ПК–1);
- - способен выявить естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлечь их для решения соответствующий физико – математический аппарат (ПК–2).

На формирование этих компетенций и направлено изучение курса «Физические основы строительной акустики».

Одна из основных задач специалиста в области строительства является создание оптимальной среды для жизни и деятельности человека. Свойства среды, определяющие уровень комфорта в помещении, характеризуются микроклиматом, условиями зрительного восприятия и видимости, а также качеством восприятия звука и уровнем шума, возникающего в помещении или проникающего в него. Данные вопросы являются предметом изучения строительной физики – прикладной области физики, одним из основных разделов которой являются архитектурно-строительная акустика.

Акустика – область физики, в которой исследуются упругие колебания и волны, процессы их возбуждения и распространения, взаимодействие их с веществом и разнообразные применения.

К прикладным областям акустики можно отнести архитектурную акустику, строительную акустику, а также весьма большой раздел современной акустики, связанной с изучением шумов и вибраций, влиянием их на человеческий организм и разработкой методов борьбы с ними.

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.

Строительная акустика изучает вопросы снижения уровня шума в зданиях. Кроме основного пути борьбы с шумом, то есть снижения уровня

шума в источнике, во многих случаях требуется использование всех других методов: звукоизоляции, звукопоглощения, активного глушения.

Для успешного решения прикладных задач акустики необходимо понимать физические основы процессов распространения звуковых волн, иметь представление о механизме слухового восприятия и о принципах работы источников и приемников звука, владеть основными методами расчета звукового поля, знать, как влияет шум на организм человека и как можно защититься от этого влияния.

Изложению этих вопросов и посвящено данное учебное пособие.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АКУСТИКИ

1 КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ: ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

1.1 Необходимые сведения из математики

1.1.1 Комплексные числа

Комплексными числами называются числа вида:

$$z = x + iy,$$

где x и y – действительные числа, а i – мнимая единица ($i^2 = -1$).

Числа x и y называются соответственно *действительной* и *мнимой* частью комплексного числа:

$$x = \operatorname{Re} z,$$

$$y = \operatorname{Im} z.$$

Число $z^* = x - iy$ называется *комплексно сопряженным* числу z .

Комплексное число может быть представлено точкой на плоскости xu (рис. 1.1).

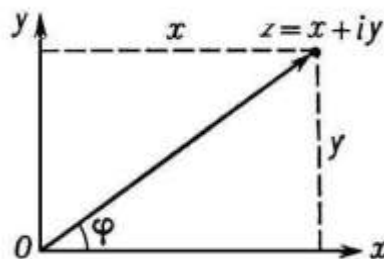


Рисунок 1.1 – Геометрическое представление комплексного числа

Длина радиус-вектора точки, изображающей комплексное число на плоскости xu , называется *модулем* комплексного числа:

$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2} = |z|,$$

а угол φ между радиус-вектором и осью Ox – *аргументом* комплексного числа:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{y}{x} = \arg z.$$

Видно, что:

$$\begin{aligned}x &= \rho \cos \varphi, \\y &= \rho \sin \varphi.\end{aligned}$$

Тригонометрическая форма записи комплексного числа:

$$z = \rho(\cos \varphi + i \sin \varphi).$$

В математике доказывается соотношение:

$$e^{i\varphi} = \cos \varphi + i \sin \varphi, \quad (1.1)$$

которое называется *теоремой Эйлера*.

Заменяя φ на $-\varphi$, получим:

$$e^{-i\varphi} = \cos \varphi - i \sin \varphi. \quad (1.2)$$

Из (1.1) и (1.2) следует, что:

$$\begin{aligned}\cos \varphi &= \frac{1}{2}(e^{i\varphi} + e^{-i\varphi}), \\ \sin \varphi &= \frac{1}{2i}(e^{i\varphi} - e^{-i\varphi}).\end{aligned}$$

Используя теорему Эйлера, комплексное число можно записать в показательной форме:

$$\begin{aligned}z &= \rho e^{i\varphi} \\ (z^* &= \rho e^{-i\varphi}).\end{aligned}$$

Основные операции с комплексными числами:

$$\begin{aligned}z_1 \pm z_2 &= (x_1 \pm x_2) + i(y_1 \pm y_2); \\ z_1 \cdot z_2 &= \rho_1 \rho_2 e^{i(\varphi_1 + \varphi_2)}; \\ \frac{z_1}{z_2} &= \frac{\rho_1}{\rho_2} e^{i(\varphi_1 - \varphi_2)}; \\ z \cdot z^* &= \rho^2 = |z|^2.\end{aligned}$$

1.1.2 Ряд Фурье. Интеграл Фурье

Пусть $f(t)$ – действительная периодическая функция с периодом T , для которой существует интеграл $\int_{-T/2}^{T/2} |f(\tau)| d\tau$. Тогда эту функцию можно представить в виде:

$$f(t) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t) = \sum_{-\infty}^{\infty} c_n e^{in\omega_0 t}. \quad (1.3)$$

Представление (1.3) называется разложением в **ряд Фурье**.

Здесь:

- $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ - циклическая частота основного тона (первой гармоники);
- $\frac{1}{2} a_0 = c_0$ - среднее значение $f(t)$;
- члены ряда называются **гармониками** ($n = 1$ – **первая гармоника** или **основной тон**, $n = 2, 3, \dots$ - **обертоны**).

Коэффициенты ряда определяются выражениями:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(\tau) \cos n\omega_0 \tau d\tau,$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(\tau) \sin n\omega_0 \tau d\tau,$$

$$c_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(\tau) e^{-in\omega_0 \tau} d\tau.$$

n -я гармоника имеет частоту $f_n = \frac{n\omega_0}{2\pi} = \frac{n}{T}$, амплитуду $2c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$, фазу $\varphi_n = -\arctg \frac{b_n}{a_n}$.

Если функция $f(t)$ непериодическая, то ее можно представить в виде **интеграла Фурье**:

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} C(\omega) e^{i\omega t} d\omega, \quad (1.4)$$

$$C(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) e^{-i\omega \tau} d\tau.$$

1.2 Колебания и волны: основные понятия

Колебаниями называются процессы, в той или иной степени повторяющиеся во времени.

В зависимости от физической природы колебательного процесса различают механические и электромагнитные колебания. Система, в которой происходят колебания, называется **колебательной системой**.

Колебания называются **свободными (собственными)**, если они происходят в отсутствие переменных внешних воздействий на колебательную систему. Колебания называются **вынужденными**, если на систему оказывается периодическое внешнее воздействие.

Колебания называются **периодическими**, если значения всех физических величин, характеризующих состояние колебательной системы и изменяющихся при ее колебаниях, повторяются через равные промежутки времени. Время, за которое в системе совершается одно полное колебание, называют **периодом** колебаний (T , с). Величина, равная числу полных колебаний за единицу времени, называется **частотой** колебаний (ν или f , Гц):

$$f = \frac{1}{T}.$$

Циклической или **круговой частотой** называется величина ω , равная:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}, \text{с}^{-1}.$$

При периодических колебаниях зависимость колеблющейся величины s от времени t удовлетворяет условию:

$$s(t+T) = s(t).$$

1.2.1 Гармонические колебания и их характеристики

Периодические колебания называются **гармоническими**, если колеблющаяся величина меняется с течением времени по закону косинуса или синуса:

$$s(t) = A \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (1.5)$$

или

$$s(t) = A \sin(\omega t + \varphi_0).$$

Здесь $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$ – циклическая частота колебаний, A – максимальное отклонение колеблющейся величины от положения равновесия (**амплитуда колебаний**), $\varphi(t) = \omega t + \varphi_0$ – **фаза колебаний**, φ_0 – **начальная фаза**.

График гармонических колебаний представлен на рисунке 1.2.

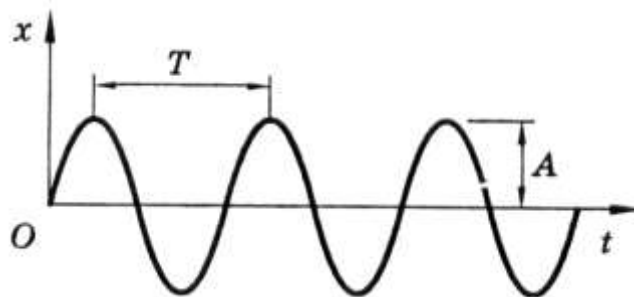


Рисунок 1.2 – График гармонических колебаний

Используя теорему Эйлера (1.1), можно представить уравнение гармонических колебаний в экспоненциальной форме:

$$\tilde{s} = \tilde{A}e^{i\omega t} = Ae^{i(\omega t + \varphi_0)}. \quad (1.6)$$

Физический смысл имеет только действительная часть выражения (1.6):

$$s = \operatorname{Re} \tilde{s} = A \cos(\omega t + \varphi_0).$$

На представлении колеблющейся величины в форме (1.6) основан способ изображения гармонического колебания в виде векторной диаграммы (рис.1.3).

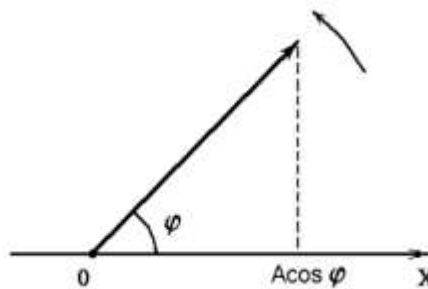


Рисунок 1.3 – Векторная диаграмма гармонического колебания

Векторная диаграмма представляет собой вектор, длина которого равна амплитуде колебаний, а угол φ между вектором и осью Ox – фазе колебаний. Так как фаза меняется с течением времени по закону $\varphi(t) = \omega t + \varphi_0$, то вектор вращается вокруг точки O с угловой скоростью ω , равной круговой частоте гармонического колебания. При этом проекция вектора на ось Ox изменяется в соответствии с уравнением гармонических колебаний (1.5).

При гармонических колебаниях полная энергия системы (механическая энергия при механических колебаниях и энергия электромагнитного поля в электрическом колебательном контуре) с течением времени не изменяется. Можно показать, что полная энергия механической колебательной системы при гармонических колебаниях равна:

$$E = \frac{mA^2\omega^2}{2} = \text{const}.$$

Гармонически колеблющаяся величина $s(t)$ подчиняется дифференциальному уравнению:

$$\ddot{s} + \omega^2 s = 0, \quad (1.7)$$

которое называется **дифференциальным уравнением гармонических колебаний**.

Если какой-либо процесс описывается уравнением вида (1.7), то этот процесс представляет собой гармоническое колебаний с частотой ω .

Собственные колебания некоторых физических систем (например, пружинного маятника или электрического колебательного контура) при определенных условиях являются близкими к гармоническим. При этом частота собственных колебаний определяется физическими параметрами системы (например, массой груза и упругостью пружины для пружинного маятника). Значения амплитуды и начальной фазы зависят от начальных условий в системе.

Кроме того, гармоническими будут вынужденные колебания, если они происходят в результате гармонического внешнего воздействия на колебательную систему. Частота вынужденных гармонических колебаний равна частоте внешнего воздействия, а амплитуда и фаза зависят как от внешнего воздействия, так и от физических параметров колебательной системы (см. раздел 1.2.3 «Вынужденные колебания»).

Следует также отметить, что любое колебание (даже непериодическое) можно представить как сумму гармонических колебаний с различными амплитудами и частотами (разложить в ряд Фурье (1.3) или интеграл Фурье (1.4)). Зависимость амплитуд гармоник ряда или интеграла Фурье от частоты называется **спектром** колебательного процесса.

1.2.2 Затухающие колебания

Затуханием называется постепенное ослабление колебаний с течением времени, обусловленное потерей энергии колебательной системой. При механических колебаниях причиной затухания является действие сил трения и излучение энергии колебаний в окружающую среду в виде упругих волн.

Свободные колебания всех реальных колебательных систем являются затухающими.

Рассмотрим затухающие колебания линейной системы. Система называется *линейной*, если параметры, характеризующие существенные в рассматриваемом процессе физические свойства системы, не изменяются в ходе процесса.

Дифференциальное уравнение затухающих колебаний в линейной системе:

$$\ddot{s} + 2\delta\dot{s} + \omega^2 s = 0, \quad (1.8)$$

где ω – циклическая частота незатухающих собственных колебаний системы, δ (с^{-1}) – коэффициент затухания.

Решение уравнения (1.8) имеет вид:

$$s(t) = A_0 e^{-\delta t} \cos(\omega_3 t + \varphi_0).$$

Здесь $A(t) = A_0 e^{-\delta t}$ – амплитуда затухающих колебаний, $\omega_3 = \frac{2\pi}{T_3} = \sqrt{\omega^2 - \delta^2}$ – циклическая частота затухающих колебаний.

В экспоненциальной форме уравнение затухающих колебаний записывается как:

$$\tilde{s}(t) = A_0 e^{-\delta t} e^{i(\omega_3 t + \varphi_0)}.$$

График затухающих колебаний приведен на рисунке 1.4.

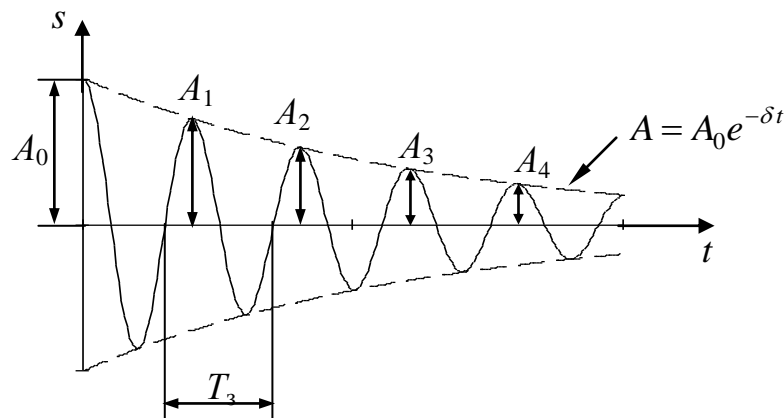


Рисунок 1.4 – График затухающих колебаний

Промежуток времени τ , в течение которого амплитуда затухающих колебаний уменьшается в e раз, называется **временем релаксации**:

$$\tau = \frac{1}{\delta}.$$

Величина, равная

$$\theta = \ln \frac{A(t)}{A(t + T_3)} = \delta T_3,$$

называется **логарифмическим декрементом затухания**.

Еще одна характеристика системы, совершающей затухающие колебания, - ее **добротность**, равная:

$$Q = 2\pi \frac{E(t)}{E(t) - E(t + T_3)},$$

где $E(t)$ – полная энергия системы в момент времени t . Чем выше добротность системы, тем медленнее происходит в ней процесс затухания колебаний. Можно показать, что:

$$Q = \frac{2\pi}{1 - e^{-2\delta}} \approx \frac{\omega}{2\delta}.$$

При увеличении коэффициента затухания циклическая частота затухающих колебаний уменьшается, и при $\delta \geq \omega$ процесс затухания становится **апериодическим**: выведенная из положения равновесия колебательная система постепенно (без колебаний) возвращается в него (рис. 1.5).

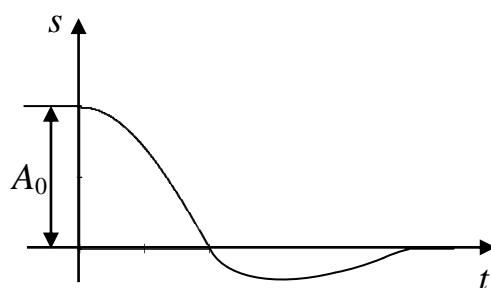


Рисунок 1.5 – Апериодическое затухание

1.2.3 Вынужденные колебания. Резонанс

Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний имеет вид:

$$\ddot{s} + 2\delta\dot{s} + \omega^2 s = f(t), \quad (1.9)$$

где $f(t)$ – функция, описывающая внешнее воздействие на колебательную систему.

Рассмотрим случай гармонического внешнего воздействия:

$$f(t) = f_0 \cos \Omega t.$$

Здесь f_0 – амплитуда, а Ω – циклическая частота внешнего воздействия. В этом случае решение дифференциального уравнения (1.9) имеет вид:

$$s = A \cos(\Omega t - \varphi)$$

или

$$\tilde{s} = A e^{i(\Omega t - \varphi)},$$

где $A = \frac{f_0}{\sqrt{(\omega^2 - \Omega^2)^2 + 4\delta^2 \Omega^2}}$ – амплитуда вынужденных колебаний,

$\varphi = \arctg \frac{2\delta\Omega}{\omega^2 - \Omega^2}$ – начальная фаза вынужденных колебаний.

A и φ являются функциями Ω . Частота Ω_p , при которой амплитуда вынужденных колебаний достигает максимального значения A_p , называется **резонансной частотой**.

$$\Omega_p = \sqrt{\omega^2 - 2\delta^2}.$$

$$A_p = \frac{f_0}{2\delta\sqrt{\omega^2 - \delta^2}}.$$

Резкое возрастание амплитуды вынужденных колебаний при приближении циклической частоты внешнего воздействия к Ω_p называется резонансом. Графики зависимости $A(\Omega)$ и $\varphi(\Omega)$ называются амплитудной и фазовой резонансными кривыми (рис. 1.6).

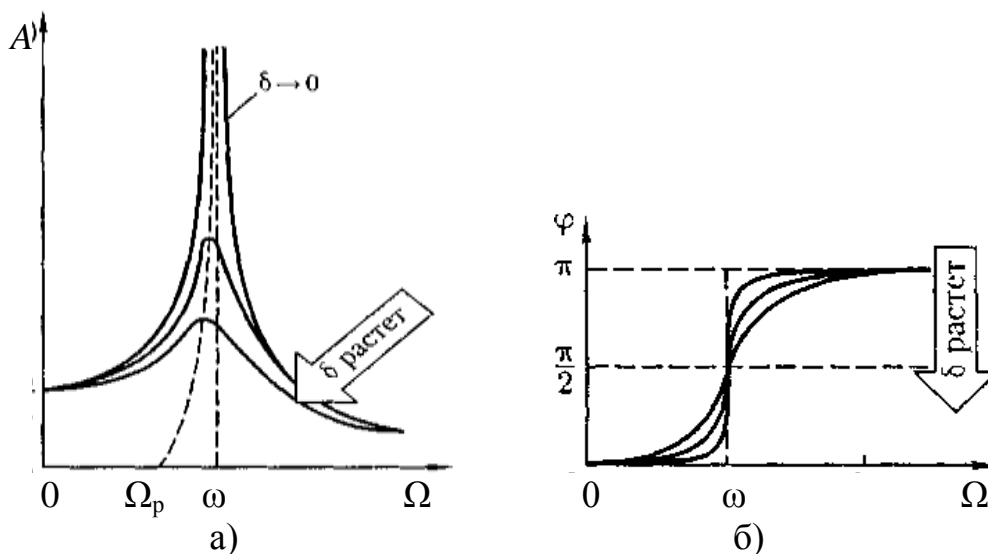


Рисунок 1.6 – Резонансные кривые: а) амплитудные, б) фазовые

1.2.4 Упругие волны в сплошной среде

Механические возмущения, распространяющиеся в упругой среде с конечной скоростью, называются **упругими** или **механическими волнами**. Тела, которые, воздействуя на упругую среду, вызывают эти возмущения, называют источниками упругих волн.

Упругая волна называется **продольной**, если частицы среды колеблются в направлении распространения волны. Упругая волна называется **поперечной**, если частицы среды колеблются перпендикулярно направлению распространения волны. В жидкостях и газах упругие волны всегда продольные. В твердых телах могут распространяться и продольные, и поперечные волны.

Распространение в упругой среде механических возмущений, возбуждаемых источником волн, связано с переносом энергии. Поэтому такие волны называются **бегущими волнами**. Скорость распространения возмущений в среде v называется **скоростью волны** (фазовой скоростью). Скорость распространения упругих волн зависит от плотности и упругих свойств среды.

Линия, касательная к которой в каждой ее точке совпадает с направлением распространения волны, называется **лучом**. Геометрическое место точек, в которых фаза колебаний частиц среды имеет одно и то же значение, называется **волновой поверхностью**. В однородной среде волновые поверхности перпендикулярны лучам. В зависимости от формы волновых поверхностей различают плоские, сферические, цилиндрические и другие волны (рисунок 1.7).

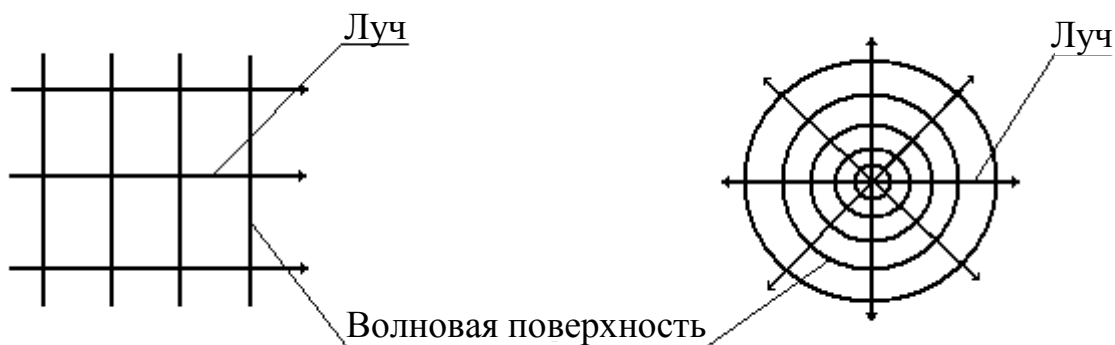


Рисунок 1.7 – Плоская и сферическая волны

Уравнение плоской волны, распространяющейся вдоль оси Ox (в положительном направлении), имеет вид:

$$s = f\left(t - \frac{x}{v}\right).$$

Если волна распространяется в отрицательном направлении оси Ox , то:

$$s = f\left(t + \frac{x}{v}\right).$$

Если колебания частиц в волне гармонические, то волна называется **гармонической** или **монохроматической**. Уравнение плоской гармонической волны, бегущей вдоль оси Ox , может быть записано в виде:

$$s = A \cos(\omega t - kx + \varphi_0).$$

Здесь A – амплитуда колебаний в волне, $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$ – циклическая частота волны, $k = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi}{vT}$ – волновое число, $\Phi = \omega t - kx + \varphi_0$ – фаза волны.

Расстояние, на которое распространяется волна за время, равное периоду колебаний, называется **длиной волны** λ (м):

$$\lambda = vT = \frac{v}{f}.$$

С учетом этого волновое число можно представить в виде:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}.$$

График зависимости $s(x)$ в плоской гармонической волне для некоторого момента времени t представлен на рисунке 1.8.

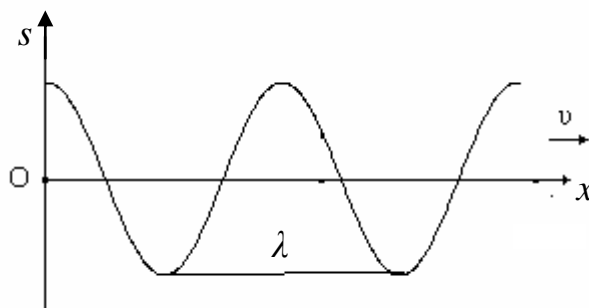


Рисунок 1.8 – Плоская гармоническая волна

В случае, когда плоская волна распространяется в произвольном направлении, ее уравнение имеет вид:

$$s = A \cos(\omega t - \vec{k}\vec{r} + \varphi_0).$$

Здесь \vec{k} - волновой вектор. Его модуль равен волновому числу k , а направление совпадает с направлением распространения волны в точке с радиус-вектором \vec{r} .

Экспоненциальная форма записи уравнения плоской волны:

$$\begin{aligned}\tilde{s} &= A e^{i(\omega t - \vec{k}\vec{r} + \varphi_0)} \\ (s &= \operatorname{Re} \tilde{s}).\end{aligned}$$

Уравнение расходящейся сферической волны:

$$s = A(r) f\left(t - \frac{r}{v}\right).$$

В случае монохроматической сферической волны:

$$s = A(r) \cos(\omega t - kr + \varphi_0) = A(r) e^{i(\omega t - kr + \varphi_0)}.$$

Дифференциальное уравнение, описывающее распространение волн в однородной изотропной непоглощающей среде со скоростью v , называется **волновым уравнением** и имеет вид:

$$\Delta s = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 s}{\partial t^2},$$

где $\Delta s = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ - оператор Лапласа.

Если волна гармоническая, то $\frac{\partial^2 s}{\partial t^2} = -\omega^2 s$, и волновое уравнение принимает вид:

$$\Delta s + k^2 s = 0.$$

Это уравнение называется **уравнением Гельмгольца**.

Амплитуда, начальная фаза и частота волны определяются колебаниями в источнике волн. Фазовая скорость волны, как уже было сказано выше, зависит от физических свойств среды, в которой распространяется волна.

2 ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ В ВОЗДУХЕ

2.1 Основные определения

Звуковыми волнами (звуком) называется процесс распространения упругих колебаний малой амплитуды в сплошной среде. Область среды, в которой распространяются звуковые волны, называется **звуковым полем**. При распространении звуковых волн в газах и жидкостях смещение частиц среды происходят в направлении распространения волн. Такие волны называются **продольными**.

Теория звука в ее классической форме строится на основе законов движения жидкости и газа с учетом ряда особенностей колебательных движений с малой амплитудой.

Движение жидкости и газа подчиняется законам гидро- и аэродинамики. Так как для жидкости и газа они записываются в одинаковой математической форме, то мы будем говорить об уравнениях гидродинамики, подразумевая под жидкостью также и газ.

Уравнения гидродинамики в общей форме являются нелинейными и весьма трудно поддаются решению. Однако путем ряда предположений можно привести их к более простой форме.

Перечислим основные упрощающие предположения, справедливые для звуковых волн в воздухе:

- а) пренебрегаем вязкостью и теплопроводностью воздуха;
- б) считаем воздух однородной, изотропной, линейной средой;
- в) предполагаем, что амплитуды колебаний давления, плотности и температуры звуковой волны малы;
- г) процессы сжатия и расширения в звуковой волне считаем адиабатическими.

Введем ряд обозначений.

Пусть ρ_0 и P_0 – плотность и давление воздуха в состоянии равновесия.

Тогда при распространении звука в среде общее давление в произвольной точке равно:

$$P = P_0 + \delta p(x, y, z, t) = P_0 + \delta p.$$

Величину δp , которая в звуковых процессах в газах обычно мала по сравнению с P_0 , будем обозначать далее через $p = p(x, y, z, t)$ и называть **звуковым давлением**.

Соответственно для плотности:

$$\rho = \rho_0 + \delta \rho,$$

где $\frac{\delta \rho}{\rho_0} \ll 1$.

Величину $\delta = \frac{\delta\rho}{\rho_0}$ называют **относительным изменением плотности**.

Аналогично температуру среды можно представить в виде:

$$T = T_0 + \delta T(x, y, z, t)$$

где $\theta = \frac{\delta T}{T_0} \ll 1$ - **относительная акустическая добавка к температуре**.

2.2 Основные уравнения гидродинамики в акустическом приближении

2.2.1 Уравнение неразрывности

Рассмотрим для простоты плоскую звуковую волну в трубе постоянно-го сечения S (рисунок 2.1). Выделим в трубе малый элемент среды длиной dx (от x до $x+dx$).

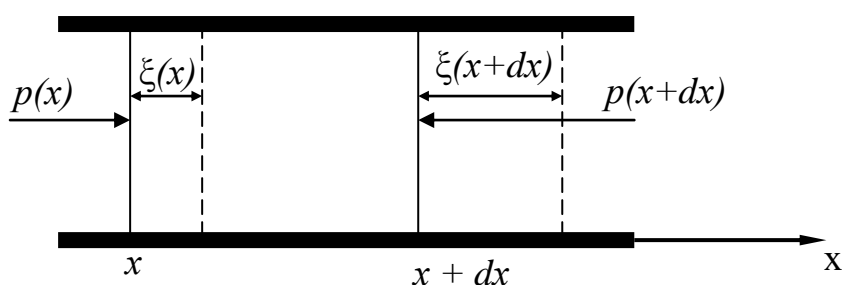


Рисунок 2.1 – Движение элемента среды в трубе

В произвольный момент времени t сечение x сместится в результате колебаний на расстояние $\xi(x)$, а сечение $x + dx$ – на $\xi(x + dx)$

При равновесии масса газа в выделенном элементе:

$$dm = \rho_0 S dx. \quad (2.1)$$

При смещении элемента:

$$\begin{aligned} dm &= \rho S [dx + \xi(x + dx) - \xi(x)] = (\rho_0 + \delta\rho) \cdot S \cdot \left[dx + \xi(x) + \frac{\partial \xi}{\partial x} dx - \xi(x) \right] \approx \\ &\approx \rho_0 S dx + \delta\rho S dx + \rho_0 S \frac{\partial \xi}{\partial x} dx. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Так как масса выделенного элемента остается неизменной,

$$\rho_0 S dx = \rho_0 S dx + \delta\rho S dx + \rho_0 S \frac{\partial \xi}{\partial x} dx.$$

Отсюда получаем:

$$\frac{\delta \rho}{\rho_0} = -\frac{\partial \xi}{\partial x}. \quad (2.3)$$

Уравнение (2.3) называется *уравнением неразрывности*.

2.2.2 Уравнение движения

Запишем теперь уравнение движения элемента среды, заключенного между плоскостями x и $x + dx$.

Сила, которая действует на этот элемент, равна:

$$p(x)S - p(x + dx)S = S \left[p(x) - p(x) - \frac{\partial p}{\partial x} dx \right] = -\frac{\partial p}{\partial x} dx S.$$

Масса этого элемента равна $\rho_0 S dx$, а ускорение - $\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$.

Согласно второму закону Ньютона

$$\rho_0 \cdot \cancel{S} \cdot \cancel{dx} \cdot \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = -\frac{\partial p}{\partial x} \cancel{dx} \cdot \cancel{S}$$

или

$$\rho_0 \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x}. \quad (2.4)$$

Уравнение (2.4) называется *уравнением Эйлера*.

2.2.3 Уравнение состояния

Запишем теперь уравнение состояния идеального газа, заключенного между сечениями x и $x + dx$

Мы уже говорили о том, что процессы сжатия и разряжения в звуковой волне являются адиабатическими. Это связано с тем, что вследствие низкой теплопроводности воздуха и быстроты изменения давления и плотности при звуковых колебаниях тепловая энергия не успевает уйти из сжатого элемента газа за время сжатия ($\delta Q = 0$).

Уравнение адиабатического процесса имеет вид:

$$pV^\gamma = const, \quad (2.5)$$

где $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ - коэффициент Пуассона. Для воздуха $\gamma = 1,4$.

Если продифференцировать уравнение (2.5), получим:

$$\frac{dp}{p} = -\gamma \frac{dV}{V}.$$

Элемент газа в трубе между плоскостями x и $x + dx$ имеет объем Sdx , а изменение его объема будет равно $Sdx \frac{\partial \xi}{\partial x}$.

Постоянное давление – P_0 , а звуковое – p .

Таким образом, уравнение адиабатического сжатия (разрежения) воздуха в звуковой волне имеет вид:

$$\frac{p}{P_0} = -\gamma \frac{\partial \xi}{\partial x}$$

или

$$p = -\gamma \cdot P_0 \cdot \frac{\partial \xi}{\partial x}. \quad (2.6)$$

С учетом уравнения неразрывности (2.3) получаем:

$$p = -\gamma P_0 \delta \quad (2.7)$$

2.3 Волновое уравнение для звуковых волн в воздухе. Скорость звука

Комбинируя уравнение неразрывности (2.3), уравнение Эйлера (2.4) и уравнение состояния (2.6), получаем уравнение для смещения частиц в звуковой волне $\xi(x, t)$:

$$\rho_0 \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(-\gamma \cdot P_0 \frac{\partial \xi}{\partial x} \right)$$

или

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \frac{\gamma P_0}{\rho_0} \cdot \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}$$

Если обозначить $\frac{\gamma P_0}{\rho_0} = c^2$, то

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \quad (2.8)$$

Таким образом, для ξ мы получили волновое уравнение (см. раздел 1.2.4), которое описывает волну, распространяющуюся в воздухе со скоростью, равной

$$c = \sqrt{\frac{\gamma P_0}{\rho_0}}.$$

Величина c называется **скоростью звука**.

При нормальных условиях плотность воздуха $\rho_0 = 1,29 \text{ кг/м}^3$, атмосферное давление $P_0 = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$, и скорость звука в воздухе $c = 330 \text{ м/с}$. При комнатной температуре ($t = 18^\circ\text{C}$) $c = 340 \text{ м/с}$.

Аналогичные (2.8) волновые уравнения можно записать для звукового давления, акустических добавок к плотности и температуре.

Волны смещения, звукового давления, плотности и температуры распространяются с одинаковой скоростью.

Эти волны связаны между собой, так как

$$\begin{aligned} \delta &= -\frac{\partial \xi}{\partial x}, \\ p &= P_0 \gamma \delta = -\rho_0 c^2 \frac{\partial \xi}{\partial x}, \\ \theta &= \frac{\delta T}{T_0} = -(\gamma - 1) \frac{\partial \xi}{\partial x}. \end{aligned}$$

Таким образом, если известно уравнение одной из этих волн, например: $\xi = \xi(x, t)$, то остальные величины легко находятся.

Величина $\rho_0 c$ называется **волновым сопротивлением** среды. При нормальных условиях $\rho_0 c = 420 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$.

2.4 Плоская гармоническая звуковая волна

Решением волнового уравнения:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$$

является функция вида:

$$\xi = \xi(ct - x).$$

Если волна гармоническая, то

$$\xi = \xi_{\max} \sin(\omega t - kx),$$

где ξ_{\max} - амплитуда смещения частиц в волне;

$\omega = 2\pi f$ - циклическая частота колебаний в волне;

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ - волновое число;

$\lambda = \frac{c}{f}$ - длина звуковой волны.

Скорость колебаний частиц в волне:

$$v = \frac{\partial \xi}{\partial t} = v_{\max} \cos(\omega t - kx),$$

где $v_{\max} = \omega \xi_{\max}$ - амплитуда колебательной скорости.

Звуковое давление:

$$p = -\rho_0 c^2 \frac{\partial \xi}{\partial x} = p_{\max} \cos(\omega t - kx),$$

где $p_{\max} = \rho_0 c \omega \xi_{\max}$ - амплитуда звукового давления.

Отметим, что отношение звукового давления к колебательной скорости равно волновому сопротивлению среды $\rho_0 c$.

Акустическая добавка к плотности равна:

$$\delta \rho = -\rho_0 \frac{\partial \xi}{\partial x} = \delta \rho_{\max} \cos(\omega t - kx),$$

где $\delta \rho_{\max} = \frac{\rho_0}{c} v_{\max}$ - амплитуда акустической добавки к плотности.

Акустическая добавка к температуре:

$$\delta T = -T_0(\gamma - 1) \frac{\partial \xi}{\partial x} = (\gamma - 1) \frac{T_0}{c} v_{\max} \cos(\omega t - kx).$$

Следует отметить, что обычно задаются не амплитудные значения величин, характеризующих звуковые колебательные процессы в среде, а дейст-

вующие или эффективные, которые при гармонических колебаниях в $\sqrt{2}$ раз меньше амплитудных. Например:

$$p_e = \sqrt{[p(t)]_{cp}^2} = \frac{p_{max}}{\sqrt{2}}.$$

Далее индекс e будем опускать и подразумевать, что если задается какая-то конкретная величина (p, ξ, v и так далее), то имеется в виду ее эффективное значение.

2.5 Энергия звуковой волны. Интенсивность звука

Распространение звуковой волны сопровождается переносом энергии, которая зависит от 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 волны, называется **интенсивностью** звука или **силой звука** (Вт/м²):

$$I = \frac{p^2}{\rho_0 c} = p v.$$

Векторная величина, характеризующая также направление переноса энергии в волне, называется **вектором Умова**:

$$\vec{I} = I \cdot \frac{\vec{c}}{c}.$$

Наряду с интенсивностью звука используют еще одну энергетическую характеристику: **плотность звуковой энергии** ε (Дж/м³), равную энергии колебаний в единице объема звукового поля.

Можно показать, что в бегущей волне

$$\vec{I} = \varepsilon \vec{c}.$$

Таким образом:

$$\varepsilon = \frac{I}{c} = \frac{p^2}{\rho_0 c^2}.$$

Передача энергии звуковой волны в область, ранее не затронутую волнами, требует непрерывного расходования энергии со стороны источника, возбуждающего звук. В тех зонах, где волна уже возникла, энергия непрерывно передается дальше со скоростью звука. Возникающие в среде пере-

менные давления непрерывно совершают работу, ввиду чего и возникает сопротивление (*импеданс*) $R = \rho_0 c$ при колебательных движениях частиц среды.

Формулы для силы звука:

$$I = \frac{P_0^2}{\rho_0 c} = \rho_0 c v^2$$

подобны формулам закона Джоуля–Ленца для мощности электрического тока, только мощность, затрачиваемая при действии сил давления, расходуется не на выделение тепла, а на передачу энергии новым частям среды. Поэтому величину $R = \rho_0 c$ часто называют также сопротивлением излучения среды.

2.6 Логарифмическая шкала силы звука

Отношение максимальной и минимальной интенсивности слышимого человеческим ухом звука очень велико и составляет 10^{14} раз (для звукового давления 10^7 раз). Поэтому для характеристики силы звука удобнее пользоваться логарифмическими величинами:

уровнем интенсивности звука, выраженным в *децибелах* (дБ):

$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_0}$$

и *уровнем звукового давления* (дБ):

$$L_p = 10 \lg \frac{P^2}{P_0^2} = 20 \lg \frac{P}{P_0},$$

где I_0 и p_0 – значения, соответствующие порогу слышимости на частоте 1000 Гц ($I_0 = 10^{-12} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$, $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$).

Значение p_0 выбрано таким образом, чтобы при нормальных атмосферных условиях $L_I = L_p$. Поэтому в дальнейшем будем использовать величину

$L = L_I = L_p$, которую называют *уровнем звука в децибелах*.

Уровень звука, соответствующий порогу слышимости на частоте 1000 Гц, равен 0 дБ. Болевой порог восприятия звука соответствует $I_6 = 10^2 \text{ Вт/м}^2$ и $p_6 = 2 \cdot 10^2 \text{ Па}$, что дает значение $L_6 = 140 \text{ дБ}$.

Введению логарифмических единиц измерения способствовало также то обстоятельство, что ухо человека реагирует не на абсолютное изменение интенсивности звука, а на относительное. 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 сила звука изменяется уже в 2 раза.

Рассмотрим, как рассчитать суммарный уровень звука для звукового поля, создаваемого несколькими источниками. Возьмем для простоты два источника.

В любой точке пространства звуковое давление равно:

$$p = p_1 + p_2,$$

где p_1 и p_2 – мгновенные значения звуковых давлений, создаваемых в этой точке соответственно первым и вторым источником.

Результирующая интенсивность звука равна:

$$I = \overline{p\dot{v}} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \overline{p^2} dt,$$

где

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

Если источники звука некогерентные, то есть создаваемые ими давления не связаны по фазе, то $\overline{p_1 p_2} = 0$ и $\overline{p^2} = \overline{p_1^2} + \overline{p_2^2}$ или $I = I_1 + I_2$ - интенсивность суммарного звукового поля равна сумме интенсивностей источников.

Таким образом, если поле создается N некогерентными источниками, то

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_N, \quad \text{а} \quad L = 10 \lg \left(10^{\frac{L_1}{10}} + 10^{\frac{L_2}{10}} + \dots + 10^{\frac{L_N}{10}} \right) \text{ дБ},$$

где $L_1 = 10 \lg \frac{I_1}{I_0}$, $L_2 = 10 \lg \frac{I_2}{I_0}$... - уровни звука, создаваемые каждым источником в расчетной точке.

При N одинаковых источниках шума, равноудаленных от расчетной точки, с уровнями звукового давления L_0 , суммарный уровень равен:

$$L = L_0 + 10 \lg N.$$

3 ВОСПРИЯТИЕ ЗВУКА ЧЕЛОВЕКОМ

3.1 Слух

Слухом называется способность организма получать информацию о внешнем мире, воспринимая звуковые колебания окружающей среды с помощью специального нервного механизма – звукового (слухового) анализатора. Слуховой анализатор условно разделяют на три отдела: периферический, включающий звуковоспринимающие органы и рецепторы, преобразующие энергию звуковых колебаний в энергию нервного возбуждения; проводниковый – нейроны, проводящие возбуждение; центральный, в котором нейроны воспринимающих центров производят обработку информации. У человека к слуховому анализатору относятся наружное, среднее и внутреннее ухо, нервные проводящие пути слуховой системы, проходящие от кортиева органа в слуховую область коры головного мозга, и слуховая область коры.

Схема строения человеческого уха приведена на рисунке 3.1.

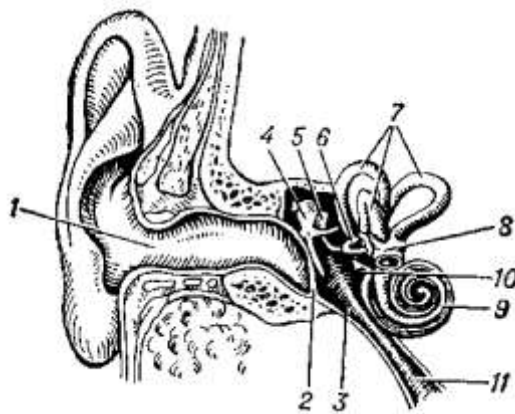


Рисунок 3.1 - Схема строения уха человека: 1 — наружный слуховой проход; 2 — барабанная перепонка; 3 — полость среднего уха (барабанная полость); 4 — молоточек; 5 — наковальня; 6 — стремечко; 7 — полукружные каналы; 8 — преддверие; 9 — улитка; 10 — овальное окно; 11 — евстахиева труба.

Наружное ухо – это ушная раковина и примыкающий к ней наружный слуховой проход. Наружное ухо отделено от среднего кожной мембраной – барабанной перепонкой. Среднее ухо представляет собой заполненную воздухом полость, соединенную с носоглоткой евстахиевой трубой. В барабанной полости находится система слуховых косточек – молоточек, наковальня и стремечко. Рукоятка молоточка срослась с барабанной перепонкой, головка молоточка гибко связана с наковальней, а короткий отросток наковальни с другой стороны соединен с головкой стремечка. Основание стремечка заходит через овальное окно во внутреннее ухо. Внутреннее ухо (улитка) представляет собой капсулу, заполненную жидкостью. Улитка длиной около 35 мм образует два витка. Полость улитки по всей длине разделена перегород-

кой (основной мембраной) на две части. На основной мембране расположен звуковоспринимающий кортиев орган, состоящий из множества рецепторных волосковых клеток.

Колебания барабанной перепонки, вызываемые звуковыми волнами, через систему слуховых косточек передаются жидкости в улитке. Колебания основной мембраны приводят в движение волосковые клетки кортиева органа, в которых возбуждается электрический потенциал. Этот потенциал и приводит к возбуждению волокон слухового нерва, который передает соответствующий сигнал в слуховой центр коры головного мозга.

К основным свойствам слуха можно отнести способность к различению частоты и интенсивности звуков, к анализу сложных звуков и к оценке их свойств, определять положение источника звука в пространстве, выделять один из звуковых сигналов на фоне других и так далее. Свойства слуха различны у разных животных. Более высокоорганизованные животные обладают существенно большим совершенством свойств слуха. Например, слух человека обладает рядом специфических свойств, связанных с восприятием речи.

К количественным характеристикам слуха относятся слуховая чувствительность (**порог слышимости**), верхний предел слухового восприятия (**порог болевого ощущения** или **болевой порог**) и частотный диапазон слышимости.

У разных животных частотный диапазон слышимых звуков различен. Например, для кузнечиков он составляет 10 Гц – 100 кГц, для лягушки 50 Гц – 30 кГц, верхняя граница слышимости для летучих мышей 100-150 кГц. Область слышимых для человека звуков приведена на рисунке 3.2.

Видно, что человек воспринимает на слух звуки в диапазоне частот от 16 Гц до 20 кГц (**слышимый звук**). Звуковые волны с частотами ниже 16 Гц называются **инфразвуком**, а с частотами выше 20 кГц – **ультразвуком**.

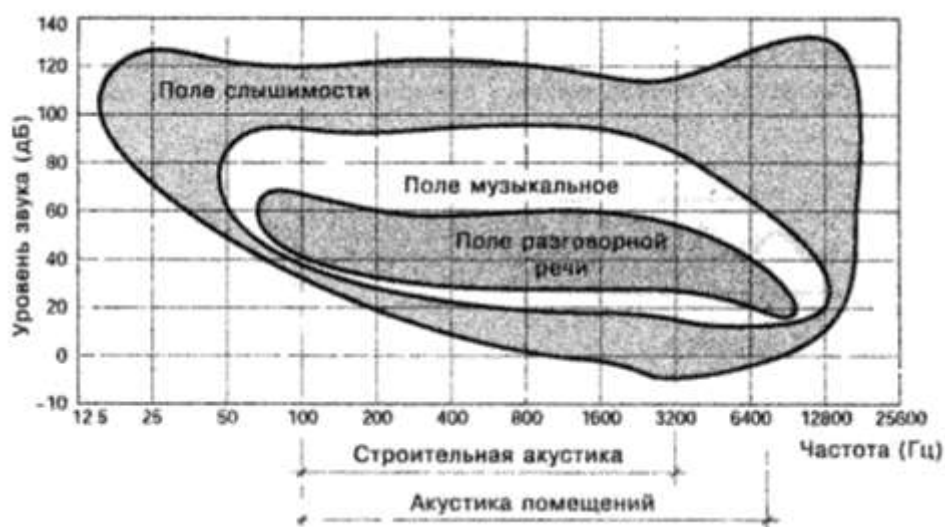


Рисунок 3.2 - Область слышимых звуков для человека

Субъективное восприятие слышимого звука человеком характеризуется **высотой, громкостью и тембром**. Рассмотрим связь этих характеристик с физическими параметрами звуковой волны.

3.2 Высота тона

Гармоническая звуковая волна воспринимается на слух как **чистый** (музыкальный) **тон**. При этом, чем больше частота колебаний в волне, тем выше тон. По высоте звуки принято делить на октавы. **Октавой** называется полоса частот, в которой верхняя граничная частота в два раза больше, чем нижняя:

$$f_2 = 2f_1. \quad (3.1)$$

В качестве частоты, характеризующей частотную полосу в целом, берется **среднегеометрическая частота** $f = \sqrt{f_1 f_2}$. Среднегеометрические частоты октавных полос стандартизованы: 32, 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 Гц.

Симфонический оркестр воспроизводит почти все слышимые частоты. Диапазон рояля охватывает тона с частотами примерно от 25 до 4000 Гц. При помощи бесклавишных инструментов (типа скрипки) можно взять тон любой высоты. В таком инструменте, как рояль, струны настроены на определенные частоты. За основу берется нота «ля» первой октавы, для которой частота колебаний равна 440 Гц. При настройке таких музыкальных инструментов октаву делят на 12 частей (полутонов). Соотношение частот соседних тонов при этом равно 1,029. Связь между высотой нот музыкального звукоряда и частотой тона приведена на рисунке 3.3 а.

Единицей измерения высоты тона является **мел**. В соответствии с общепринятым определением тон частотой 1000 Гц при уровне звука 60 дБ имеет высоту 1000 мел. Зависимость высоты тона в мелах от частоты представлена на рисунке 3.3 б.

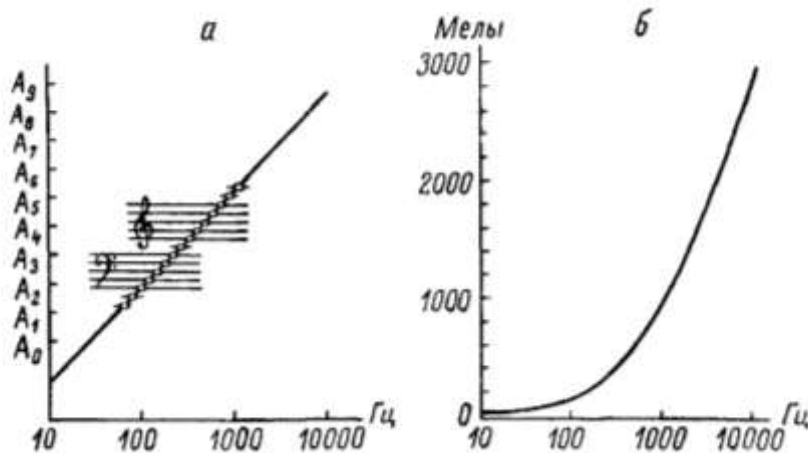


Рисунок 3.3 – Соотношение частоты и высоты тонов

3.3 Громкость звука

Если сравнить между собой громкость двух чистых тонов одинаковой частоты, то чем больше амплитуда звукового давления, тем более громким будет звук. Однако человеческое ухо имеет разную чувствительность к звукам разной частоты, то есть на разных частотах одинаковую громкость могут иметь звуки разной интенсивности. **Область наилучшей слышимости** лежит в интервале от 1000 до 5000 Гц. На низких и высоких частотах чувствительность слухового аппарата снижается.

Громкость звука оценивают, сравнивая ее с громкостью чистого тона частотой 1000 Гц. Уровень звукового давления (в дБ) чистого тона с частотой 1000 Гц, столь же громкого (сравнением на слух), как и измеряемый звук, называется **уровнем громкости данного звука (в фонах)**. На практике для оценки громкости звука различных частот используют «кривые равной громкости» - геометрическое место точек равногромких тонов различных частот (рисунок 3.4).

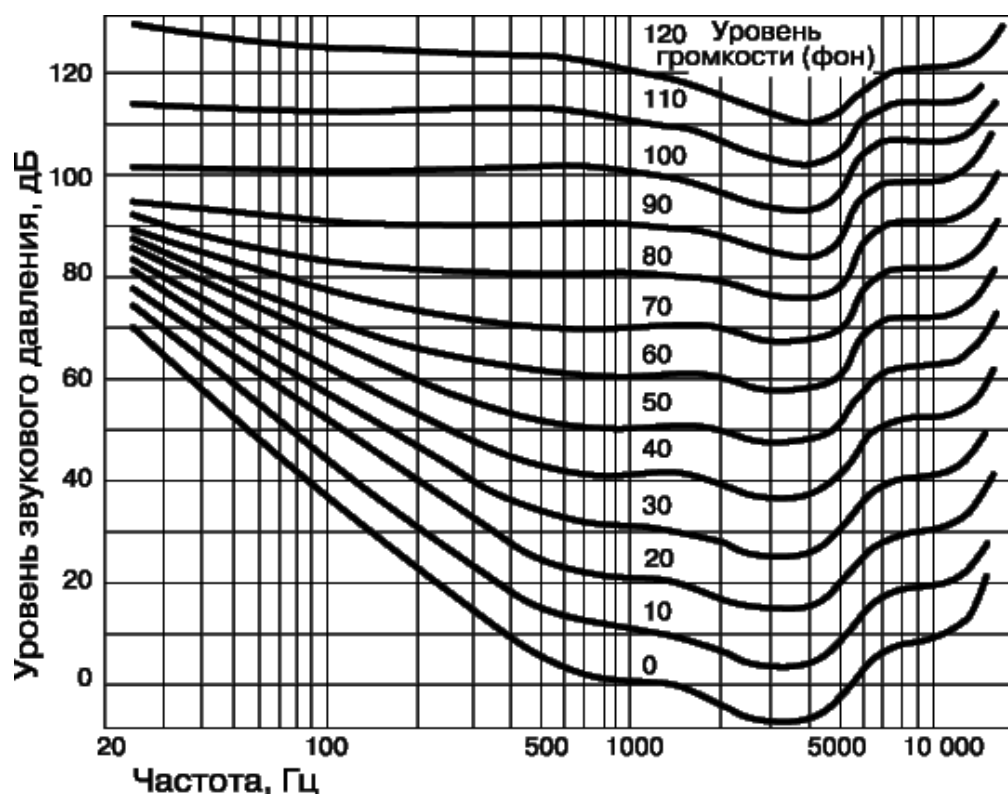


Рисунок 3.4 – Кривые равной громкости

Нижняя кривая показывает зависимость порога слышимости от частоты. На частоте 1000 Гц порог слышимости соответствует давлению 0,02 мПа (0 дБ). В области очень низких или очень высоких частот порог слышимости повышается и может составлять 80 – 100 дБ. Следует отметить, что с возрастом порог слышимости сдвигается, особенно в области высоких частот (рисунок 3.5).

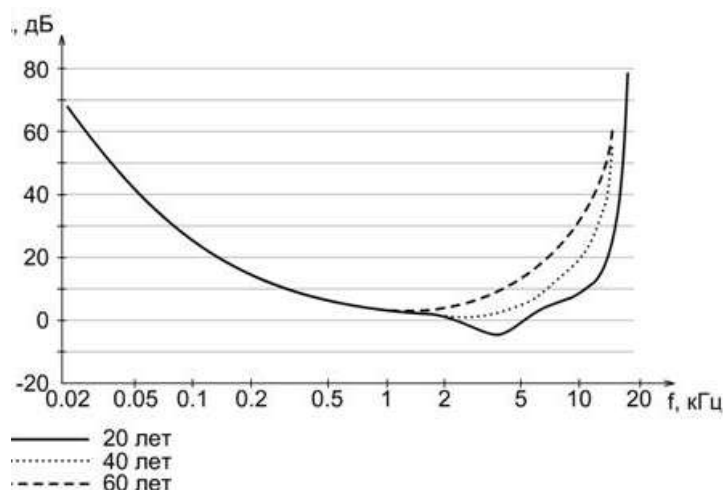


Рисунок 3.5 – Возрастные изменения порога слышимости

В области наилучшей слышимости ухо способно различить около 370 градаций по громкости, а на частоте 60 Гц число градаций только 34. Эти данные соответствуют условиям тонкого опыта при полной тишине. Практически человек с нормальным слухом начинает замечать прирост уровня звука на 1 дБ, то есть на 26% по интенсивности звука.

Примеры уровня громкости различных звуков:

- шум авиадвигателя (на расстоянии 5 м от винта) – 120 фон;
- вагон метро на большой скорости – 90- 95 фон;
- шумная улица - 80-85 фон;
- шум в городской квартире – 40-50 фон;
- шепот на расстоянии 1 м – 20 фон.

Шкала уровней громкости не является натуральной шкалой, то есть, например, изменение уровня громкости в два раза не означает, что субъективное ощущение громкости звука изменится во столько же раз. Для оценки субъективного восприятия громкости звука введена шкала сонов. **Громкость звука в сонах** равна

$$S = 2^{\frac{L-40}{10}}, \quad (3.2)$$

где L – уровень громкости в фонах.

Из формулы (3.2) видно, что громкость в 1 сон имеет звук с уровнем громкости $L = 40$ фон. Изменение уровня громкости на 10 фон соответствует изменению громкости звука в два раза. Диапазоны громкости различных звуков иллюстрирует рисунок 3.6.

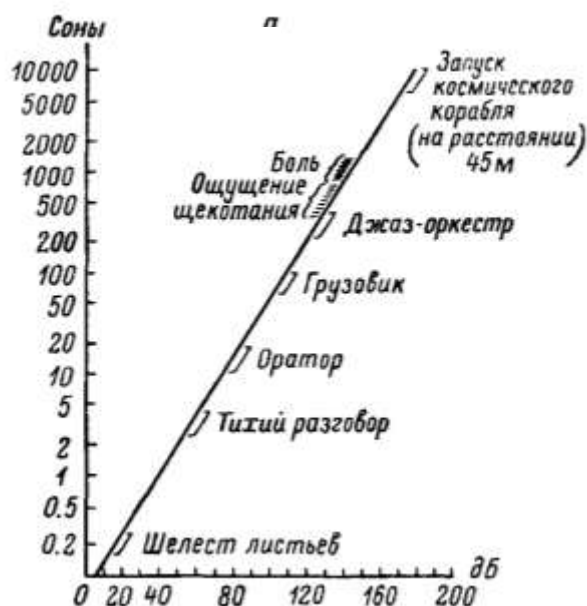


Рисунок 3.6 – Громкость различных звуков

3.4 Спектральный состав звука

Физические величины, характеризующие звук, являются функцией времени, поэтому их можно представить в виде суммы гармонических колебаний с различными частотами и амплитудами (см. раздел 1.1.2). Зависимость амплитуды (или эффективного значения) гармонических составляющих звуковой волны от частоты называется **спектром звука**.

Периодические колебания при разложении в ряд Фурье представляются как сумма гармоник с различной амплитудой. Такие гармоники образуют **дискретный** или **линейчатый спектр**.

Непериодические колебания сложной формы (случайные или одиночные процессы) могут быть представлены с помощью интеграла Фурье в виде суммы бесконечно большого числа гармонических составляющих, образующих **сплошной спектр**. Обычно звуковые сигналы имеют **смешанный спектр**, в котором на фоне сплошного спектра выделяются отдельные тональные составляющие. Различные виды спектров приведены на рисунке 3.7.

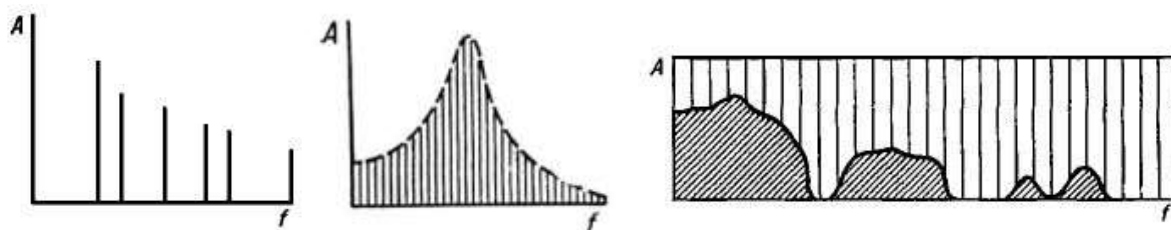
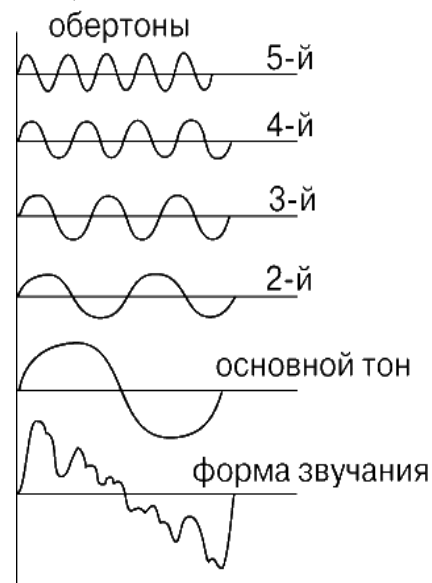


Рисунок 3.7 – Различные виды спектров звуковых сигналов

Дискретные спектры характерны, в основном, для **музыкальных звуков**. При этом самая низкая по частоте гармоника называется **основным тоном**, а все остальные – **обертонами** (рисунок 3.8).

Рисунок 3.8 – Разложение звукового сигнала на гармонические составляющие.



Частота основного тона определяет высоту звука, а обертоны придают звуку определённую тембровую окраску (**тембр**). Если в звуке мало обертонов, то тембр оценивается как глухой, пустой, неокрашенный; если сильно выражены первые обертоны – сочный, полный; если сильно выражены высшие составляющие в области 3000 – 6000 Гц – пронзительный, металлический, резкий, яркий. На рисунке 3.9 приведены осциллограммы звуков одинаковой высоты, исполняемых на рояле и кларнете. Период у обоих колебаний одинаков, но они сильно отличаются друг от друга по своей форме и, следовательно, различаются своим гармоническим составом.

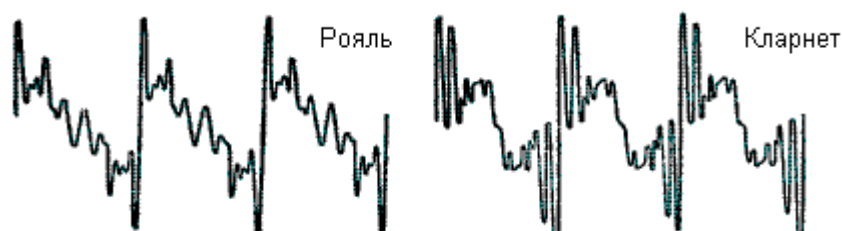


Рисунок 3.9 – Осциллограммы звуковых колебаний рояля и кларнета.

На рисунке 3.10 изображены спектры этих звуковых сигналов. Так как высоты звуков одинаковы, то и частоты тонов - основного и обертонов - одни и те же. Однако амплитуды отдельных гармоник в каждом спектре сильно различаются.

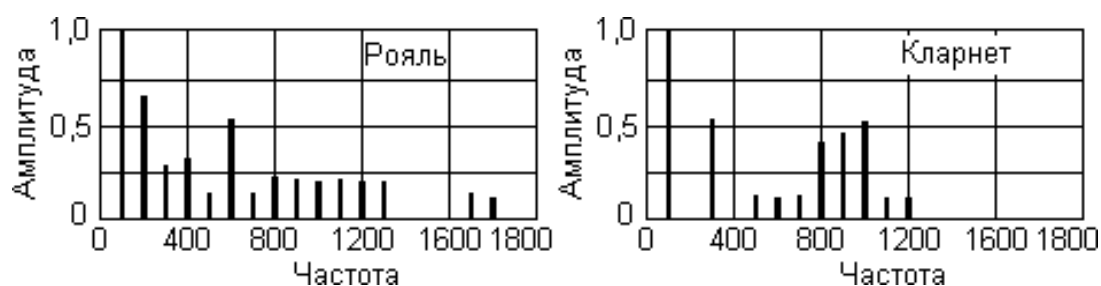


Рисунок 3.10 – Спектры звуковых колебаний рояля и кларнета

Сплошной широкополосный спектр характерен для неупорядоченных во времени звуковых сигналов, называемых **шумом**. При этом по положению максимума спектра шумы можно разделить на низкочастотные (максимум ниже 300 Гц), среднечастотные (от 300 до 800 Гц) и высокочастотные (максимум выше 800 Гц).

Спектр **речи** является смешанным, причём его дискретные частоты определяются гласными звуками, которые по своей природе близки к музыкальным. Их спектр представляет собой последовательность большого числа отдельных линий, соответствующих гармоникам колебаний голосовых связок. Основная частота колебаний голосовых связок у разных людей различна (бас – примерно 100 Гц, сопрано – 250 Гц).

Обычно при произнесении гласных звуков максимальную амплитуду имеют одна или две гармоники, которые называются **формантами**. Например, для гласного звука «а» частота форманты примерно равна 900 Гц, для «о» – 500 Гц, для «е» – 550 и 2100 Гц, для «и» – 350 и 2400 Гц. Согласные звуки характеризуются сплошным («шумовым») спектром. На рисунке 3.10 приведены спектры звуков «а» и «с».

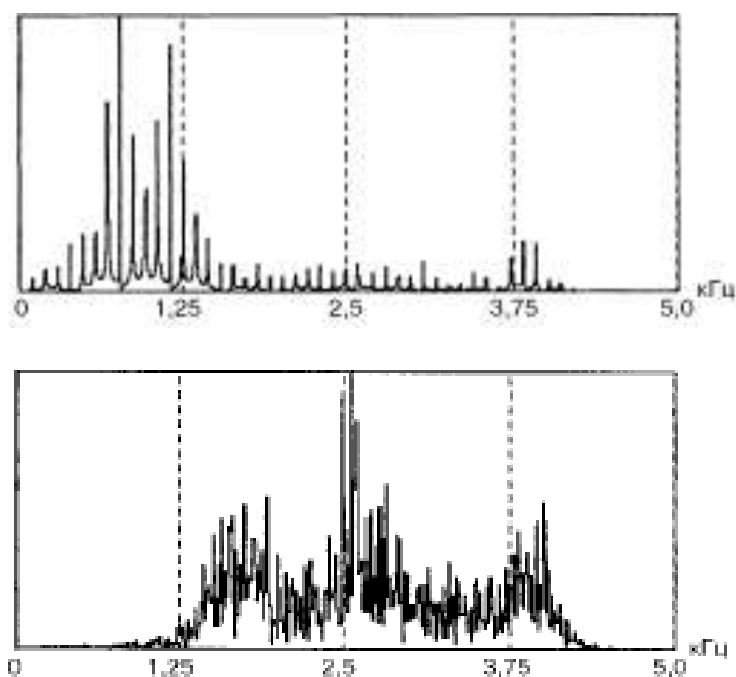


Рисунок 3.10 – Спектры звуков речи: «а» (вверху) и «с» (внизу).

4 ИСТОЧНИКИ И ПРИЕМНИКИ ЗВУКА

4.1 Излучение звука колеблющимися телами

Источником звуковых волн может служить любое колеблющееся тело: камертон, язычок звонка, струна, голосовые связки и так далее. Колебания, совершаемые источником звука, вызывают движение частиц окружающей среды, непосредственно соприкасающихся с источником. Из-за упругой связи между частицами среды эти колебания передаются все дальше и дальше от источника, то есть распространяется звуковая волна.

Законы распространения звуковых волн от данного источника определяются как параметрами самого источника (формой, размерами, амплитудой и спектральным составом его колебаний), так и свойствами окружающей среды (скоростью звука в ней, ее волновым сопротивлением, однородностью и так далее).

Если размеры источника звука малы по сравнению с длиной излучаемой звуковой волны ($L_{ист} \ll \lambda$), то такой источник можно считать **точечным**. В однородной среде от него будут распространяться **сферические** волны. Если размеры источника велики по сравнению с длиной волны ($L_{ист} \gg \lambda$), то вследствие процессов дифракции его излучение будет направленным. Скорость звука в воздухе примерно равна 340 м/с. Максимальная длина волны, соответствующая низкочастотной границе слышимого звука ($f_{min} = 16$ Гц), $\lambda_{max} = 22$ м, а минимальная длина волны (при частоте 20 кГц) $\lambda_{min} = 0,017$ м. Поэтому для получения направленного звукового пучка на речевых частотах (300 – 2000 Гц) применяют рупоры с диаметром выходного сечения порядка 1 м.

Кроме направленности излучения к основным характеристикам источников звука относятся частотный спектр и мощность излучаемого звука.

Рассмотрим принцип действия простейших источников звука.

4.1.1 Колебания струны

Струна представляет собой тонкую, гибкую, сильно натянутую нить с равномерно распределенной по длине массой. При возбуждении струны, например, ударом или щипком, она будет совершать колебательное движение, при котором все ее участки смещаются в поперечном направлении.

Рассмотрим струну длины L , концы которой закреплены. Обозначим скорость распространения изгибных волн в струне V . При возбуждении колебаний на струне установится стоячая волна. При этом на концах будут находиться узлы, а между ними – одна или несколько пучностей. Так как расстояние между узлами равно $\lambda/2$, то на длине струны должно уложиться целое число полуволн ($L = m\lambda/2$), то есть на струне могут возникать только такие стоячие волны, у которых длина волны $\lambda = 2L/m$ ($m = 1, 2, 3 \dots$). Используя формулу связи длины волны с частотой колебаний и скоростью распро-

странения волны $\lambda = V/f$, получим формулу для определения собственных частот колебаний струны:

$$f = V/\lambda = mV/(2L). \quad (4.1)$$

Скорость распространения поперечных колебаний в струне определяется формулой:

$$V = \frac{2}{d} \sqrt{\frac{F}{\pi \rho}}, \quad (4.2)$$

где F , d , ρ – сила натяжения, диаметр и плотность материала струны соответственно. Подставляя значения скорости в формулу (4.1), получим выражение для собственных частот колебаний струны:

$$f_m = \frac{m}{Ld} \sqrt{\frac{F}{\pi \rho}}, \text{ где } m = 1, 2, 3 \dots \quad (4.3)$$

Наименьшая собственная частота f_1 ($m = 1$) называется **основной частотой** или **основным тоном**. Более высокие частоты, кратные f_1 , называются **обертонами** или **гармониками**.

На рисунке 4.1 представлены стоячие волны, частоты которых соответствуют основному тону ($m = 1$) – рис.4.1а, первому обертону ($m = 2$) – рис.4.1б, второму обертону ($m = 3$) – рис.4.1в.

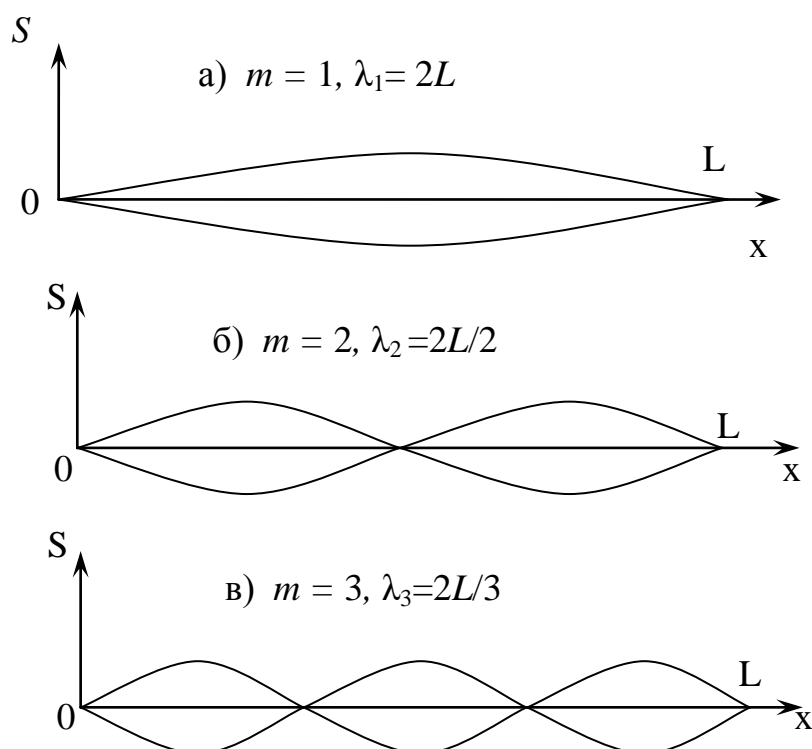


Рисунок 4.1 – Собственные колебания струны

Частота основного тона $f_1 = \frac{1}{Ld} \sqrt{\frac{F}{\pi\rho}}$ определяет высоту звучания

струны. Из формулы видно, что звук струны становится выше при увеличении натяжения струны. Увеличение длины струны, ее диаметра и плотности материала приводит к понижению звучания. Наличие и амплитуды обертонов, зависящие от способа возбуждения струны, определяют тембр издаваемого звука.

4.1.2 Колебания мембраны

Мембрана – это гибкая тонкая пленка, натянутая по периметру. Спектр звука, издаваемого колеблющейся мембраной, определяется ее формой, размерами, натяжением и поверхностной плотностью.

Частоты собственных колебаний прямоугольной мембраны, закрепленной по контуру, равны:

$$f_{mn} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T}{\sigma}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}, \quad (4.4)$$

где T – натяжение по краю мембраны (Н/м), σ – поверхностная плотность мембраны (кг/м²), a и b – стороны мембраны, m и n – целые числа. На рисунке 4.2 изображены несколько собственных колебаний такой мембраны.

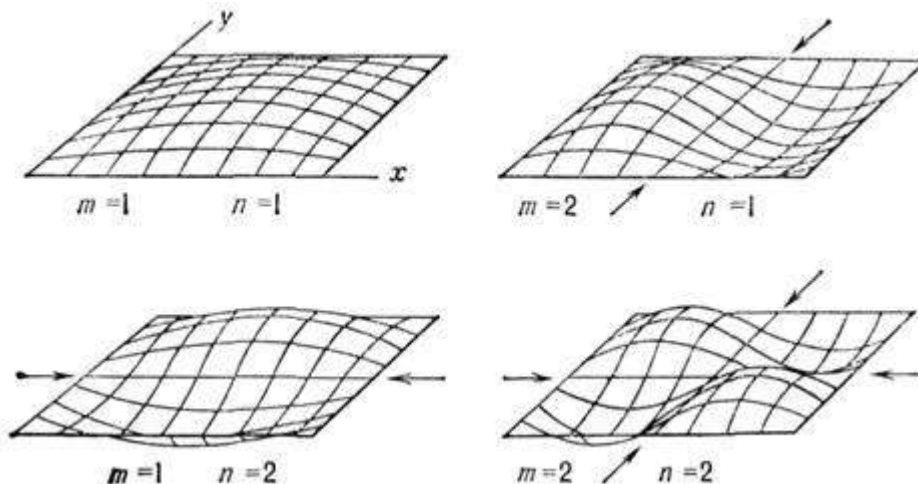


Рисунок 4.2 – Собственные колебания прямоугольной мембраны

4.1.3 Электродинамический громкоговоритель (динамик)

Наибольшее распространение в качестве излучателей звука получили **электроакустические преобразователи**, в которых энергия электрических колебаний преобразуется в энергию упругих колебаний твердого тела (мем-

браны, пластинки и др.), которое и излучает в окружающую среду акустическую волну. Простейшее устройство такого типа – электродинамический громкоговоритель (рисунок 4.3).

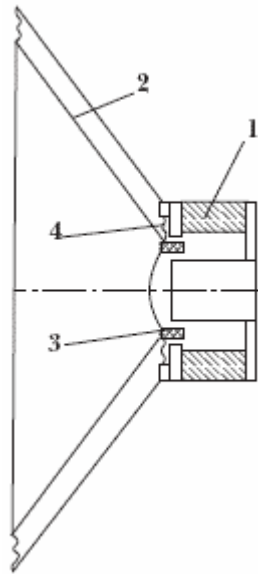


Рисунок 4.3 – Устройство электродинамического громкоговорителя
1 – магнит; 2 – подвижная система (диффузор); 3 – звуковая катушка; 4 – центрирующая шайба

Работа электродинамического громкоговорителя (динамика) основана на взаимодействии магнитного поля постоянного магнита с током в подвижной катушке, в которую подаются электрические колебания звуковой частоты. Катушка и жёстко соединённый с ней диффузор образуют подвижную систему громкоговорителя. Механические колебания катушки и соответственно диффузора сопровождаются излучением звуковых волн либо непосредственно, либо через рупор.

4.1.4 Механический шум

Особым видом звука, возбуждаемого колеблющимися телами, является механический шум.

Механический шум вызывается силовыми воздействиями неуравновешенных вращающихся тел, ударами в сочленениях деталей, стуками в зазорах, движением материалов в трубопроводах, колебаниями деталей машин и тому подобное.

Поскольку возбуждение механического шума носит обычно ударный характер, а излучающие его конструкции и детали представляют собой распределенные системы с многочисленными собственными частотами колебаний, спектр механического шума практически сплошной и занимает широкую область частот. Мощность излучаемого шума зависит от массы и скорости соударяющихся тел и их упругих свойств.

4.2 Гидродинамические излучатели звука

Принцип действия гидродинамических излучателей звука основан на преобразовании кинетической энергии струи газа или жидкости в энергию акустических колебаний.

4.2.1 Сирена

Действие сирены основано на периодическом механическом прерывании струи газа или жидкости.

В *пульсирующих сиренах* перекрытие потока движущихся в трубе жидкости или газа производится заслонкой, совершающей возвратно-поступательное движение. Управление движением заслонки осуществляется электромеханическим или электромагнитным преобразователем. Основная частота излучаемого звукового сигнала при этом равна частоте движения заслонки.

Схема устройства *вращающейся сирены* приведена на рисунке 4.4. Сжатый воздух от компрессора подается в камеру 1 высокого давления; в камере на оси электромотора вращается ротор сирены 3 – диск, по краю которого расположено большое количество отверстий; неподвижный диск – статор 4 с отверстиями отделяет камеру высокого давления от окружающей среды. При равномерном вращении ротора его отверстия периодически совпадают с отверстиями статора. В эти моменты происходит выброс сжатого воздуха, что и приводит к возбуждению звука.

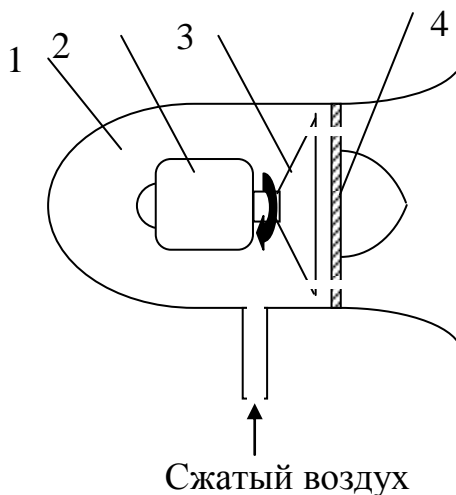


Рисунок 4.4 – Схема звуковой сирены

Частота звука определяется числом отверстий ротора (и статора) m и частотой вращения n : $f = m \cdot n$. Поскольку при запуске сирены частота вращения ротора постепенно нарастает, основной тон звучания сирены меняется от низкого до некоторого стационарного высокого. При выключении сирены наблюдается обратный процесс.

Частотный диапазон, в котором работают сирены, очень широк: от 200-300 Гц до 80-100 кГц. Мощность излучения достигает десятков киловатт.

4.2.2 Свисток

Устройство *свистка* схематически изображено на рисунке 4.5. Воздух, вдуваемый в щелевое сопло 1, разбивается острой кромкой 2 резонансной камеры 3 на два потока: один (основной) выходит в окружающую среду, а другой попадает в резонансную камеру, повышая в ней давление. Через определенные промежутки времени, зависящие от размеров камеры и скорости вдувания воздуха, давление в камере возрастает настолько, что основной поток воздуха перекрывается. Вследствие этого возникают периодические сжатия и разрежения воздуха, распространяющиеся в виде звуковых волн. Мощность излучения свистков обычно около 1 Вт.

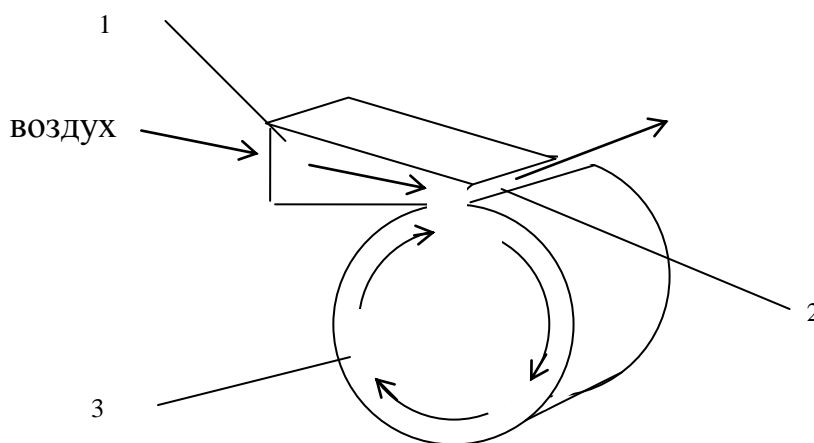


Рисунок 4.5 – Схема устройства свистка.

4.2.3 Духовые музыкальные инструменты

Основной частью духовых музыкальных инструментов является труба (или трубы), заполненная воздухом. Так же, как у струны, колебания воздуха в трубе можно представить в виде суммы гармонических составляющих (собственных колебаний). Частоты этих колебаний определяются длиной трубы L , скоростью звука в воздухе c и граничными условиями на концах трубы.

Для открытой с обоих концов трубы на концах возникают узлы давления (рисунок 4.6), и частоты собственных колебаний определяются соотношением:

$$f_m = \frac{mc}{2L}, \quad (m = 1, 2, 3 \dots) . \quad (4.5)$$

Видно, что чем больше длина трубы, тем ниже ее звук.

Колебания в трубе можно возбуждать по-разному, например, направляя струю воздуха поперек отверстия при $x = 0$. В зависимости от скорости струи воздуха энергия перераспределяется между гармониками, определяя тембр звука.

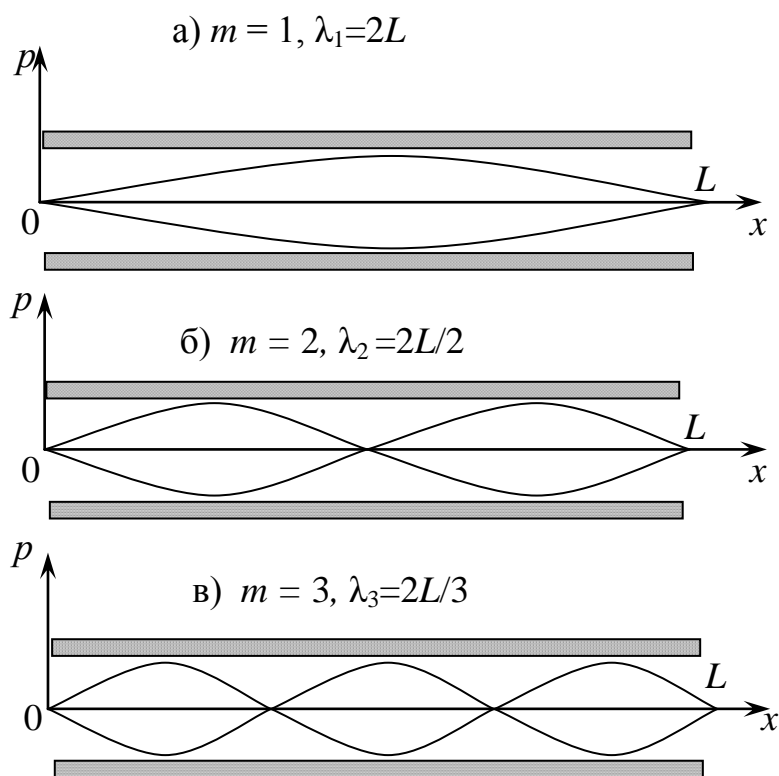


Рисунок 4.6 – Собственные колебания в трубе.

4.2.4 Аэрогидродинамические шумы

Аэрогидродинамические шумы можно разделить на две основные группы:

1) Шумы, связанные с периодическим выбросом газа в атмосферу. Источниками таких шумов являются работающие насосы, компрессоры, двигатели внутреннего сгорания и тому подобное.

2) Шумы, возникающие из-за образования вихрей у твердых границ потока. К ним относится, в первую очередь, шум, образующийся из-за срыва вихрей при обтекании потоком воздуха или жидкости движущихся тел (автомобилей, поездов, самолетов и так далее).

Особым видом аэродинамического шума являются ударные волны, возникающие при преодолении самолетами звукового барьера скорости.

4.3 Приемники звука

Приемники звука – это акустические приборы для восприятия звуковых сигналов и преобразования их с целью измерения, анализа, усиления, записи, передачи или воспроизведения.

В качестве приемников звука можно рассматривать органы слуха животных и человека, преобразующие акустические сигналы в нервные импульсы, передаваемые в соответствующие центры головного мозга.

Мы будем рассматривать наиболее распространенные приемники звука – **микрофоны**, предназначенные для преобразования акустических сигналов в электрические. Микрофоны широко применяются в телефонной связи, радио- и телевидении, системах звукоусиления и звукозаписи.

Рассмотрим устройство и принцип действия некоторых типов микрофонов (рисунок 4.7).

4.3.1 Угольный микрофон

Это простейший микрофон (рисунок 4.7 а), который долгое время использовался в телефонных трубках. Его диафрагма 1, воспринимающая звуковое давление, колеблется, изменяя степень уплотнения и, следовательно, электрическое сопротивление угольного порошка 2, находящегося в прилегающей к диафрагме капсуле. В результате возникают соответствующие изменения тока, протекающего между электродами 3 и 4.

Такие микрофоны несовершенны: нестабильны в работе, создают искажения, подвержены перегрузке.

4.3.2 Электромагнитный микрофон

Электромагнитный микрофон работает следующим образом (рисунок 4.7 б). Перед полюсами (полюсными наконечниками) 2 магнита 3 располагают ферромагнитную диафрагму 1 или скрепленный с ней якорь. При колебаниях диафрагмы под воздействием на нее звукового давления меняется магнитный поток через витки обмотки, намотанной на магнитопровод системы. Благодаря этому на зажимах обмотки возникает переменное напряжение звуковой частоты, являющееся выходным сигналом микрофона.

Электромагнитный микрофон стабилен в работе. Однако для него характерны узкий частотный диапазон, неравномерность частотной характеристики и значительные нелинейные искажения.

4.3.3 Электродинамические микрофоны

В **катушечном** электродинамическом микрофоне (рисунок 4.7 в) с диафрагмой 4 связана катушка 3, расположенная в кольцевом зазоре 1 сильного магнита 2. При колебаниях диафрагмы катушка движется в магнитном

поле и в ней возникает э.д.с. индукции, создающая переменное напряжение на зажимах катушки.

Схема ленточного электродинамического микрофона приведена на рисунке 4.7 г. Здесь магнитная система микрофона состоит из постоянного магнита 1 и полюсных наконечников 2, между которыми натянута легкая, обычно алюминиевая, тонкая ленточка 3. При воздействии на обе ее стороны звукового давления возникает сила, под действием которой ленточка начинает колебаться, пересекая при этом магнитные силовые линии, вследствие чего на ее концах развивается напряжение. Так как сопротивление ленточки очень мало, то для уменьшения падения напряжения на соединительных проводниках напряжение, развиваемое на концах ленточки подается на первичную обмотку повышающего трансформатора, размещенного непосредственно вблизи ленточки. Напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора является выходным напряжением микрофона.

Электродинамические микрофоны имеют сравнительно небольшие габариты, обладают равномерной частотной характеристикой и надежны в эксплуатации. Они широко используются в системах звукоусиления и звукозаписи.

4.3.4 Конденсаторный микрофон

В конденсаторном микрофоне (рисунок 4.7 д) металлическая мембрана 1 является одной из обкладок конденсатора. Другая обкладка представляет собой массивный неподвижный электрод 2. Конденсатор подключен к источнику постоянного напряжения. Под действием звукового давления мембрана колеблется, и расстояние между ней и массивным электродом изменяется. При этом меняется емкость конденсатора, обкладками которого они являются, и в цепи возникает электрический ток, сила которого изменяется в соответствии со звуковыми колебаниями.

Такие микрофоны имеют небольшие размеры, равномерную частотную характеристику и обладают высокой чувствительностью. Они широко используются в качестве измерительных микрофонов, а также в высококачественных системах звукоусиления и звукозаписи.

4.3.5 Пьезоэлектрический микрофон

Основой такого микрофона (рисунок 4.7 е) служит пластинка из пьезоэлектрического материала. **Пьезоэлектрики** – это вещества, в которых при сжатии или растяжении возникает электрическое поле. Самыми распространенными природными пьезоэлектриками являются кварц и сегнетова соль. Кроме того, в настоящее время создано множество искусственных пьезоэлектрических материалов (пьезокерамика).

В микрофонах пьезоэлектрическую пластинку 3 помещают между металлическими электродами. Звуковые волны, действуя на пьезопластинку, через диафрагму 1 и скрепленный с ней стержень 2, вызывают появление

между электродами изменяющегося в соответствии со звуковым давлением напряжения.

Пьезоэлектрические микрофоны имеют очень небольшие размеры, высокую чувствительность и широко используются в современных телефонах, слуховых аппаратах и так далее.

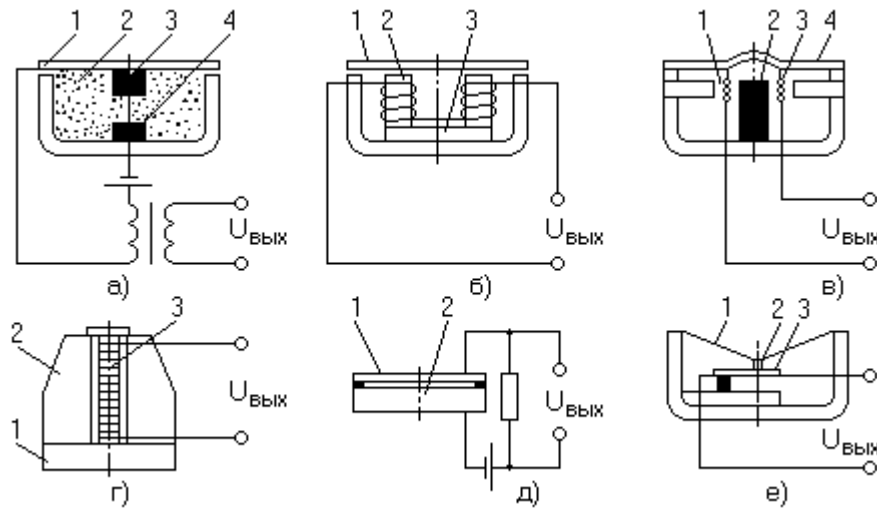


Рисунок 4.7 – Устройство микрофонов: а - угольного; б - электромагнитного; в - электродинамического; г - ленточного; д - конденсаторного; е - пьезоэлектрического

С помощью микрофонов задачи регистрации, записи, анализа, усиления и передачи звуковых сигналов сводятся к соответствующей обработке сигналов электрических. Методики такой обработки хорошо развиты и постоянно совершенствуются. В частности, для записи звуковых сигналов, преобразованных в электрические, используются различные магнитные носители, лазерные диски и так далее. Современные методики анализа и записи, использующие компьютерные технологии, позволяют исключить шумы и добиться очень высокого качества записи и воспроизведения звука, а также моделировать и создавать различные звуковые эффекты.

5 ОТРАЖЕНИЕ И ПРЕЛОМЛЕНИЕ ЗВУКОВЫХ ВОЛН

5.1 Отражение звуковой волны от плоской границы при нормальном падении

Рассмотрим плоскую границу двух сред. Пусть волновое сопротивление первой среды равно $\rho_1 c_1$, а волновое сопротивление второй среды $\rho_2 c_2$ (здесь ρ – плотность соответствующей среды, а c – скорость звука в данной среде). Выберем систему отсчета таким образом, что ось Ox направлена перпендикулярно границе, которая расположена при $x=0$, а ось Oy направлена вдоль границы (рисунок 5.1).

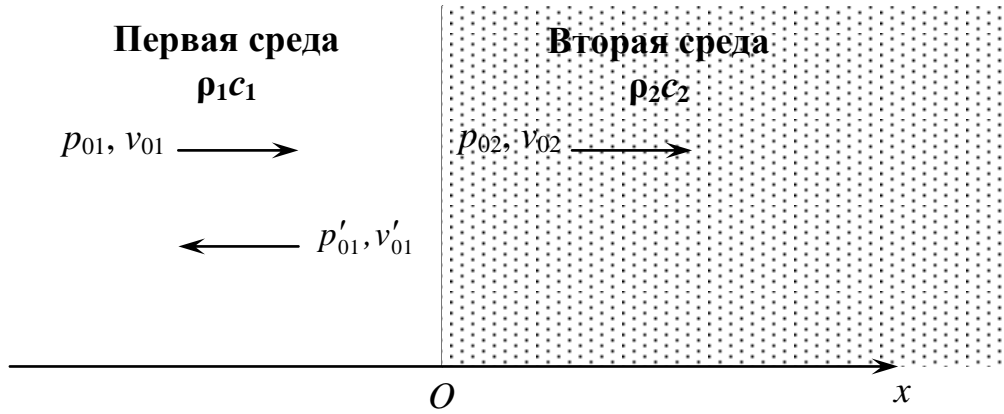


Рисунок 5.1 – Отражение звуковой волны от плоской границы при нормальном падении

Пусть плоская гармоническая звуковая волна нормально падает на границу двух сред. Звуковое давление и колебательная скорость движения частиц в первой среде могут быть представлены в виде суммы соответствующих характеристик падающей и отраженной волны:

$$p_1 = p_{01} \cos(\omega t - k_1 x) + p'_{01} \cos(\omega t + k_1 x), \quad (5.1)$$

$$v_1 = v_{01} \cos(\omega t - k_1 x) + v'_{01} \cos(\omega t + k_1 x). \quad (5.2)$$

Здесь ω – циклическая частота колебаний в волне, $k_1 = \omega/c_1$ – волновое число в первой среде.

Во второй среде будет распространяться только прошедшая волна:

$$p_2 = p_{02} \cos(\omega t - k_2 x), \quad (5.3)$$

$$v_2 = v_{02} \cos(\omega t - k_2 x), \quad (5.4)$$

где $k_2 = \omega/c_2$ – волновое число во второй среде.

На границе раздела (при $x = 0$) в соответствии с третьим законом Ньютона звуковые давления должны быть равны:

$$p_1(x=0) = p_2(x=0). \quad (5.5)$$

Кроме того, скорость движения частиц первой и второй среды на границе также равны (вследствие закона неразрывности):

$$v_1(x=0) = v_2(x=0). \quad (5.6)$$

Подставляя выражения (5.1) – (5.4) в граничные условия (5.5) и (5.6), получаем:

$$p_{01} + p'_{01} = p_{02}, \quad (5.7)$$

$$v_{01} + v'_{01} = v_{02}. \quad (5.8)$$

Между давлением и колебательной скоростью частиц в звуковой волне существует соотношение:

$$\frac{p}{v} = \pm \rho c, \quad (5.9)$$

где знак “+” соответствует волне, бегущей в положительном направлении оси, а знак “-” – обратной волне.

С учетом соотношения (5.9) выражение (5.8) запишется в виде:

$$\frac{1}{\rho_1 c_1} (p_{01} - p'_{01}) = \frac{1}{\rho_2 c_2} p_{02}. \quad (5.10)$$

Решив совместно уравнения (5.7) и (5.10), получим формулы для **коэффициентов отражения и прохождения звуковой волны (по давлению)**:

$$r = \frac{p'_{01}}{p_{01}} = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}, \quad (5.11)$$

$$t = \frac{p_{02}}{p_{01}} = \frac{2\rho_2 c_2}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}. \quad (5.12)$$

Аналогично, **коэффициенты отражения и прохождения для колебательной скорости** равны:

$$r_v = \frac{v'_{01}}{v_{01}} = -\frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}, \quad (5.13)$$

$$t_v = \frac{v_{02}}{v_{01}} = \frac{2\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}. \quad (5.14)$$

Проанализируем полученные выражения. Если $\rho_2 c_2 > \rho_1 c_1$, то есть вторая среда акустически более “жесткая”, чем первая, то $r > 0$, а $r_v < 0$. Это означает, что при отражении от более “жесткой” среды скорость частиц меняет фазу на противоположную, а фаза давления остается неизменной. Если отражение происходит от абсолютно жесткой поверхности ($\rho_2 c_2 \rightarrow \infty$), то амплитуда звукового давления на границе удваивается по сравнению с падающей волной, а амплитуда колебательной скорости равна нулю. Таким образом, на жесткой стенке имеет место пучность стоячей волны для давления и узел стоячей волны для колебательной скорости.

При $\rho_2 c_2 < \rho_1 c_1$ (вторая среда акустически более “мягкая”) фаза колебательной скорости не изменяется, а фаза давления изменяется на π . Это означает, что на абсолютно “мягкой” границе ($\rho_2 c_2 \rightarrow 0$) будет узел звукового давления и пучность колебательной скорости частиц.

Наконец, при $\rho_2 c_2 = \rho_1 c_1$ коэффициент отражения равен нулю. Это означает, что отраженной волны не возникает и звук беспрепятственно проходит во вторую среду. В этом случае говорят, что среды согласованы по акустическому сопротивлению.

Так как между звуковым давлением и интенсивностью звуковой волны существует соотношение:

$$I = \frac{p_0^2}{2\rho c}, \quad (5.15)$$

то **энергетический коэффициент отражения** звука от границы равен:

$$r_I = \frac{I'_1}{I_1} = r^2. \quad (5.16)$$

Величина, равная отношению интенсивности звуковой волны, прошедшей во вторую среду, к интенсивности падающей на границу волны, называется **коэффициентом звукопоглощения** поверхности раздела двух сред:

$$\alpha = \frac{I_2}{I_1} = 1 - r_I = 1 - r^2. \quad (5.17)$$

При нормальном падении звуковой волны на плоскую поверхность коэффициент звукопоглощения с учетом формулы (5.11) равен:

$$\alpha = \frac{4\rho_2 c_2}{(\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1)^2}. \quad (5.18)$$

Рассмотрим практически важный случай, когда звуковая волна из воздуха ($\rho_1 c_1 = \rho_0 c \approx 420 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \text{с}}$) падает на плоскую поверхность материала с волновым сопротивлением $R = \rho_2 c_2$. В этом случае формулы для коэффициента отражения (5.11) и коэффициента звукопоглощения (5.18) принимают вид:

$$r = \frac{R/\rho_0 c - 1}{R/\rho_0 c + 1} = \frac{R_1 - 1}{R_1 + 1}, \quad (5.19)$$

$$\alpha = \frac{4R_1}{(R_1 + 1)^2}. \quad (5.20)$$

Величина $R_1 = R/\rho_0 c$ называется **волновым сопротивлением, выраженным в долях волнового сопротивления воздуха, или безразмерным волновым сопротивлением (импедансом) среды**.

Если среда не является бесконечной и звуковая волна при распространении в ней поглощается, то волновое сопротивление среды является комплексным числом:

$$Z = \frac{P}{v} = R + iY, \quad (5.21)$$

где R – активная часть импеданса, а Y – реактивная часть импеданса. Безразмерный импеданс:

$$Z_1 = \frac{Z}{\rho_0 c} = R_1 + iY_1, \quad (5.22)$$

Физически наличие реактивной составляющей импеданса означает, что между звуковым давлением и колебательной скоростью частиц среды существует фазовый сдвиг. Коэффициент отражения от среды с комплексным импедансом также является комплексным числом:

$$r = \frac{Z_1 - 1}{Z_1 + 1}. \quad (5.23)$$

Коэффициент звукопоглощения при нормальном падении звуковой волны из воздуха на поверхность с комплексным импедансом равен:

$$\alpha = 1 - |r|^2 = \frac{4R_1}{(R_1 + 1)^2 + Y_1^2}. \quad (5.24)$$

Анализ формулы (5.24) показывает, что для достижения максимального значения коэффициента звукопоглощения ($\alpha = 1$) необходимо, чтобы активная часть импеданса поверхности, на которую падает звуковая волна, была равна волновому сопротивлению воздуха ($R = \rho_0 c$ или $R_1 = 1$), а реактивная часть импеданса Y_1 должна стремиться к нулю. При разработке звукопоглощающих материалов и конструкций ориентируются именно на эти показатели.

5.2 Отражение и преломление при наклонном падении

Рассмотрим случай наклонного падения плоской звуковой волны на границу раздела двух сред. Пусть угол падения равен φ_1 , угол отражения φ'_1 , угол преломления φ_2 (рисунок 5.2).

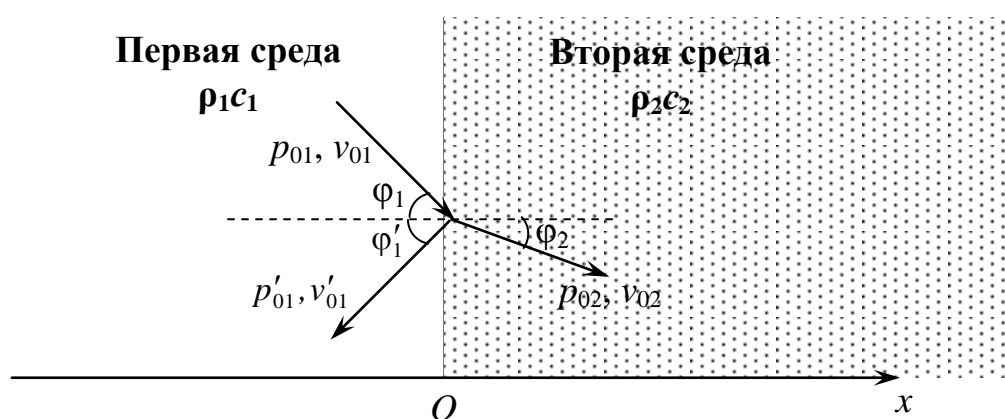


Рисунок 5.2 – Отражение от плоской границы при наклонном падении

Граничные условия в этом случае имеют тот же смысл, что и при нормальном падении: должны быть равны между собой нормальные к границе составляющие скорости и давления в первой и второй среде.

Кроме того, должен выполняться **закон Снеллиуса**:

$$k_1 \sin \varphi_1 = k'_1 \sin \varphi'_1 = k_2 \sin \varphi_2$$

или, так как $k = \omega/c$,

$$\frac{\sin \varphi_1}{c_1} = \frac{\sin \varphi'_1}{c_1} = \frac{\sin \varphi_2}{c_2}. \quad (5.25)$$

Этот закон универсален для всех типов плоских волн, падающих на плоские однородные препятствия. Физический смысл этого требования состоит в том, чтобы следы волн на поверхности раздела двух сред не обгоняли друг друга.

Следствием закона Снеллиуса являются **законы отражения и преломления звука**:

$$\varphi_1 = \varphi'_1, \quad (5.26)$$

$$\frac{\sin \varphi_1}{\sin \varphi_2} = \frac{c_1}{c_2} = n. \quad (5.27)$$

Величина n называется **относительным показателем преломления звука**.

Коэффициенты отражения и прохождения звуковой волны (по давлению) при наклонном падении имеют вид:

$$r = \frac{p'_{01}}{p_{01}} = \frac{\rho_2 c_2 / \cos \varphi_2 - \rho_1 c_1 / \cos \varphi_1}{\rho_2 c_2 / \cos \varphi_2 + \rho_1 c_1 / \cos \varphi_1}, \quad (5.28)$$

$$t = \frac{p_{02}}{p_{01}} = \frac{2\rho_2 c_2 / \cos \varphi_2}{\rho_2 c_2 / \cos \varphi_2 + \rho_1 c_1 / \cos \varphi_1}. \quad (5.29)$$

Если учесть формулу (5.27) и ввести обозначение $m = \frac{\rho_2}{\rho_1}$, то формулу (5.28) можно представить в виде:

$$r = \frac{m \cos \varphi_1 - \sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi_1}}{m \cos \varphi_1 + \sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi_1}}. \quad (5.30)$$

Проанализируем выражение (5.30). При нормальном падении ($\varphi_1 = 0$) это выражение совпадает с формулой (5.11). При скользющем падении ($\varphi_1 \rightarrow 90^\circ$) коэффициент отражения $r \rightarrow -1$. При $m \cos \varphi_1 - \sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi_1} = 0$ имеет место полное прохождение звуковой волны через границу ($r = 0$). Угол падения, при котором коэффициент отражения обращается в нуль, называется **углом Брюстера**:

$$\sin \varphi_B = \sqrt{\frac{m^2 - n^2}{m^2 - 1}}. \quad (5.31)$$

Для того, чтобы угол Брюстера был действительным, необходимо, чтобы выполнялось условие:

$$0 \leq \frac{m^2 - n^2}{m^2 - 1} \leq 1, \quad (5.32)$$

что, в свою очередь, реализуется либо при $m > 1; 1 < n \leq m$, либо при $m < 1; 1 > n \geq m$.

Если скорость звука в первой и второй среде одинакова ($n = 1$), то коэффициент отражения не зависит от угла падения:

$$r = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}. \quad (5.33)$$

Если скорость звука во второй среде гораздо меньше, чем в первой ($c_2 \ll c_1$), то $\sin \varphi_2 \approx 0$ и, следовательно, $\varphi_2 \approx 0$. Это означает, что независимо от угла падения звуковой волны на границу раздела, во второй среде волны распространяются только в направлении нормали к границе. Такой случай реализуется, например, при падении звуковой волны из воздуха на поверхность пористого звукопоглощающего материала. В этом случае коэффициент отражения при наклонном падении равен:

$$r = \frac{R \cos \varphi_1 / \rho_0 c - 1}{R \cos \varphi_1 / \rho_0 c + 1} = \frac{R_1 \cos \varphi_1 - 1}{R_1 \cos \varphi_1 + 1}, \quad (5.34)$$

где $R = \rho_2 c_2$ – волновое сопротивление материала, $R_1 = R / \rho_0 c$ – волновое сопротивление, выраженное в долях волнового сопротивления воздуха, или безразмерное волновое сопротивление (импеданс) материала.

Если импеданс границы, на которую падает звуковая волна из воздуха, комплексный ($Z_1 = \frac{Z}{\rho_0 c} = R_1 + iY_1$), то коэффициент отражения также является комплексным числом:

$$r = \frac{Z_1 \cos \varphi_1 - 1}{Z_1 \cos \varphi_1 + 1}. \quad (5.35)$$

Коэффициент звукопоглощения при наклонном падении:

$$\alpha = 1 - |r|^2 = \frac{4R_1 \cos \varphi_1}{(R_1 \cos \varphi_1 + 1)^2 + Y_1^2 \cos^2 \varphi_1}. \quad (5.36)$$

Примерный вид угловой зависимости α представлен на рисунке 5.3.

Кривая *a* соответствует $R_1 \rightarrow 1$, $Y_1 \rightarrow 0$, кривая *б* – другим значениям импеданса поверхности.

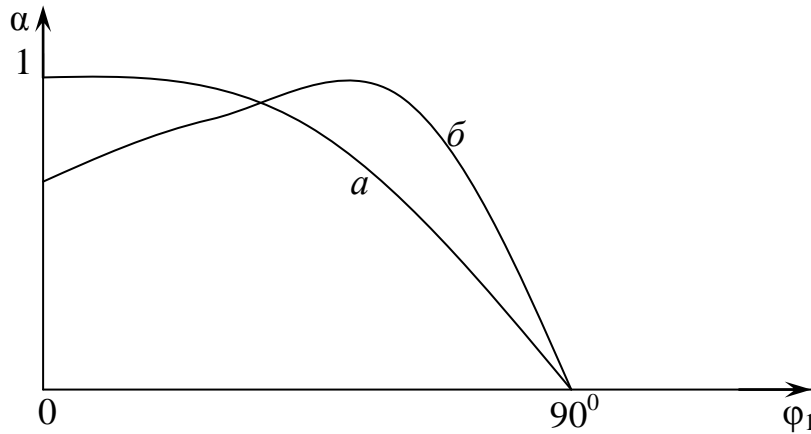


Рисунок 5.3 – Угловая зависимость коэффициента звукопоглощения

5.3 Прохождение звуковой волны через плоский слой материала

Пусть звуковая волна, распространяющаяся в среде с волновым сопротивлением $\rho_1 c_1$, проходит через плоский слой материала с волновым сопротивлением $\rho_2 c_2$ (рисунок 5.4). Толщину слоя обозначим d . Такая ситуация реализуется, например, при прохождении звуковой волны через перегородку или перекрытие, изготовленные из однородного материала.

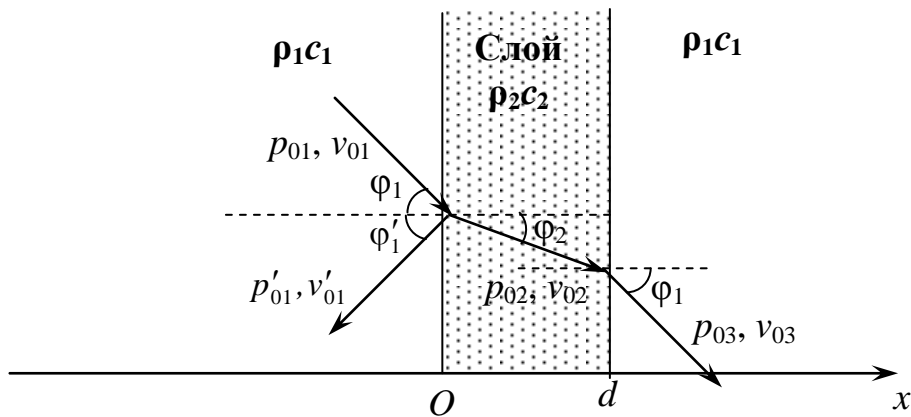


Рисунок 5.4 – Прохождение звуковой волны через слой материала

Используем те же граничные условия, что и в случае падения плоской звуковой волны на границу двух сред (см. (5.5) и (5.6)). Применив эти условия при $x = 0$ и при $x = d$, можно получить выражения для коэффициента отражения и коэффициента прохождения:

$$r = \frac{p'_{01}}{p_{01}} = \frac{\delta^{-1} - \delta}{\sqrt{(\delta^{-1} + \delta)^2 + 4ctg^2 a_2 d}}, \quad (5.37)$$

$$t = \frac{P_{03}}{P_{01}} = \frac{2}{\sqrt{(\delta^{-1} + \delta)^2 \sin^2 a_2 d + 4 \cos^2 a_2 d}}, \quad (5.38)$$

где $a_2 = k_2 \cos \varphi_2$, $\delta = \frac{\rho_2 c_2 / \cos \varphi_2}{\rho_1 c_1 / \cos \varphi_1}$.

Проанализируем полученные формулы.

При $\delta = 1$ (согласование волновых сопротивлений) получается, что $r = 0$, $t = 1$, то есть звуковая волна беспрепятственно проходит через слой.

Кроме того, полное прохождение будет наблюдаться при $\operatorname{ctg} a_2 d \rightarrow \infty$, то есть при $a_2 d = \pi n$ или $d = \frac{n \lambda_2}{2 \cos \varphi_2}$. При этом на толщине слоя укладывается

целое число полуволн ($\lambda_2 = c_2/f$ - длина звуковой волны в материале слоя).

Для тонкого по сравнению с длиной волны слоя ($a_2 d \ll 1$) выражение (5.37) можно упростить:

$$r \approx \frac{a_2 d}{2} (\delta^{-1} - \delta) = \frac{df \cos \varphi_2}{2 c_2} (\delta^{-1} - \delta). \quad (5.39)$$

Таким образом, при заданном угле падения коэффициент отражения от тонкого слоя прямо пропорционален частоте звука.

При нормальном падении звуковой волны на слой коэффициент прохождения звука равен:

$$t = \frac{P_{03}}{P_{01}} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2} + \frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1} \right)^2 \sin^2 k_2 d + 4 \cos^2 k_2 d}}. \quad (5.40)$$

Для тонкого (по сравнению с длиной волны) слоя плотного материала ($k_2 d \ll 1$, $\rho_2 c_2 \gg \rho_1 c_1$)

$$\frac{1}{t} \approx \sqrt{1 + \frac{1}{4} \left(\frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1} \right)^2 \frac{d^2 \omega^2}{c^2}} = \sqrt{1 + \left(\frac{\omega M_2}{2 \rho_1 c_1} \right)^2}, \quad (5.41)$$

где $M_2 = \rho_2 d$ – масса 1 м² слоя.

Величина, равная отношению интенсивности падающей волны к интенсивности прошедшей через слой волны, называется **коэффициентом звукоизоляции**:

$$\eta = \frac{I_1}{I_3} = \frac{1}{t^2}. \quad (5.42)$$

При нормальном падении коэффициент звукоизоляции равен:

$$\eta = \frac{1}{4} \left(\frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2} + \frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1} \right)^2 \sin^2 k_2 d + \cos^2 k_2 d \quad (5.43)$$

При выполнении условий $k_2 d \ll 1$ и $\rho_2 c_2 \gg \rho_1 c_1$

$$\eta \approx 1 + \left(\frac{\omega M_2}{2\rho_1 c_1} \right)^2 = 1 + \left(\frac{\pi \rho_2 d f}{\rho_1 c_1} \right)^2. \quad (5.44)$$

Из выражения (5.44) хорошо видно, что коэффициент звукоизоляции возрастает при увеличении плотности материала и толщины слоя, а также при возрастании частоты звука.

На практике часто используется величина $R_{из}$ (дБ), которая называется **звукоизоляцией** слоя (перегородки, перекрытия и т.д.).

$$R_{из} = 10 \lg \eta. \quad (5.45)$$

Эта величина показывает, на сколько децибел уменьшается уровень звука при прохождении через слой материала. Примерный вид частотной зависимости $R_{из}$ (дБ) приведен на рисунке 5.5.

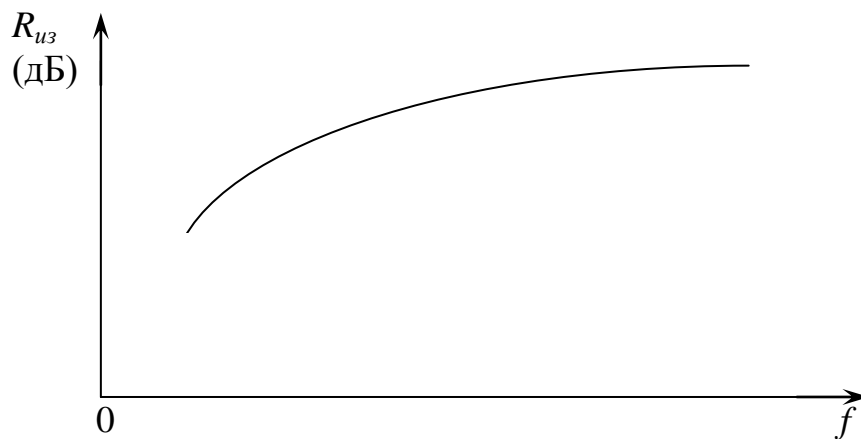


Рисунок 5.5 – Зависимость звукоизоляции слоя от частоты звука

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЗВУКОВОГО ПОЛЯ В ПОМЕЩЕНИИ

Звуковые поля в закрытом помещении и свободном пространстве существенно отличаются. В свободном пространстве звуковое поле представляет собой бегущие волны с той или иной формой волнового фронта в зависимости от формы и размеров излучающей поверхности источника звука. Вдали от источника средняя плотность звуковой энергии прямо пропорциональна мощности излучения источника и убывает обратно пропорционально квадрату расстояния.

В помещении звуковое поле представляет собой систему стоячих волн, образованных в результате наложения волн, излучаемых источником звука (*прямой звук*), и волн, отраженных от стен, пола, потолка и различных объектов, находящихся в помещении. Таким образом, звуковое поле в помещении определяется не только свойствами источника звука и удалением от него, но также геометрическими размерами, формой помещения и способностью поверхностей помещения поглощать акустическую энергию.

Волновой метод расчета звукового поля в помещении, основанный на решении волнового уравнения (уравнения Гельмгольца) с определенными граничными условиями, позволяет найти спектр собственных (резонансных) частот помещения, зависящих от его формы и размеров. Каждой из этих частот соответствует собственное колебание воздуха в объеме помещения. При небольших коэффициентах звукопоглощения поверхностей помещения это колебание представляет собой стоячую волну, волновой вектор которой определенным образом ориентирован в пространстве. В зависимости от частотного спектра колебаний источника звука, работающего в помещении, возбуждаются те или иные собственные колебания с близкими по значению частотами.

В низкочастотной области собственные частоты помещения значительно отличаются по величине (дискретный спектр). Это приводит к тому, что в этой области наблюдаются ярко выраженные резонансные явления и звуковое поле является сильно неоднородным.

С ростом частоты количество собственных частот в заданном интервале быстро увеличивается (спектр уплотняется) и, если размеры помещения во много раз превосходят длину звуковой волны, спектр фактически становится сплошным. Практически это означает, что любая составляющая в спектре источника звука будет возбуждать сразу большое количество собственных колебаний с близкими по значению частотами. В этом случае неоднородность поля сглаживается, волновые эффекты (например, интерференцию) можно не учитывать и для расчета звукового поля используются **методы статистической акустики**.

6 ВОЛНОВОЙ МЕТОД РАСЧЕТА ЗВУКОВОГО ПОЛЯ В ЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ

6.1 Постановка задачи

В результате многократного отражения звуковых волн от границ помещения возникает замкнутое трехмерное волновое поле. Обычно линейные размеры помещения значительно больше длины звуковых волн, поэтому замкнутый объем помещения представляет собой колебательную систему со спектром собственных частот, зависящим, в первую очередь, от формы и размеров помещения. Теория волновой акустики рассматривает два режима колебаний воздушного объема помещения: собственные затухающие колебания или вынужденные колебания (под действием источника звука).

Рассмотрим задачу о колебаниях воздуха, заполняющего объем помещения в предположении, что помещение имеет форму прямоугольного параллелепипеда размерами $l \times b \times h$ с жесткими поверхностями, полностью отражающими звук (рисунок 6.1).

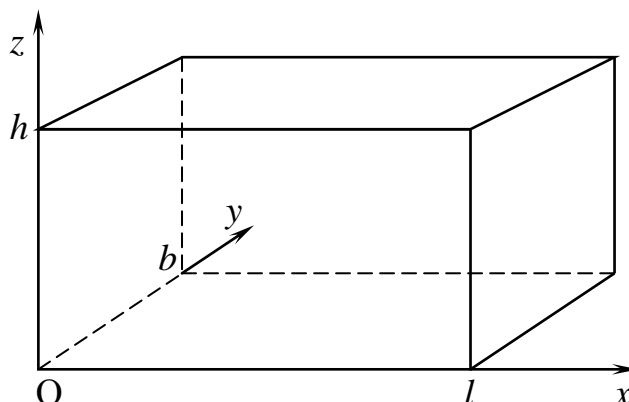


Рисунок 6.1 – Замкнутый объем

Волновое уравнение в декартовых координатах имеет вид:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}, \quad (6.1)$$

где $p(x, y, z, t)$ – звуковое давление, c – скорость звука.

С учетом того, что $p(x, y, z, t) = p(x, y, z)e^{i\omega t}$, волновое уравнение (6.1) переходит в уравнение Гельмгольца:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + k^2 p = 0, \quad (6.2)$$

в котором $p = p(x, y, z)$ – координатная часть звукового давления, $k = \frac{\omega}{c}$ – волновое число звуковой волны.

На жестких поверхностях, ограничивающих объем помещения, составляющие колебательной скорости, нормальные к поверхности, должны обращаться в нуль:

$$v_x \Big|_{x=0,l} = 0, \quad v_y \Big|_{y=0,b} = 0, \quad v_z \Big|_{z=0,h} = 0. \quad (6.3)$$

Для звукового давления граничные условия (6.3) принимают форму:

$$\frac{\partial p}{\partial x} \Big|_{x=0,l} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial y} \Big|_{y=0,b} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial z} \Big|_{z=0,h} = 0. \quad (6.4)$$

6.2 Собственные колебания и собственные частоты прямоугольного объема

Общее решение уравнения Гельмгольца (6.2) с граничными условиями (6.4) равно сумме частных решений, имеющих вид:

$$p_{mnp} = A_{mnp} \cos \frac{m\pi x}{l} \cos \frac{n\pi y}{b} \cos \frac{p\pi z}{h}, \quad (6.5)$$

где $m, n, p = 0, 1, 2, 3 \dots$

Функции (6.5) называются характеристическими или **собственными функциями** уравнения (6.2). Каждой собственной функции соответствует **собственное значение** параметра k :

$$k_{mnp} = \sqrt{k_m^2 + k_n^2 + k_p^2} = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{l}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{h}\right)^2}. \quad (6.6)$$

Так как величина $k = \frac{\omega}{c}$ представляет собой волновое число, то в прямоугольном помещении с жесткими стенками существует набор **собственных (резонансных) частот**:

$$f_{mnp} = \frac{\omega_{mnp}}{2\pi} = \frac{c}{2\pi} k_{mnp} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{l}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{h}\right)^2}. \quad (6.7)$$

Собственное колебание p_{mnp} , описываемое функцией (6.5), с частотой f_{mnp} принято называть **модой** (m, n, p). Физически каждая мода представляет собой стоячую плоскую волну с волновым вектором \vec{k}_{mnp} , проекции которого на оси координат равны:

$$k_x = k_m = \frac{m\pi}{l}, \quad k_y = k_n = \frac{n\pi}{b}, \quad k_z = k_p = \frac{p\pi}{h}. \quad (6.8)$$

Так как волновой вектор перпендикулярен волновой поверхности, направление, вдоль которого устанавливается каждая из стоячих волн p_{mnp} , образует с осями координат углы α , β и γ , величина которых определяется соотношениями:

$$\begin{aligned} \cos \alpha &= \frac{k_m}{k_{mnp}} = \frac{\frac{m}{l}}{\sqrt{\left(\frac{m}{l}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{h}\right)^2}}, \\ \cos \beta &= \frac{k_n}{k_{mnp}} = \frac{\frac{n}{b}}{\sqrt{\left(\frac{m}{l}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{h}\right)^2}}, \\ \cos \gamma &= \frac{k_p}{k_{mnp}} = \frac{\frac{p}{h}}{\sqrt{\left(\frac{m}{l}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{h}\right)^2}}. \end{aligned} \quad (6.9)$$

Очевидно, что $\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1$.

6.3 Классификация собственных колебаний замкнутого объема

В зависимости от ориентации волнового вектора \vec{k}_{mnp} все моды собственных колебаний можно разделить на три группы: осевые, кососкользющие и косые.

Осевыми называются моды, для которых волновой вектор направлен параллельно одному из ребер прямоугольного помещения (рисунок 6.2). Существуют три вида осевых мод:

- ***x*-осевые** ($\alpha = 0, \beta = \gamma = 90^\circ$) с частотами $f_{m00} = \frac{c}{2l} m$,
- ***y*-осевые** ($\beta = 0, \alpha = \gamma = 90^\circ$) с частотами $f_{0n0} = \frac{c}{2b} n$,
- ***z*-осевые** ($\gamma = 0, \alpha = \beta = 90^\circ$) с частотами $f_{00p} = \frac{c}{2h} p$.

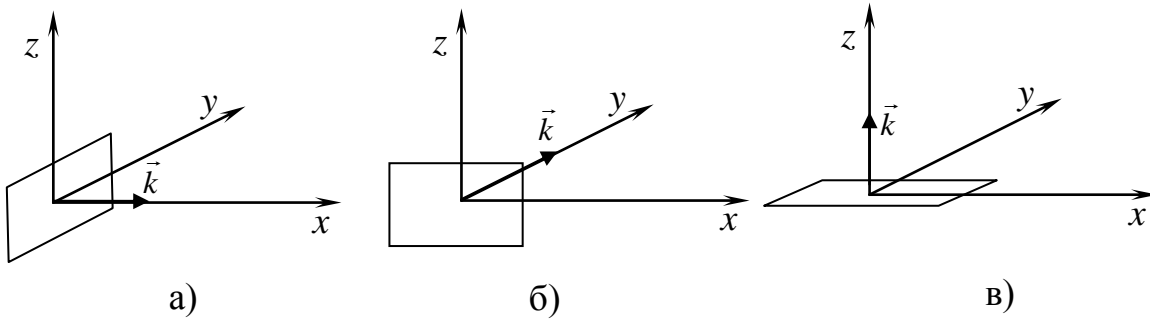


Рисунок 6.2 – Осевые моды: а) x -осевые, б) y -осевые, в) z -осевые

Скользящими (касательными) называют моды, для которых волновой вектор направлен параллельно одной из координатных плоскостей (рисунок 6.3). Можно выделить:

- **x y -касательные моды** ($\alpha \neq 0, \beta \neq 0, \gamma = 90^\circ$) с частотами $f_{m0} = \sqrt{f_{m00}^2 + f_{0n0}^2}$;
- **xz -касательные моды** ($\alpha \neq 0, \gamma \neq 0, \beta = 90^\circ$) с частотами $f_{m0p} = \sqrt{f_{m00}^2 + f_{00p}^2}$;
- **yz -касательные моды** ($\gamma \neq 0, \beta \neq 0, \alpha = 90^\circ$) с частотами $f_{0np} = \sqrt{f_{0n0}^2 + f_{00p}^2}$.

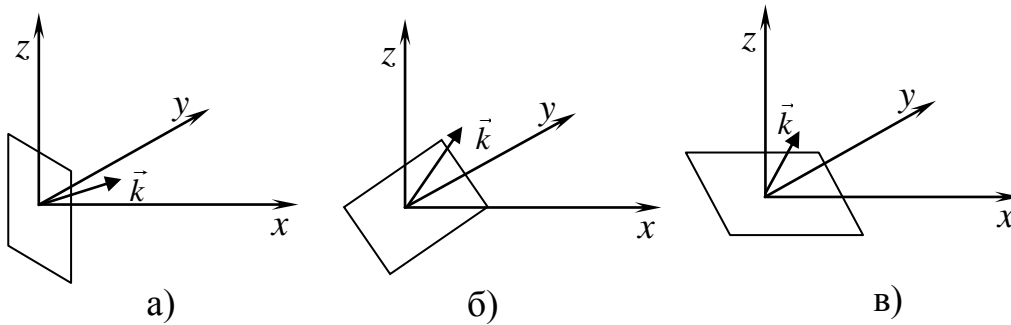


Рисунок 6.3 – Скользящие моды:
а) x y -касательные, б) xz -касательные,
в) yz -касательные

Косые моды имеют волновой вектор, у которого ни одна из компонент не обращается в нуль: $\alpha \neq 0, \beta \neq 0, \gamma \neq 0$ (рисунок 6.4). Частоты косых мод могут быть найдены по формуле $f_{mnp} = \sqrt{f_{m00}^2 + f_{0n0}^2 + f_{00p}^2}$.

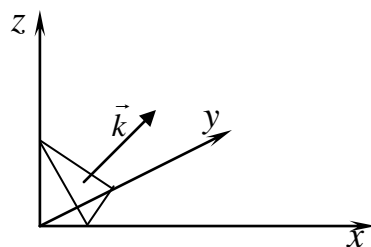


Рисунок 6.4 – Косая мода

6.4 Особенности спектра собственных частот колебаний замкнутого объема

Используя формулу (6.7) можно для конкретного помещения рассчитать все собственные частоты, лежащие в заданном интервале значений. При этом некоторые собственные частоты могут оказаться **вырожденными**, то есть одному значению частоты может соответствовать несколько (N) различных собственных колебаний (мод). Количество собственных частот, попадающих в заданный интервал, зависит от ширины интервала и от размеров помещения. Чем больше объем помещения, тем больше собственных частот попадает в заданный интервал.

Спектр собственных частот можно представить графически (рисунок 6.5).

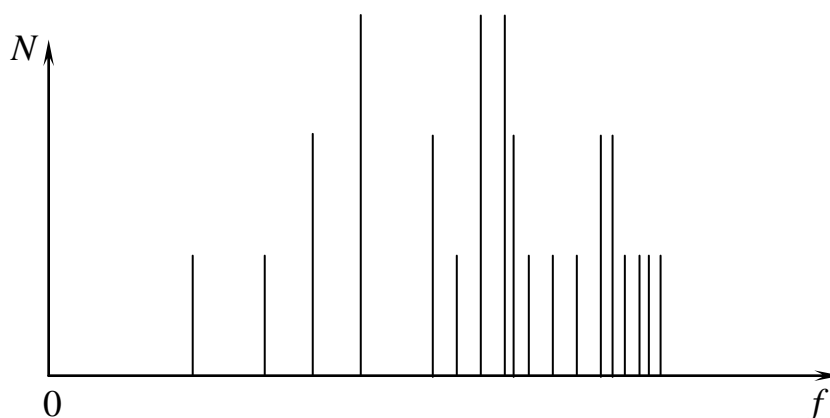


Рисунок 6.5 – Примерный вид спектра собственных частот помещения (N – степень вырождения частоты)

Расчеты показывают, что в области низких частот спектр имеет выраженный дискретный характер. Это приводит к тому, что в этой области наблюдаются ярко выраженные резонансные явления и звуковое поле является сильно неоднородным.

С ростом частоты количество собственных частот в заданном интервале быстро увеличивается (спектр уплотняется) и, если размеры помещения не очень малы, в области наилучшей слышимости спектр фактически становится сплошным. Практически это означает, что любая составляющая в спектре источника звука будет возбуждать сразу большое количество собственных колебаний с близкими по значению частотами. В таких ситуациях расчет звукового поля с использованием волновой теории становится очень громоздким. В этой области частот удобнее использовать методы статистической акустики.

7 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ СТАТИСТИЧЕСКОЙ АКУСТИКИ ДЛЯ РАСЧЕТА ЗВУКОВОГО ПОЛЯ В ПОМЕЩЕНИИ

7.1 Диффузное звуковое поле и его основные характеристики

Условие применимости методов статистической акустики может быть записано в виде:

$$\lambda_{cp} < \frac{l_{min}}{3}, \text{ или, что то же самое } f_{cp} > \frac{1000}{l_{min}},$$

где l_{min} – наименьший линейный размер помещения, f_{cp} и λ_{cp} – средняя частота источника звука и, соответственно, средняя длина звуковой волны. При выполнении условия (6.10) звуковое поле в помещении приближается по своим свойствам к диффузному.

Если помещение не содержит фокусирующих сводов, его размеры значительно больше, чем средняя длина звуковой волны, а поверхности помещения обладают небольшими коэффициентами звукопоглощения, то через произвольный элемент объема помещения при непрерывной работе источника звука в каждый момент времени будет проходить большое количество прямых и отраженных звуковых волн. В результате этого средняя плотность звуковой энергии по всему помещению будет одинакова (*поле однородное*), а все направления потоков энергии этих волн равновероятны (*поле изотропное*). Однородное и изотропное звуковое поле называется *диффузным*. Следует отметить, что в диффузном поле все собственные колебания некогерентны, поэтому в нем отсутствуют явления интерференции.

Диффузное поле представляет собой некоторый идеализированный объект (модель). Реальные звуковые поля могут по своим свойствам только приближенно соответствовать этой модели. Мерой количественной оценки этого соответствия является индекс диффузности поля. Эта величина может быть определена экспериментально. Для этого в помещении возбуждают звуковой сигнал переменной частоты и в исследуемой точке помещают микрофон с острой характеристикой направленности. Сигналы, принятые микрофоном при его ориентации в пределах изменения телесного угла от 0 до 4π , усредняют по всем направлениям. Средняя интенсивность звука равна

$$\bar{I} = \frac{1}{n} \sum_i^n I_i,$$

где I_i – интенсивность, измеренная по данному направлению, n – число отдельных измерений. Абсолютное отклонение от среднего значения:

$$\Delta I_i = I_i - \bar{I},$$

а среднее абсолютное отклонение:

$$\Delta \bar{I} = \frac{1}{n} \sum_i^n \Delta I_i.$$

Относительное отклонение интенсивности, усредненное по всем направлениям, равно:

$$m = \frac{\Delta \bar{I}}{\bar{I}}.$$

Индекс диффузности звукового поля в помещении равен

$$i_d = 1 - \frac{m}{m_0},$$

где m_0 – относительное отклонение интенсивности от среднего, измеренное в **заглушенной камере**, то есть в помещении с поверхностями, полностью поглощающими звук. При полной заглушенности помещения ($m = m_0$) индекс диффузности равен нулю. Наоборот, если $m = 0$, то индекс диффузности равен единице и поле абсолютно диффузное.

Проведенные измерения дают для большего числа помещений среднее значение индекса диффузности примерно 0,6-0,7. С увеличением объема помещения ($V > 10000 \text{ м}^3$) i_d уменьшается. Степень диффузности поля можно повысить с помощью установки звукорассеивающих экранов, колонн и других элементов.

7.2 Решение задачи о расчете плотности энергии звукового поля в помещении

Основной характеристикой диффузного звукового поля является **плотность энергии** звуковых колебаний ϵ , численно равная энергии колебаний в единице объема. Вместо интенсивности звука для акустического поля в помещении используют поток звуковой мощности, падающей на единицу площади во всех направлениях полупространства. Эту величину называют **удельной мощностью облучения границ** I . Можно показать, что в диффузном поле эта величина связана со скоростью звука c и плотностью звуковой энергии ϵ соотношением:

$$I = \frac{c\epsilon}{4}. \quad (7.1)$$

С точки зрения статистической акустики основными характеристиками помещения являются:

- объем V , м³;
- общая площадь всех поверхностей помещения $S_{общ}$, м²;
- α_i – коэффициент звукопоглощения каждой из поверхностей (зависит от физической природы покрытия и от частоты звука);
- $A_i = \alpha_i S_i$ – **эквивалентная (или эффективная) площадь звукопоглощения** данной поверхности, м². Эта величина численно равна площади поверхности идеального звукопоглотителя, которая поглощала бы такое же количество звуковой энергии, что и данная поверхность;
- $A_{общ} = \sum A_i = \sum \alpha_i S_i$ – эквивалентная площадь звукопоглощения всех поверхностей помещения;
- $\alpha_{ср} = A_{общ} / S_{общ}$ – средний коэффициент звукопоглощения поверхностей помещения.

Рассмотрим случай, когда в тихом помещении в некоторый момент времени, который мы примем за начальный ($t = 0$), начинает работать источник звука постоянной мощности W . Если процессы излучения и поглощения звука происходят непрерывно, то изменение плотности звуковой энергии в помещении описывается дифференциальным уравнением

$$V \frac{d\varepsilon}{dt} = W - IA_{общ}, \quad (7.2)$$

где W – мощность звуковых колебаний, излучаемая источником звука, а $IA_{общ}$ – мощность, поглощаемая поверхностями помещения.

Так как в диффузном поле удельная мощность облучения границ I связана с ε соотношением (7.1), то

$$IA_{общ} = \frac{1}{4} c \varepsilon A_{общ} = \frac{1}{4} c \varepsilon \alpha_{ср} S_{общ}. \quad (7.3)$$

С учетом этого уравнение (7.2) можно записать в виде:

$$V \frac{d\varepsilon}{dt} = W - \frac{1}{4} c \varepsilon \alpha_{ср} S_{общ}. \quad (7.4)$$

Решение дифференциального уравнения (7.4) имеет вид:

$$\varepsilon = \frac{4W}{c \alpha_{ср} S_{общ}} \left[1 - \exp\left(-\frac{c S_{общ}}{4V} \ln(1 - \alpha_{ср}) t \right) \right]. \quad (7.5)$$

Эта формула характеризует **процесс установления звукового поля** (нарастания плотности звуковой энергии) в помещении. Этот процесс будет происходить до тех пор, пока мощность источника звука W не станет равна мощности потерь звуковой энергии, обусловленной поглощением звука поверхностями помещения $IA_{\text{общ}}$. При этом плотность энергии звуковых колебаний:

$$\varepsilon \rightarrow \varepsilon_0 = \frac{4W}{c\alpha_{\text{ср}}S_{\text{общ}}} = \frac{4W}{cA_{\text{общ}}}. \quad (7.6)$$

С этого момента ($t=t_{\text{уст}}$) до момента прекращения действия источника звука ($t=t_{\text{выкл}}$) плотность звуковой энергии в помещении остается постоянной и равной ε_0 . Такой режим называется **стационарным**.

В стационарном режиме уровень звука в децибелах равен

$$L = 10 \lg \frac{I}{I_0} = L_W - 10 \lg A_{\text{общ}} + 6, \quad (7.7)$$

где L_W – уровень мощности источника в децибелах.

После прекращения действия источника звука звуковое поле в помещении постепенно затухает. Этот процесс называется **реверберацией**. Дифференциальное уравнение (7.4) в момент выключения источника ($W = 0$) принимает вид:

$$V \frac{d\varepsilon}{dt} = -\frac{1}{4} c \varepsilon \alpha_{\text{ср}} S_{\text{общ}}. \quad (7.8)$$

Решение этого уравнения, описывающее постепенное уменьшение плотности звуковой энергии:

$$\varepsilon = \frac{4W}{c\alpha_{\text{ср}}S_{\text{общ}}} \exp\left(-\frac{cS_{\text{общ}}}{4V} \ln(1 - \alpha_{\text{ср}})(t - t_{\text{выкл}})\right). \quad (7.9)$$

На рисунке 7.1 изображен график временной зависимости плотности энергии звуковых колебаний в помещении.

Область I соответствует процессу установления звукового поля, область II – стационарному режиму, область III – процессу реверберации.

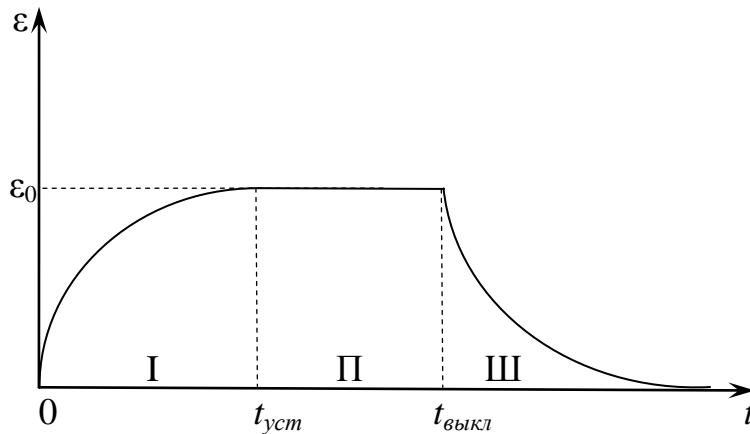


Рисунок 7.1 - Изменение плотности энергии звуковых колебаний с течением времени

В качестве основной характеристики процесса затухания звукового поля в помещении принято время, в течение которого плотность звуковой энергии после выключения источника уменьшается в 10^6 раз (или на 60 дБ). Эта величина называется **временем реверберации** помещения T , с.

По определению:

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \exp\left(\frac{cS_{общ}}{4V} \ln(1 - \alpha_{cp}) T\right) = 10^{-6}. \quad (7.10)$$

Отсюда для времени реверберации получаем:

$$T = \frac{0,163V}{-S_{общ} \ln(1 - \alpha_{cp})}. \quad (7.11)$$

Формула (7.11) получила название **формулы Эйринга**.

При небольших коэффициентах звукопоглощения ($\alpha < 0,2$) можно использовать приближенное выражение

$$T = \frac{0,163V}{\alpha_{cp} S_{общ}} = \frac{0,163V}{A_{общ}}, \quad (7.12)$$

которое называется **формулой Сэбина**.

7.3 Время реверберации как характеристика акустических качеств помещения

Из формулы (7.12) видно, что время реверберации зависит от отношения объема помещения к эквивалентной площади звукопоглощения в этом помещении.

В помещениях большого объема с поверхностями, обладающими невысокими коэффициентами звукопоглощения, время реверберации велико. Такие помещения называются *гулкими*. Небольшие помещения с хорошо поглощающими звук поверхностями характеризуются малым временем реверберации и называются *заглушенными*. Таким образом, изменяя отношение $A_{общ}$ к V , можно построить зал с тем или иным временем реверберации.

Выбор времени реверберации во многом определяется субъективным восприятием процессов нарастания и спадания уровня звука. Например, если время реверберации большое, то остаточный звук может перекрыть последующие элементы звучания, что ухудшает разборчивость речи. При малом времени реверберации звуковой сигнал воспринимается четко, но без своеобразной фоновой окраски, а это обедняет звучание музыки и снижает ее эмоциональное воздействие. Ясно, что оптимальное значение времени реверберации зависит от назначения залов. Рекомендуемые значения времени реверберации помещений различного назначения (объемом до 2000 м^3) приведены в таблице 7.1.

Таблица 7.1 – Оптимальные значения времени реверберации

Тип помещения	$T_{опт}, \text{с}$		
	Низкие частоты ($f < 200 \text{ Гц}$)	Средние частоты ($200 \leq f \leq 1500 \text{ Гц}$)	Высокие частоты ($f > 1500 \text{ Гц}$)
Речевые (классы, аудитории, лекционные залы)	0,3 – 0,5	0,4 – 0,5	0,3 – 0,5
Музыкальные студии и залы	1,6 – 2,0	1,65 – 1,8	0,5 – 1,0
Помещения общего назначения	0,5 – 1,0	0,8 – 1,0	0,5 – 1,0

На рисунке 7.2 показана зависимость рекомендуемых значений времени реверберации от объема помещения.

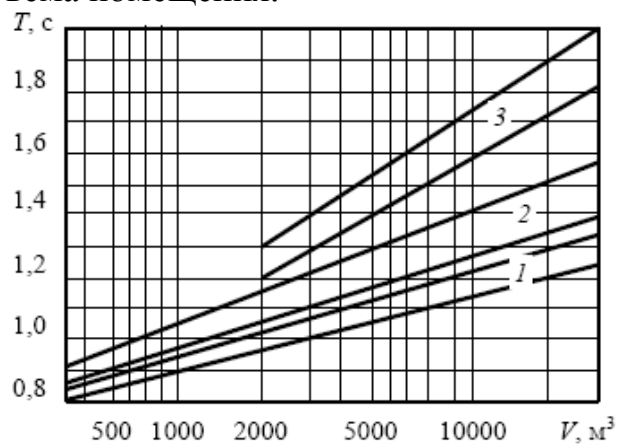


Рисунок 7.2 - Рекомендуемое время реверберации для залов различного назначения в диапазоне частот от 500 до 2000 Гц: 1 – лекционные аудитории, пассажирские помещения вокзалов; 2 – драматические театры, залы многоцелевого назначения средней вместимости, кинотеатры; 3 – театры оперы и балета, концертные залы

7.4 Расчет уровня звука в помещении

7.4.1 Учет прямого и отраженного звука

В разделе 7.2 было показано, что в диффузном поле в стационарном режиме плотность звуковой энергии равна (7.1):

$$\varepsilon = \varepsilon_0 = \frac{4W}{cA_{\text{общ}}}.$$

Интенсивность звука равна соответственно:

$$I = \varepsilon c = \frac{4W}{A_{\text{общ}}},$$

а уровень звука:

$$L = 10 \lg \frac{I}{I_0} = L_w - 10 \lg A_{\text{общ}} + 6.$$

Однако в общем случае в звуковом поле можно выделить две составляющие – прямой и отраженный звук:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{пр}} + \varepsilon_{\text{отр}}. \quad (7.13)$$

Если источник звука находится в объеме помещения и излучает сферическую звуковую волну, то

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{W}{4\pi r^2 c}, \quad (7.14)$$

где W – мощность источника, а r – расстояние от источника звука до расчетной точки.

После отражения часть звуковой энергии поглощается:

$$\varepsilon_{\text{отр}} = \frac{4W}{cA_{\text{общ}}} (1 - \alpha_{\text{ср}}) = \frac{4W}{cB}. \quad (7.15)$$

Величина $B = \frac{A_{\text{общ}}}{(1 - \alpha_{\text{ср}})}$ называется **постоянной помещения**.

Подставляя (7.14) и (7.15) в (7.13), получаем для общей плотности звуковой энергии в произвольно выбранной расчетной точке:

$$\varepsilon = \frac{W}{4\pi r^2 c} + \frac{4W}{cB}. \quad (7.16)$$

Степень диффузности поля в конкретной выбранной точке характеризуют *акустическим отношением*:

$$M = \frac{\varepsilon_{\text{отр}}}{\varepsilon_{\text{пр}}} = \frac{16\pi r^2}{B} \approx \frac{50r^2}{B}. \quad (7.17)$$

Область звукового поля, в которой $M < 1$, называется *зоной прямого звука*, область с $M > 1$ – *зона прямого звука*. Граница между ними определяется *предельным радиусом*:

$$r_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{B}{50}}. \quad (7.18)$$

Если расстояние от источника звука до приемника меньше $r_{\text{пр}}$ (зона прямого звука), то воспринимаемый звуковой сигнал определяется в основном свойствами источника звука, а не свойствами помещения. Если же $r \gg r_{\text{пр}}$, то воспринимаемый звук в большей степени зависит от акустических характеристик помещения, в частности, от постоянной B .

7.4.2 Приближенная оценка постоянной помещения

Для расчета постоянной помещения нужно определить эквивалентную площадь звукопоглощения для данного помещения $A_{\text{общ}}$ и средний коэффициент звукопоглощения поверхностей помещения $\alpha_{\text{ср}} = A_{\text{общ}} / S_{\text{общ}}$ (см. раздел 7.2). При этом требуется знать площадь каждого однородного участка поверхности, ограничивающей помещение, коэффициенты звукопоглощения этих участков на различных частотах, учесть наличие различных объектов, поглощающих и рассеивающих звук (колонн, экранов, мебели, людей и так далее). На этапе проектирования или предварительной оценки это не всегда представляется возможным. В этом случае для оценки B используют приближенную формулу:

$$B = B_{1000} \mu,$$

где B_{1000} – постоянная помещения (в м^2) на частоте 1000 Гц, μ – частотный множитель. Величина B_{1000} определяется в зависимости от типа помещения и его объема V по таблице 7.2. Значения множителя μ определяют с помощью таблицы 7.3.

Таблица 7.2 – Определение значения B_{1000}

Тип помещения	Описание помещения	$B_{1000}, \text{м}^2$
1.	С небольшим количеством людей	$V/20$
2.	С жесткой мебелью и большим количеством людей или мягкой мебелью и небольшим количеством людей	$V/10$
3.	С большим количеством людей и мягкой мебелью	$V/6$
4.	Помещения со звукопоглощающей облицовкой потолка и части стен	$V/1,5$

Таблица 7.3 – Значения частотного множителя μ для среднегеометрических частот октавных полос

$V, \text{м}^3$	μ							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$V < 200$	0,8	0,75	0,7	0,8	1	1,4	1,8	2,5
$V = 200 \div 1000$	0,65	0,62	0,64	0,75	1	1,5	2,4	4,2
$V > 1000$	0,5	0,5	0,55	0,7	1	1,6	3	6

7.4.3 Учет расположения и характеристики направленности источника звука

Выражение (7.14) для расчета плотности звуковой энергии прямого звука справедливо только для точечного источника звука, расположенного в объеме помещения. В общем случае:

$$\varepsilon_{np} = \frac{\chi \Phi W}{\Omega r^2 c}. \quad (7.19)$$

Здесь Φ – характеристика направленности излучения источника:

$$\Phi = \frac{I}{I_{сф}},$$

где I – интенсивность излучения источника в данном направлении, $I_{сф} = \frac{W}{4\pi r^2}$ – интенсивность сферической звуковой волны. Если источник одинаково излучает по всем направлениям, $\Phi = 1$.

Коэффициент χ в (7.19) учитывает влияние формы и размеров источника звука на звуковое поле в непосредственной близости от него (в ближнем звуковом поле). На рисунке 7.3 приведен график зависимости коэффициента χ от r/l_{\max} (r – расстояние до акустического или геометрического центра тела,

излучающего звук, $l_{\text{макс}}$ – максимальные габаритные размеры источника звука). Из графика видно, что при $r/l_{\text{макс}} > 2$ $\chi = 1$.

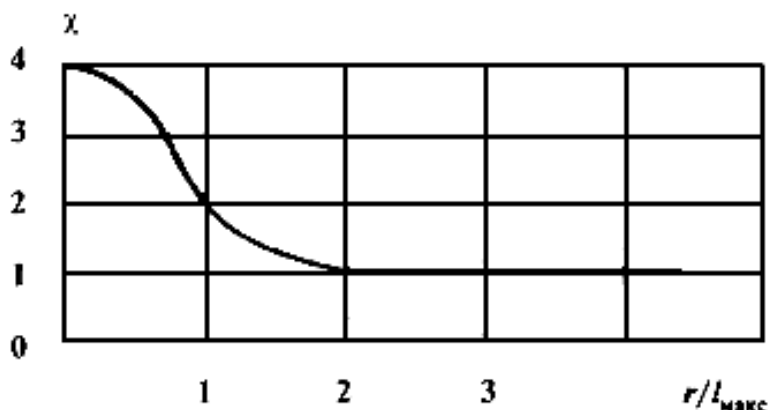


Рисунок 7.3 - График для определения коэффициента χ в зависимости от $r/l_{\text{макс}}$

Величина Ω в выражении (7.19) равна телесному (пространственному) углу, в который излучается звуковая энергия. Для источника, расположенного в объеме помещения, $\Omega = 4\pi$. Если источник звука находится на поверхности пола, стены или потолка, $\Omega = 2\pi$. При расположении источника в двугранном углу $\Omega = \pi$, в трехгранном углу - $\Omega = \pi/2$.

С учетом (7.19) формула (7.16) для расчета плотности звуковой энергии с учетом прямого и отраженного звука принимает вид:

$$\varepsilon = \frac{\chi \Phi W}{\Omega r^2 c} + \frac{4W}{cB}. \quad (7.20)$$

Уровень звука в соответствии с (7.20) равен:

$$L = 10 \lg \frac{I}{I_0} = L_w + 10 \lg \left(\frac{\chi \Phi}{\Omega r^2} + \frac{4}{B} \right). \quad (7.21)$$

Если в помещении несколько источников звука, то уровень звука можно рассчитать по формуле:

$$L = 10 \lg \left(\sum_{i=1}^m \frac{\chi_i \Phi_i \Lambda_i}{\Omega_i r_i^2} + \frac{4}{B} \sum_{i=1}^n \Lambda_i \right), \quad (7.22)$$

где $\Lambda_i = 10^{L_i/10}$, L_i - уровень мощности каждого источника, m – количество источников звука, ближайших к расчетной точке (для которых $r_i \leq 5r_{\text{мин}}$), n – общее количество источников звука в помещении.

Приведенный порядок расчета уровня звука в произвольной точке помещения закреплен в СП (Строительные правила) 51.13330.2011 — Защита от шума.

ПРОБЛЕМЫ БОРЬБЫ С ШУМОМ

8 ИСТОЧНИКИ ШУМА

8.1 Шум. Классификация шумов

В физической акустике шум – это неупорядоченный во времени звуковой сигнал, который характеризуется сплошным или смешанным спектром. Однако если рассматривать звуковые сигналы с точки зрения их субъективной оценки, то понятие шума расширяется. Один и тот же звук, в зависимости от ситуации, одни люди воспринимают как музыку или информационный сигнал, а другие как мешающий и раздражающий шум. Внезапно сработавшая ночью автомобильная сигнализация для владельца – полезная информация, но для остальных – шум, а громкая музыка не всегда доставляет удовольствие живущим по соседству.

Любой звук, который мешает работе, отдыху, восприятию музыки, речи и других акустических сигналов, несущих полезную информацию, мы называем шумом независимо от его физических характеристик.

С санитарно-гигиенической точки зрения **шум** принято определять как звук, оцениваемый негативно и наносящий вред здоровью.

Внедрение в промышленность новых технологий, рост мощности технологического оборудования, развитие транспорта, все более широкое использование бытовой техники приводят к тому, что человек постоянно подвергается воздействию шума. Проблема борьбы с шумом является, таким образом, неотъемлемой частью охраны труда и защиты окружающей среды.

Основными источниками шума в городах и других населенных пунктах являются автомобильные потоки на улицах и дорогах, а также железнодорожный транспорт и самолеты. Шум транспорта имеет механическое и аэрогидродинамическое происхождение, импульсный характер и сложный спектральный состав.

В промышленных районах и непосредственно в цехах и мастерских существенный вклад в шумовое загрязнение окружающей среды вносит работающее оборудование, как непосредственно задействованное в производстве (станки, агрегаты), так и обслуживающее (системы энергоснабжения, вентиляции, транспорт).

Причиной возникновения шума в зданиях, в том числе и в жилых помещениях, являются как внешние источники (транспорт и промышленные предприятия), так и внутренние – инженерное и санитарно-техническое оборудование, бытовые приборы, громкая музыка, танцы и др.

В связи с многообразием источников шума встает вопрос об их классификации. Рассмотрим основные признаки, по которым можно классифицировать шумы.

Одним из основных параметров источника шума является создаваемый им *уровень шума*. Уровень звука в децибелах определяется по формуле:

$$L_I = L_p = 10 \lg \frac{I}{I_0} = 20 \lg \frac{p}{p_0},$$

где I – сила звука, p – звуковое давление, I_0 и p_0 – порог слышимости на частоте 1000 Гц ($I_0 = 10^{-12}$ Вт/м², $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па).

Чувствительность слуха, как известно, зависит от частоты звука. Для того, чтобы приблизить результаты объективных измерений к субъективному восприятию, вводят понятие скорректированного уровня шума. Коррекция заключается в том, что используются зависящие от частоты поправки к уровню соответствующей величины. Эти поправки стандартизованы в международном масштабе. Наиболее широко используется коррекция А. В соответствии с ней скорректированный уровень шума (в дБ(А)) равен:

$$L_A = L_I - \Delta L_A,$$

где ΔL_A – зависящие от частоты поправки, приведенные в таблице 8.1.

Таблица 8.1 – Поправки к уровню шума (коррекция А)

Частота, Гц	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
ΔL_A , дБ	26,3	16,1	8,6	3,2	0	-1,2	-1	1,1

Следующая характеристика шума, излучаемого данным источником – *спектр*.

Все физические величины, характеризующие звуковой сигнал, являются функцией времени, поэтому их можно представить в виде суммы гармонических колебаний с различными частотами и амплитудами. Зависимость амплитуды гармонических составляющих звуковой волны от частоты называется спектром звука (см. раздел 3.4).

Обычно для шумов характерен сплошной или смешанный широкополосный спектр. При этом в зависимости от положения максимума шумы подразделяют на **низкочастотные** ($f_{max} < 300$ Гц), **среднечастотные** ($300 \text{ Гц} < f_{max} < 800$ Гц) и **высокочастотные** ($f_{max} > 800$ Гц). Наряду с **широкополосными** шумами встречаются и **тональные** шумы, спектр которых близок к дискретному.

Рассмотрим теперь *временные характеристики шума*. По временным характеристикам шумы делят на постоянные и непостоянные.

Шум называют **постоянным**, если его уровень в течение 8 часов изменяется не более, чем на 5 дБ(А).

Все остальные шумы – **непостоянные**:

- **колеблющиеся во времени** (уровень звука непрерывно изменяется с течением времени);

- **прерывистые** (уровень звука изменяется ступенчато на 5 дБ(А) и более, причем длительность интервалов, в течение которых уровень звука остается постоянным, составляет одну секунду и более);

- **импульсные**, состоящие из одного или нескольких сигналов, каждый длительностью менее одной секунды.

Для оценки уровня непостоянных шумов используется так называемый эквивалентный уровень звука. **Эквивалентный уровень звука** данного непостоянного шума численно равен уровню звука постоянного, широкополосного, неимпульсного шума, оказывающего такое же воздействие на человека, как и постоянный шум. При измерениях с помощью шумомера эквивалентный уровень шума определяют по формуле:

$$L_{A \text{ экв}} = 10 \lg \frac{1}{T} \sum_{i=1}^m t_i 10^{0,1 L_i}.$$

Здесь T – время усреднения, m – число измерений, L_i – результат отдельного измерения, t_i – интервал времени между измерениями. Обычно интервал между измерениями 2-3 секунды, а время усреднения выбирают в зависимости от характера шума.

По механизму возникновения различают:

- **механический шум**;
- **аэрогидродинамический шум**;
- **шум электромагнитного происхождения**.

Принцип действия источников и особенности механического и аэрогидродинамического шума описаны в главе 4 (разделы 4.1.4 и 4.2.4). Что касается шума электромагнитного происхождения, то это механический шум, возникающий вследствие колебаний элементов электромеханических устройств под влиянием переменных магнитных сил (колебания статора и ротора электрических машин, сердечника трансформатора и др.).

Еще один принцип классификации шумов – *по способу распространения*. Речь идет о распространении шума в зданиях.

Если источник шума не связан с конструкциями здания и звук излучается непосредственно в воздушную среду (разговор, музыка, радио, телевизор), то звуковая волна вызывает в стене или перекрытии колебания, за счет чего звук проходит в соседнее помещение. Такой шум называется **воздушным**.

Еще один вид шума – **корпусный (структурный)** шум. Среда его передачи – твердые и жидкие материалы. Типичные источники такого шума – захлопывание двери, щелканье выключателя, смыв воды в туалете, шум потока в водопроводных трубах и в системе центрального отопления. Особенно интенсивным является корпусный шум, излучаемый каким-либо вибрирующим механизмом (насосом, лифтовым двигателем, вентиляционной установкой), жестко связанным с конструкцией здания. Механизм передачи корпусного шума можно описать следующим образом. Стены или перекрытия за счет механического воздействия приводятся в колебательное движение, которое в свою очередь заставляют колебаться частицы воздуха в соседнем помещении.

При ходьбе по междуэтажным перекрытиям (по полу) возникает **ударный шум**.

Источники корпусного и ударного шума вызывают интенсивные колебания жестких конструкций здания, по которым упругие волны могут распространяться почти без затухания на большие расстояния и создавать нежелательно высокие уровни шума даже в удаленных от источника помещениях (рисунок 8.1).

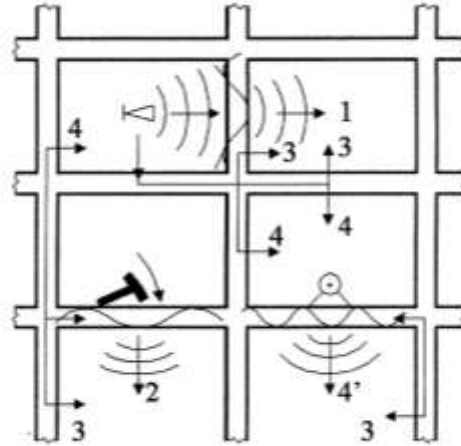


Рисунок 8.1 – Пути распространения шума в зданиях

1 – воздушный шум; 2 – ударный шум (прямые пути передачи шума); 3 и 4 – косвенные пути; 4' – структурный шум, излучаемый конструкциями, связанными с механизмами и элементами инженерного оборудования

8.2 Источники шума в жилых помещениях

Причиной повышенного уровня шума в жилых помещениях могут являться самые разнообразные источники звука. В зависимости от того, где они находятся, различают **внутренние** и **внешние** источники.

К шумам, излучаемым внутренними источниками, прежде всего относятся бытовые шумы, возникающие в доме, в соседних комнатах и квартирах. Звуки речи, музыки, прежде чем достигнуть стен, перегородок, перекрытий, распространяются по воздуху (воздушный шум). При ходьбе, перестановке мебели, различных ударах, ремонтных работах шум возникает в результате взаимодействия движущегося тела, предмета и конструкции здания (ударный шум).

Другая группа источников шума, находящихся в доме – его инженерное оборудование (лифты, мусоропроводы, сантехническое оборудование, отопление, вентиляция). К этой же группе источников шума можно отнести оборудование во встроенных или пристроенных помещениях жилых домов, которые занимают магазины, предприятия бытового обслуживания, общественного питания и другие. В результате работы оборудования возникают звуковые колебания (вибрация) его элементов, которые приводят к излучению воздушного шума, а также передается по связанным с ними конструкциям (структурный шум).

Примерные уровни воздушного и структурного шума в жилых помещениях приведены в таблице 8.2.

Таблица 8.2 – Источники бытового шума

А. Воздушный шум		
№	Источник шума	Уровень шума, дБА
1	Телевизор	70
2	Музыкальный центр	85
3	Разговор (спокойный)	65
4	Детский плач	78
5	Игра на пианино	80
6	Работа пылесоса	75
7	- стиральной машины	68
8	- холодильника	42
9	- электробритвы	60
10	- электрополотера	83
11	- принудительной вентиляции	42
12	- кондиционера	45
13	Приготовление пищи на плите	35-42
14	Наполнение ванны	36-58
15	Наполнение бачка в санузле	40-67
16	Вытекающая из крана вода	44-50
Б. Структурный шум		
№	Источник шума	Уровень шума, дБА
1	Перемещения лифта	34-42
2	Стук закрываемой двери лифта	44-52
3	Стук закрываемого мусоропровода	42-58
4	Стук по трубе центрального отопления	45-60

Источники шума, расположенные вне дома, - это транспорт (автомобильный, рельсовый, воздушный), промышленные предприятия, стройки, машины и механизмы службы городского коммунального хозяйства, спортивные, игровые площадки и так далее. Шумы от них достигают наружных ограждений домов преимущественно по воздуху, хотя при работе рельсового транспорта заметная часть звуковой энергии передается также в виде структурного шума – по грунту и по конструкциям здания.

8.3 Производственный шум

Основным источником шума на промышленных предприятиях, стройках, сельхозпредприятиях является работающее оборудование, непосредственно задействованное в производстве (станки, машины, агрегаты) и обслуживающее (системы вентиляции, энергоснабжения, транспорт).

При работе промышленного оборудования возникают шумы самых различных видов (см. раздел 8.1): постоянные и непостоянные во времени, широкополосные и тональные, механические, аэрогидродинамические и электромагнитные. Производственный шум отличается от шума в жилых помещениях прежде всего более высоким уровнем. В таблице 8.3 приведены примерные уровни шума на рабочих местах, создаваемые различными видами технологического оборудования.

Таблица 8.3 – Шумы технологического оборудования

Вид оборудования	Характеристика шума	Уровень шума, дБА
Станки металлорежущие	Механический, широкополосный, постоянный	75-98
Станки деревообрабатывающие	Механический, непостоянный, широкополосный и тональный	85-105
Машины кузнечно-прессовые		
Прессы механические	Механический, широкополосный	86-116
Прессы гидравлические	Механический и аэрогидродинамический	73-106
Молоты	Механический, широкополосный, импульсный	96-122
Машины компрессорные		
Компрессоры поршневые	Аэрогидродинамический, прерывистый	79-102
Турбовоздуходувки и газодувки	Аэрогидродинамический, постоянный	94-109
Технологическое оборудование промышленности стройматериалов		
Формовочные машины	Механический, непостоянный, широкополосный	104-121
Цементные мельницы	Механический, широкополосный	98-104
Насосы		
Центробежные	Механический, широкополосный	61-82
Поршневые	Аэрогидродинамический, непостоянный	78-93
Машины электрические		
Двигатели, генераторы, трансформаторы	Шум электромагнитного происхождения, постоянный, узкополосный	64-102
Оборудование подъемно-транспортное		
Мостовые краны	Механические, непостоянный	84-90
Конвейеры	Механический, постоянный или прерывистый	78-103
Санитарно-техническое оборудование зданий		
Вентиляторы	Аэрогидродинамический	69-114
Кондиционеры	Аэрогидродинамический	72-92

Следует отметить, что работающее оборудование создает высокие уровни шума не только на рабочих местах, но и на прилегающей территории, в том числе в жилых домах, расположенных вблизи предприятий. Промышленные предприятия образуют зоны с локальными участками акустического дискомфорта, которые действуют на население в течение суток. Отмеченные уровни превышают допустимые на 10-30 дБ преимущественно на частотах от 125 до 4000 Гц.

8.4 Транспорт как источник шума

Весьма значительными источниками шума, представляющими опасность для здоровья населения, являются аэропорты, автострады, мосты, тоннели, а также наземные и подземные железные дороги. Среди наземных средств транспорта доминирует автомобильный транспорт, доля которого в шумовом режиме города достигает 60-80 %. На расстояниях в несколько десятков метров от транспортных магистралей уровень звукового давления в низкочастотной части спектра достигает 80 дБ.

Примерные уровни шума, создаваемого различными транспортными средствами, приведены в таблице 8.4.

Таблица 8.4 - Уровни транспортного шума

Источник шума	Уровень шума, дБА
Автотранспорт	
Грузовой автомобиль, 5-тонный	80-98
Автобус	64-90
Легковой автомобиль, троллейбус	66-86
Мотоцикл	72-84
Рельсовый транспорт	
Железнодорожный	92-127
Метрополитен	80-90
Трамвай	75-90
Авиационный транспорт	
Вертолет	95-110
Турбореактивный самолет	105-135
Улицы и дороги	
Скоростные дороги	87
Магистральные улицы и дороги	85
- с непрерывным движением	
- с регулируемым движением	82
Дороги промышленных районов	84
Улицы жилых районов	74
Тихие переулки	35-40

9 ДЕЙСТВИЕ ШУМА НА ЧЕЛОВЕКА. НОРМИРОВАНИЕ ШУМА

9.1 Действие шума на организм человека

9.1.1 Общая характеристика шумового воздействия

Проявления вредного воздействия шума на организм человека весьма разнообразны. В зависимости от уровня шума, его спектральных и временных характеристик шум может оказывать неблагоприятное влияние не только на слух, но и на другие системы организма, а также на психическое состояние человека. В таблице 9.1 приведены примеры различных шумов и вызываемых ими ощущений.

Начиная с 1-й ступени, наблюдается психологическая реакция на шум. Начиная со 2-й ступени, начинают проявляться физические реакции. Могут иметь место нервные расстройства, нарушения сна, повреждение слуха, нарушение кровообращения, нарушение сердечной деятельности, нарушение мозгового кровообращения, повреждение нервов позвоночного столба, желудочно-кишечные расстройства.

Таблица 9.1 - Восприятие различных звуков

Ступени шума	Уровень звука, дБ(А)	Процесс	Ощущения
0	20	Тиканье тихих часов, легкий шелест листвы, спокойная комната ночью	Очень тихо
	30	Шелест листьев, шепот, разговор соседей за стеной	Тихо
1	40	Близкий шепот, средний уровень шума в жилой комнате	Почти тихо
	50	Разговор	Умеренно громко
	60	Шум в офисе, ресторане, магазине	Умеренно громко
2	70	Громкий разговор, громкое радио, крик	Громко
	80	Уличный шум при сильном движении	Громко
	90	Шумный цех на производстве, автосигнал	От громкого до непереносимого
3	100	Отбойный молоток, небольшой самолет	
	110	Штамповочно-кузнечное производство, громкая музыка (на концерте), сигнал машины скорой помощи	
4	>120	Реактивный двигатель самолета, двигатель ракеты	

9.1.2 Влияние шума на слух

В первую очередь вредное влияние шума относится к органам слуха. Вследствие непрерывного воздействия на слух людей интенсивного шума на производстве возникает профессиональная глухота или резкая потеря слуха. В начальной стадии заболевания отмечается звон или шум в ушах, постепенно уменьшается чувствительность к высоким частотам. В дальнейшем потеря слуха распространяется и на более низкие частоты – частоты речевого диапазона. Исследования показывают, что звук низкой частоты является менее вредным для здоровья, чем звук высокой частоты той же интенсивности (см. рисунок 9.1).

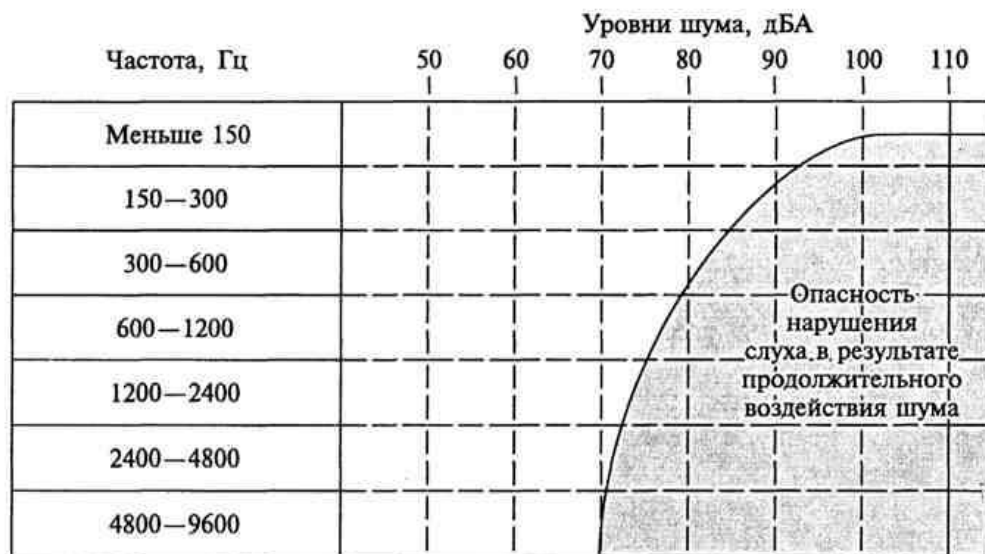


Рисунок 9.1 – Уровни шума, вызывающие повреждения слуха

Следует отметить, что форма и степень нарушения слуха сильно зависят от уровня шума и длительности его воздействия. Если человек подвергается более чем несколько минут воздействию звука средней или высокой частоты с уровнем около 90 дБ(А) или немного выше, он испытывает после этого временный (обратимый) сдвиг порога слышимости примерно на 20дБ(А). После прекращения действия звука этот сдвиг постепенно исчезает (в течение примерно получаса). С увеличением времени воздействия и при повышении уровня шума увеличивается временный сдвиг порога слышимости и удлиняется период восстановления. Если, например, шум в 100 дБ(А) при частотах 1200-2400 Гц длился 100 минут, то сдвиг порога превысит 30дБ(А), а для восстановления нормального слуха потребуется около 36 часов. Если человек подвергается воздействию интенсивного шума систематически, эффект перестает быть временным и понижение слуха с годами становится тяжелым и необратимым.

В таблице 9.2 приведены предельно допустимые дозы воздействия различных постоянных уровней шума в виде максимального времени, в течение которого можно ежедневно находиться под воздействием этого шума без

риска повреждения слуха. Практика показывает, что тональные шумы более опасны, чем широкополосные шумы; поэтому в цехах, где машины или какие-либо процессы производят шумы одного тона или группы тонов очень большого уровня, предельные уровни шума должны быть на 5-10 дБ(А) ниже.

Таблица 9.2 – Критерий риска повреждения слуха (полная ежедневная доза воздействия)

Продолжительность воздействия	Предельно допустимые уровни, дБ(А)
8 ч	90
4 ч	93
2 ч	96
1 ч	99
0,5 ч	102
0,25ч	105
7 мин	108
4 мин	111
2 мин	114
1 мин	117
30 с	120

9.1.3 Воздействие шума на нервную систему

Влияние шума на вегетативную нервную систему проявляется даже при небольших уровнях звука (40-70 дБ(А)) и не зависит от субъективного восприятия шума. Из вегетативных реакций наиболее выраженными являются нарушение периферического кровообращения и повышение артериального давления.

Воздействие на центральную нервную систему вызывает увеличение скрытого периода зрительно-моторной реакции, к нарушению подвижности нервных процессов, нарушает биоэлектрическую активность головного мозга с проявлением общих функциональных изменений в организме.

Изменения в функциональном состоянии нервной системы наступают гораздо быстрее и при меньших уровнях шума, чем снижение слуховой чувствительности.

9.1.4 Психоэмоциональная реакция человека на шум

Психические реакции появляются уже начиная с уровней шума 30дБ(А) и по мере нарастания интенсивности шума становятся все более выраженными: от раздражения и утомления до испуга и стресса. При этом решающую роль в психоэмоциональной оценке неприятности шума играет личное отношение человека. Степень воздействия на психику возрастает с

увеличением частоты звука и уменьшением ширины полосы частот шумового сигнала.

9.1.5 «Шумовая болезнь» и ее симптомы

Комплексное воздействие шума на организм приводит к тому, что у человека возникает целый ряд нарушений в состоянии здоровья, который получил название «шумовой болезни» или «болезни больших городов».

В настоящее время «шумовая болезнь» характеризуется целым рядом симптомов. Объективные симптомы: снижение слуха, изменение функции пищеварения, сердечно-сосудистая недостаточность, нейроэндокринные расстройства. Субъективные симптомы: раздражительность, головокружения, головные боли, ухудшение памяти, быстрая утомляемость, снижение аппетита, боль в ушах. Такие сдвиги в состоянии здоровья вызывают негативные изменения в эмоциональном состоянии.

Можно, таким образом, сделать вывод о том, что шумовое загрязнение окружающей среды существенно снижает качество жизни. Исследования влияния шума на работоспособность показали, что при работах, требующих повышенного внимания, повышение уровня шума с 70 до 90 дБ(А) снижает производительность труда на 20%. Установлено также, что среди рабочих шумных производств общая заболеваемость на 10-15% выше.

9.2 Требования к шумовым характеристикам жилых помещений и рабочих мест

Целью нормирования шумовых характеристик является установление научно обоснованных предельно допустимых величин шума, которые при ежедневном систематическом воздействии не вызывают существенных изменений в состоянии здоровья человека и не мешают его нормальной трудовой деятельности и отдыху.

Основной акустической величиной для описания и оценки уровня шума является эквивалентный уровень звука, определяемый для заданного интервала оценки по времени. Период оценки должен быть таким, чтобы включать все особенности проведения измерений: обычную деятельность или условия жизни человека можно ограничить рабочей сменой, временем дня, сезоном, определенным днем недели или не ограничивать время, если речь идет об измерениях в жилой местности. В этом случае различают только дневное и ночное время.

Предельно допустимые и рекомендуемые уровни шума жилых помещений, рабочих мест, различных территорий населенных пунктов, а также методика проведения контрольных измерений этих уровней устанавливаются соответствующими стандартами (ГОСТ), строительными правилами (СП) и санитарными нормами (СН).

Примеры нормативных требований к уровню шума приведены в таблицах 9.3-9.6.

Таблица 9.3 – Уровни шума для различных видов трудовой деятельности с учетом степени напряженности труда (ГОСТ 12.1.003-83 Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности)

Вид трудовой деятельности	Уровни звука и эквивалентные уровни звука, дБА
Работа по выработке концепций, новых программ; творчество; преподавание	40
Труд высших производственных руководителей, связанных с контролем группы людей, выполняющих преимущественно умственную работу	50
Высококвалифицированная умственная работа, требующая сосредоточенности; труд, связанный исключительно с разговорами по средствам связи	55
Умственная работа, выполняемая с часто получаемыми указаниями и акустическими сигналами; работа, требующая постоянного слухового контроля; высокоточная категория зрительных работ	60
Умственная работа, по точному графику с инструкцией (операторская), точная категория зрительных работ	65
Физическая работа, связанная с точностью, сосредоточенностью или периодическим слуховым контролем	80

Таблица 9.4 - Допустимые уровни звука и эквивалентные уровни звука на рабочих местах (Там же)

Рабочие места	Уровни звука и эквивалентные уровни звука, дБА
1. Помещения конструкторских бюро, расчетчиков, программистов вычислительных машин, лабораторий для теоретических работ и обработки экспериментальных данных, приема больных в здравпунктах	50
2. Помещения управления, рабочие комнаты	60
3. Кабины наблюдений и дистанционного управления	65-80
4. Помещения и участки точной сборки	65
5. Помещение лабораторий для проведения экспериментальных работ	80
6. Постоянные рабочие места и рабочие зоны в производственных помещениях и на территории предприятий, постоянные рабочие места стационарных /машин (сельскохозяйственных, горных и др.)	85

Таблица 9.5 – Допустимые уровни звука проникающего шума в помещениях жилых и общественных зданий и шума на территории жилой застройки (СН 2.2.4/2.1.8.562-96)

№ пп	Вид трудовой деятельности, рабочее место	Время суток	Уровни звука и эквивалентные уровни звука, дБА	Максимальные уровни звука, дБА
1	Палаты больниц и санаториев, операционные больницы	с 7 до 23 ч. с 23 до 7 ч.	35 25	50 40
2	Кабинеты врачей поликлиник, амбулаторий, диспансеров, больниц, санаториев		35	50
3	Классные помещения, учебные кабинеты, учительские комнаты, аудитории школ и других учебных заведений, конференцзалы, читальные залы библиотек		40	55
4	Жилые комнаты квартир, жилые помещения домов отдыха, пансионатов, домов-интернатов для престарелых и инвалидов, спальные помещения в детских дошкольных учреждениях и школах-интернатах	с 7 до 23 ч. с 23 до 7 ч.	40 30	55 45
5	Номера гостиниц и жилые комнаты общежитий	с 7 до 23 ч. с 23 до 7 ч.	45 35	60 50
6	Залы кафе, ресторанов, столовых		55	70
7	Торговые залы магазинов, пассажирские залы аэропортов и вокзалов, приемные пункты предприятий бытового обслуживания		60	75
8	Территории, непосредственно прилегающие к зданиям больниц и санаториев	с 7 до 23 ч. с 23 до 7 ч.	45 50	60 50
9	Территории, непосредственно прилегающие к жилым зданиям, зданиям лечебных учреждений, детских дошкольных учреждений, учебных заведений и библиотек	с 7 до 23 ч. с 23 до 7 ч.	55 45	70 60
10	Территории, непосредственно прилегающие к зданиям гостиниц и общежитий	с 7 до 23 ч. с 23 до 7 ч.	60 50	75 65
11	Площадки отдыха на территории больниц и санаториев		35	50

10 МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ЗАЩИТЫ ОТ ШУМА

10.1 Классификация средств и методов защиты от шума

Основные мероприятия по борьбе с шумом и защите от него проводятся в трех направлениях:

- устранение причин возникновения шума или снижение его в источнике;
- ослабление шума на путях передачи (глушение, звукоизоляция, звукопоглощение);
- непосредственная защита людей.

Защита от шума может осуществляться как средствами и методами *коллективной защиты*, так и средствами *индивидуальной защиты*.

В первую очередь необходимо использовать средства коллективной защиты от шума. Схема классификации средств и методов коллективной защиты от шума приведена на рисунке 10.1.



Рисунок 10.1 – Средства коллективной защиты от шума

Наиболее эффективны мероприятия, ведущие к снижению шума в источнике его возникновения. Борьба с шумом после его возникновения обходится дороже и часто является малоэффективной.

Значительный эффект в борьбе с шумом дают *организационно-технические методы*:

- применение малозумных технологических процессов (изменение технологии производства, способа обработки и транспортирования материалов, сырья, полуфабрикатов и т.п.);
- оснащение шумных машин средствами дистанционного управления и автоматического контроля;

- применение малошумных машин, изменение конструктивных элементов машин, их сборочных единиц;
- совершенствование технологии ремонта и обслуживания машин;
- использование рациональных режимов труда и отдыха работников на шумных предприятиях.

Снижение шума на пути его распространения от источника в значительной степени достигается **архитектурно-планировочными методами**:

- рациональными акустическими решениями планировок зданий и генеральных планов объектов;
- размещение технологического оборудования, машин и механизмов с учетом степени их шумности;
- правильное размещение рабочих мест;
- рациональное акустическое планирование зон и режимов движения транспортных средств и транспортных потоков;
- создание шумопоглощающих зон и экранов.

10.2 Акустические методы защиты от шума

Глушители шума применяются в основном для снижения шума различных аэродинамических установок и устройств. В практике борьбы с шумом используют глушители различных конструкций. Выбор типа глушителя зависит от конкретных условий работы каждой установки, спектра шума и требуемой степени снижения уровня шума.

По принципу действия глушители подразделяются на **абсорбционные, реактивные** и **комбинированные**. Абсорбционные глушители, содержащие звукопоглощающий материал, поглощают энергию звуковых колебаний, а реактивные отражают звуковые волны обратно к источнику. В комбинированных глушителях происходит как поглощение, так и отражение звука.

Звукоизоляция – это способность ограждающей конструкции (перекрытия, перегородки, кожуха, корпуса машины и так далее) ослаблять проходящий через нее звук. Ослабление звуковых волн при прохождении через слой материала подробно рассматривалось в разделе 5.3. Суть использования звукоизоляции для снижения уровня шума заключается в том, что помещение, в котором находится человек, изолируется от более шумного помещения стеной, перегородкой, слоем плотного материала. Звукоизолирующий эффект обеспечивается также установкой экранов, колпаков, кожухов на наиболее шумящие узлы машин и механизмов.

Звукопоглощением называется комплекс явлений, связанных с потерями энергии звуковых волн при отражении от некоторых материалов и конструкций (**звукопоглотителей**). Принцип действия звукопоглотителей основан на превращении энергии акустических колебаний в тепловую энергию за счет явлений внутреннего трения и теплопроводности. Потери на трение наиболее значительны в пористых материалах, которые широко используются в звукопоглощающих облицовках и конструкциях.

Звукопоглощающие облицовки используют для так называемой акустической обработки помещений. Акустическая обработка предусматривает покрытие звукопоглощающим материалом потолка и верхней части стен. Вследствие этого снижается интенсивность отраженных звуковых волн и уменьшается уровень звука в помещении (см. раздел 7.4).

Следует отметить, что акустическая обработка помещений дает заметный эффект в помещениях небольшого объема. В производственных помещениях кроме облицовки потолка и стен звукопоглощающими материалами используются звукопоглощающие экраны и так называемые штучные (объемные) звукопоглотители в виде шаров, конусов, кубов, которые размещаются непосредственно рядом с источниками шума. Для поглощения узкополосных и тональных шумов, особенно в низкочастотной области спектра, используются так называемые резонансные звукопоглотители (см. раздел 10.3).

Интересным и принципиально новым методом снижения шума является **метод активного глушения**, связанный с созданием «антизвука», то есть равного по амплитуде и противоположного по фазе звука. В результате интерференции основного звука и «антизвука» в некоторых местах шумного помещения можно создать зоны тишины.

В случаях, когда средства коллективной защиты и другие средства не обеспечивают снижение шума до допустимых уровней, необходимо применять **средства индивидуальной защиты**. Средства индивидуальной защиты весьма разнообразны: наушники, закрывающие ушную раковину снаружи; противошумные вкладыши, перекрывающие наружный слуховой проход; специальные защитные шлемы и каски, защищающие не только от воздушного шума, но и от шума, который может распространяться по костям черепа. Для работы в особо шумных условиях используют противошумные костюмы.

Средства индивидуальной защиты позволяют снизить уровень воспринимаемого звука на (10-40) дБ, причем наиболее значительное глушение шума наблюдается в области высоких частот, которые наиболее опасны для человека.

Наибольший эффект дает комплексное использование всех перечисленных методов борьбы с шумом и защиты от него.

10.3 Резонансные звукопоглотители

Одним из наиболее перспективных видов звукопоглощающих конструкций являются **резонансные звукопоглотители** (РЗП). Такие поглотители просты в изготовлении, экономичны и, что самое важное, могут обеспечить хорошее звукопоглощение на средних и низких частотах, где обычные поглотители из пористых материалов малоэффективны. Кроме того, существует хорошо разработанная и сравнительно несложная методика расчета их акустических характеристик. При изучении данного раздела рассматриваются следующие вопросы:

- конструкция простейшего РЗП,

- физические процессы, происходящие в РЗП под действием звуковой волны,
- механизм поглощения энергии звуковых колебаний,
- метод расчета акустического импеданса и коэффициента звукопоглощения (КЗП),
- влияние основных параметров РЗП на резонансную частоту и КЗП,
- возможности усовершенствования конструкции РЗП (зональные РЗП, РЗП с дифракционным экраном),
- области возможного применения РЗП.

10.3.1 Основные характеристики резонансных звукопоглотителей и методы их расчета

Простейший резонансный звукопоглотитель представляет собой панель, перфорированную отверстиями, расположенную на некотором расстоянии от жёсткой стенки. Пространство за панелью может быть разделено перегородками на отдельные отсеки (рисунок 10.2). Впервые поглотитель такого типа был предложен С.Н. Ржевским.

Такая конструкция представляет собой колебательную систему, в которой роль упругого элемента играет воздух, заполняющий пространство за панелью, а в качестве инерционного элемента выступают воздушные пробки, заполняющие отверстия панели. При приближении частоты звуковой волны, падающей на лицевую поверхность звукопоглотителя, к собственной частоте резонатора скорость движения воздуха в отверстиях панели резко возрастает. При этом увеличиваются потери звуковой энергии, обусловленные действием сил вязкого трения.

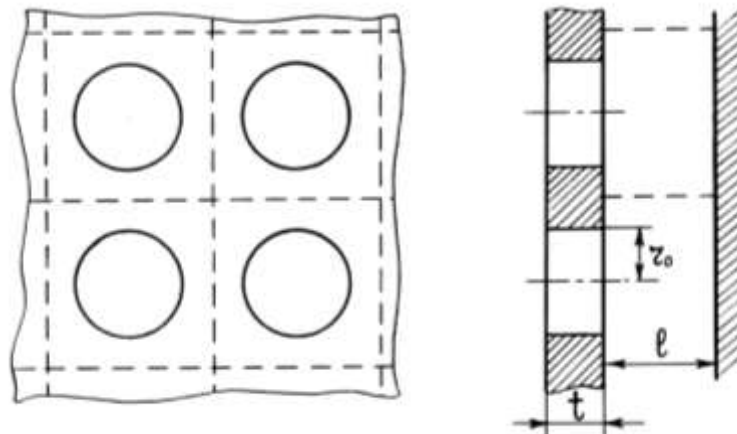


Рисунок 10.2 – Резонансный звукопоглотитель

Акустические свойства РЗП характеризуются входным импедансом Z и коэффициентом звукопоглощения α .

Входной импеданс поверхности звукопоглотителя равен, по определению, отношению звукового давления к нормальной составляющей колебательной скорости u , в общем случае, является комплексной величиной:

$$Z = \frac{p}{v_n} \Big|_r = R + iY. \quad (10.1)$$

Обычно используют так называемый безразмерный или нормированный импеданс:

$$Z_1 = \frac{Z}{\rho_0 c} = R_1 + iY_1, \quad (10.2)$$

где $\rho_0 c$ – волновое сопротивление среды. Для воздуха при нормальных условиях $\rho_0 c = 420 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ($\rho_0 = 1,27 \text{ кг}/\text{м}^3$, $c = 330 \text{ м}/\text{с}$).

Коэффициент звукопоглощения РЗП равен:

$$\alpha = \frac{4R_1}{(R_1 + 1)^2 + Y_1^2}. \quad (10.3)$$

Для получения максимального коэффициента поглощения ($\alpha=1$) необходимо, чтобы входной импеданс поверхности звукопоглотителя был согласован с волновым сопротивлением среды. В случае нормального падения плоской звуковой волны на поверхность поглотителя условие согласования имеет вид:

$$R_1=1, Y_1=0.$$

С физической точки зрения рассмотрение процесса отражения звуковых волн от РЗП сводится к решению задачи о дифракции звука на периодической неоднородной поверхности (лицевой панели РЗП) с учётом вынужденных колебаний слабодиссипативной среды (воздуха) в объёме поглотителя (за панелью).

Значение действительной (активной) составляющей импеданса R_1 определяется диссипацией энергии звуковой волны в поглотителе, однако механизмы диссипации могут быть различными.

Если считать, что основные потери энергии связаны с действием вязкости и теплопроводности при движении воздуха в отверстиях панели, то для расчёта импеданса отверстия можно использовать формулу Крендалла для импеданса трубы:

$$R_o = Re \left(- \frac{\mu k_s^2}{1 - \frac{2}{k_s r_0} \frac{I_1(k_s r_0)}{I_0(k_s r_0)}} \right) \cdot (t + 2\delta), \quad (10.4)$$

где $k_e = \sqrt{-\frac{i\omega\rho_0}{\mu}}$ – волновое число вязкой волны, $\mu=2\cdot 10^{-5}$ Па·с – коэффициент вязкости воздуха (если материал панели обладает высокой теплопроводностью, то следует использовать увеличенное значение коэффициента вязкости $\mu'=2\mu$), $\omega=2\pi f$ – циклическая частота колебаний в звуковой волне, r_0 – радиус отверстия, t – толщина панели, 2δ – концевые поправки, учитывающие дифракционные эффекты.

При $k_e r_0 \gg 1$ формула (10.4) переходит в формулу Гельмгольца:

$$R_o = \frac{(t + 2\delta)S_o \sqrt{2\rho_0\mu\omega}}{d}. \quad (10.5)$$

Используя эту формулу, получаем для безразмерного удельного активного импеданса РЗП выражение

$$R_1 = \frac{R_o}{\eta\rho_0 c} = \frac{2(t + 2\delta)\sqrt{2\rho_0\mu\omega}}{\eta\rho_0 c d}, \quad (10.6)$$

где η – коэффициент перфорации лицевой панели, равный отношению площади отверстия $S_o = \pi d^2/4$ к площади квадратной ячейки, приходящейся на одно отверстие, $S = a^2$.

Для расчета концевой поправки при $r_o/a \leq 0,2$ используется формула:

$$2\delta = 0,96\sqrt{S_o}(1 - 1,25d/a).$$

где $d = 2r_o$ – диаметр отверстия.

Из выражения (10.6) видно, что R_1 растет при увеличении толщины панели и уменьшении отверстий.

Мнимая (реактивная) составляющая импеданса Y_1 определяется упругостью воздуха в объеме РЗП и инерционностью воздуха, колеблющегося в окрестности отверстий перфорированной панели:

$$Y_1 = \frac{\omega(t + 2\delta)}{\eta c} - ctg \frac{\omega l}{c}, \quad (10.7)$$

где l – глубина полости РЗП (расстояние от внутренней поверхности панели до жесткой стенки).

При резонансе ($f = f_{рез}$) $Y_1 = 0$ и коэффициент звукопоглощения (КЗП) системы α достигает максимального значения.

Для определения резонансной частоты $f_{рез}$ следует решить уравнение:

$$\frac{2\pi f_{рез}(t+2\delta)}{\eta c} = ctg \frac{2\pi f_{рез} l}{c}.$$

В общем случае это уравнение требует численного решения, однако при условии, что длина звуковой волны $\lambda \gg l$ (или $2\pi fl/c \ll 1$), можно считать

$$ctg \frac{2\pi fl}{c} \approx \frac{c}{2\pi fl}.$$

Таким образом:

$$\frac{2\pi f_{рез}(t+2\delta)}{\eta c} \approx \frac{c}{2\pi f_{рез} l} \quad \text{и}$$

$$f_{рез} \approx \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\eta}{(t+2\delta)l}}. \quad (10.8)$$

Из выражения (10.8) видно, что резонансная частота снижается при увеличении глубины полости поглотителя l .

Для построения частотной зависимости коэффициента звукопоглощения РЗП следует по формуле (10.8) определить его резонансную частоту, используя выражения (10.6), (10.7) и (10.1), найти значения R_1 , Y_1 и α при $f = f_{рез}$, а затем рассчитать R_1 , Y_1 и α для 10-15 значений частоты из интервала

$$\frac{f_{рез}}{2} \leq f \leq \frac{3f_{рез}}{2}.$$

Типичный вид зависимости $\alpha(f)$ приведен на рисунке 10.3.

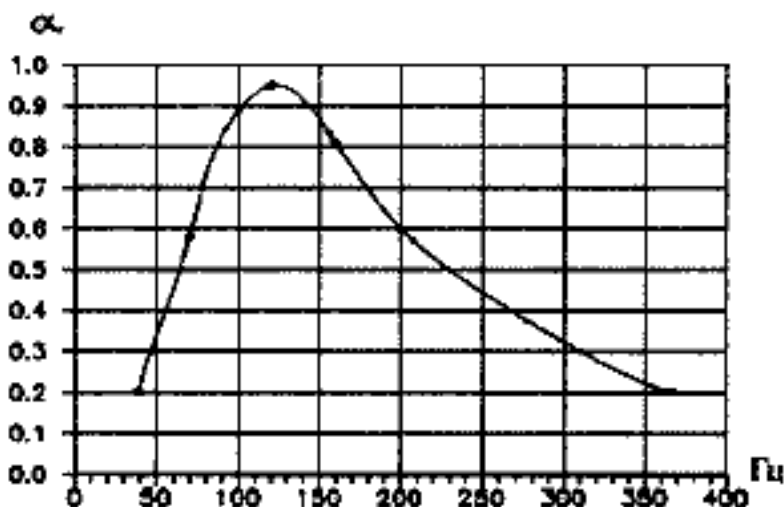


Рисунок 10.3 – Кривая звукопоглощения резонансного звукопоглотителя

10.3.2 Использование РЗП для снижения уровня шума в низкочастотном диапазоне

Как следует из изложенного выше, основной областью использования РЗП является глушение так называемого тонального шума. Варьируя геометрические параметры РЗП, можно добиться того, чтобы резонансная частота поглотителя совпадала с основной частотой звука, падающего на его поверхность. При этом достигается высокие значения КЗП и, следовательно, значительное снижение уровня звука при отражении от поверхности РЗП.

Одним из основных недостатков классической конструкции РЗП является невозможность его использования для глушения широкополосного шума.

Для расширения кривой поглощения РЗП было предложено вместо каждого из отверстий в панели размещать группу симметричного расположения отверстий малого диаметра (зону). Такой звукопоглотитель получил название зонального РЗП (рисунок 10.4).

Движение воздуха в отверстиях малого диаметра приводит к увеличению диссипативных потерь и, следовательно, к расширению кривой поглощения. Кроме того изменение размеров зоны и отдельных отверстий дает возможность варьировать акустические характеристики поглотителя.

Основная трудность создания звукопоглотителей для низкочастотного диапазона связана с крайне малым затуханием низкочастотного звука как в воздухе, так и в традиционных поглощающих материалах. Поэтому обычные низкочастотные поглотители весьма громоздки, в то время как РЗП позволяют получить сильное звукопоглощение при сравнительно малом объеме конструкций, хотя и в более узком частотном диапазоне.

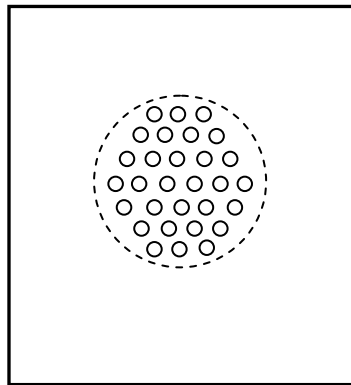


Рисунок 10.4 – Вид лицевой панели зонального РЗП

Для снижения резонансной частоты поглотителя без чрезмерного увеличения глубины полости l необходимо увеличить положительную часть реактивной составляющей импеданса Y_1 , связанную с колебаниями воздуха в окрестности панели. Такая возможность реализуется в РЗП с дифракционным экраном. Дифракционный экран представляет собой круглую пластину ра-

диуса R ($R > r_o$), закрепленную на некотором расстоянии l_o за отверстием параллельно плоскости лицевой панели РЗП (рисунок 10.5). Изменение l_o сильно влияет на величину Y_1 вследствие процессов дифракции. Кроме того, дополнительные вязкие потери, возникающие при движении воздуха в зазоре между лицевой панелью и экраном, приводят к увеличению активной составляющей импеданса R_1 .

Расчеты и экспериментальные данные показывают, что РЗП с дифракционным экраном является на данный момент наиболее перспективным средством пассивного глушения низкочастотных и инфразвуковых шумов.

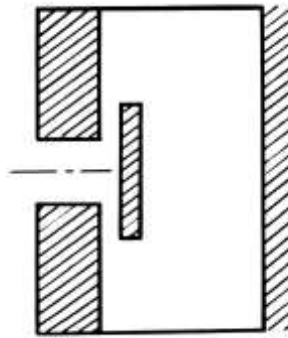


Рисунок 10.5 – РЗП с дифракционным экраном

Важной проблемой разработки РЗП для низкочастотного диапазона является учет всех механизмов диссипации энергии звуковых колебаний. Кроме поглощения энергии, связанного с вязкими и тепловыми потерями при движении воздуха в отверстиях панели и в зазоре между панелью и дифракционным экраном, о которых говорилось выше, в РЗП определенную роль играют еще два механизма диссипации.

Один из них связан с влиянием вязкости и теплопроводности воздуха, колеблющегося в полости РЗП. Как показывают расчеты, на низких частотах это влияние может быть существенным.

Другой механизм, связанный с нелинейными процессами в РЗП, также играет существенную роль на низких частотах и может привести к заметному увеличению диссипативных потерь энергии звуковой волны и увеличению коэффициента звукопоглощения.

Таким образом, резонансные звукопоглотители различных модификаций находят широкое применение в практике борьбы с шумом.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Литература к разделу «Физические основы акустики»

1. Трофимова, Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. – М.: Академия, 2008. – 569 с.
2. Детлаф, А.А. Курс физики: учеб. пособие для вузов / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – М.: Высшая школа, 2002. – 718 с.
3. Ржевкин, С.Н. Курс лекций по теории звука/ С.Н.Ржевкин. – М. Изд-во МГУ, 1960, 200 с., ил.
4. Лепендин, Л.Ф. Акустика: Учеб. пособие для вузов/ Л.Ф. Лепендин. – М.: Высшая школа, 1978, 448 с., ил.
5. Исакович, М.А. Общая акустика. Учебное пособие/ М.А. Исакович. – М.: Наука, 1973. – 354с.
6. Морз, Ф. Колебания и звук / Ф.Морз. – М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1949. – 496 с.
7. Красильников, В.А. Звуковые и ультразвуковые волны в воздухе, воде и твердых телах/ В.А.Красильников. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. литературы, 1960. – 560 с.
8. Клюкин, И.И. Удивительный мир звука/ И.И.Клюкин. – Л.: Судостроение, 1978. – 186 с.
9. Зарембо, Л.К. Акустические волны вокруг нас / Л.К.Зарембо // Школьникам о современной физике. – М.: Просвещение, 1990. – 175 с.
10. Ультразвук: Маленькая энциклопедия/ Гл.ред. И.П.Голямина. – М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.
11. Чедд, Г. Звук/ Грэхем Чедд. – М.: «Мир», 1975. – 206 с., ил.
12. Вартанян, И.А. Звук – слух – мозг/ И.А.Вартанян. – Л.: Наука, 1981. – 176 с.

Литература к разделу «Методы расчета звукового поля в помещении»

1. Ковригин, С.Д., Крышов, С.И. Архитектурно-строительная акустика./ С.Д.Ковригин, С.И.Крышов. – М.: Высшая школа, 1986, 256 с., ил.
2. Лепендин, Л.Ф. Акустика: Учеб. пособие для вузов/ Л.Ф. Лепендин. – М.: Высшая школа, 1978, 448 с., ил.
3. Исакович, М.А. Общая акустика. Учебное пособие/ М.А. Исакович. – М.: Наука, 1973. – 354с.

Литература к разделу «Проблемы борьбы с шумом»

1. Борьба с шумом на производстве: Справочник / Е.Я. Юдин, Л.А. Борисов, И.В. Горенштейн и др. – М.: Машиностроение, 1985.
2. Ковригин, С.Д., Крышов, С.И. Архитектурно-строительная акустика./ С.Д.Ковригин, С.И.Крышов. – М.: Высшая школа, 1986, 256 с., ил.

4. Блази, В. Справочник проектировщика. Строительная физика/В.Блази. – М.: Техносфера, 2004. -480 с., ил.
5. Алексеев,С.П., Казаков, А.М., Колотилов, Н.Н. Борьба с шумом и вибрацией в машиностроении./ С.П.Казаков и др. – М.: Машиностроение, 1970, 208 с., ил.
6. Тэйлор, Р. Шум./ Р. Тэйлор; пер. с англ. Д.И.Арнольда; под ред. М.А.Исаковича. – М.: Мир, 1978. – 308с, ил.
7. Романов, С.И. Биологическое действие вибрации и звука: Парадоксы и проблемы XX века./ С.И.Романов. – Л.: Наука, 1991. – 158 с.
8. Крейтан, В.Г. Защита жилища от шума/ В.Г.Крейтан. – М: Знание, 1986. – 61 с.
9. Защита от шума в градостроительстве: справочник проектировщика/ Г.Л. Осипов, В.Е.Коробков, А.А.Климухин и др. Под ред. Г.Л. Осипова. – М.: Стройиздат, 1993.- 96 с.
10. Соловьев, А.К. Физика среды: Учебник/ А.К.Соловьев. – М.: Изд-во АСБ, 2008. – 344 с.
11. Иванов, Н.И. Инженерная акустика: теория и практика борьбы с шумом/ Н.И.Иванов. – М.: Логос, 2008. – 424 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ	Стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	3
ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АКУСТИКИ	
1 КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ: ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ	
1.1 Необходимые сведения из математики	
1.1.1 Комплексные числа.....	5
1.1.2 Ряд Фурье. Интеграл Фурье.....	7
1.2 Колебания и волны: основные понятия	8
1.2.1 Гармонические колебания и их характеристики.....	8
1.2.2 Затухающие колебания.....	10
1.2.3 Вынужденные колебания. Резонанс.....	12
1.2.4 Упругие волны в сплошной среде.....	14
2 ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ В ВОЗДУХЕ	
2.1 Основные определения.....	17
2.2 Основные уравнения гидродинамики в акустическом приближении	
2.2.1 Уравнение неразрывности.....	18
2.2.2 Уравнение движения.....	19
2.2.3 Уравнение состояния.....	19
2.3 Волновое уравнение для звуковых волн в воздухе. Скорость звука.....	20
2.4 Плоская гармоническая звуковая волна.....	21
2.5 Энергия звуковой волны. Интенсивность звука.....	23
2.6 Логарифмическая шкала силы звука.....	24
3 ВОСПРИЯТИЕ ЗВУКА ЧЕЛОВЕКОМ	
3.1 Слух.....	26
3.2 Высота тона.....	28
3.3 Громкость звука.....	29
3.4 Спектральный состав звука.....	31
4 ИСТОЧНИКИ И ПРИЕМНИКИ ЗВУКА	
4.1 Излучение звука колеблющимися телами.....	34
4.1.1 Колебания струны.....	34
4.1.2 Колебания мембраны.....	36
4.1.3 Электродинамический громкоговоритель (динамик).....	36
4.1.4 Механический шум.....	37
4.2 Гидродинамические излучатели звука	
4.2.1 Сирена.....	38
4.2.2 Свисток.....	39
4.2.3 Духовые музыкальные инструменты.....	39
4.2.4 Аэрогидродинамические шумы.....	40
4.3 Приемники звука	
4.3.1 Угольный микрофон.....	41
4.3.2 Электромагнитный микрофон.....	41

4.3.3 Электродинамические микрофоны.....	41
4.3.4 Конденсаторный микрофон.....	42
4.3.5 Пьезоэлектрический микрофон.....	42
5 ОТРАЖЕНИЕ И ПРЕЛОМЛЕНИЕ ЗВУКОВЫХ ВОЛН	
5.1 Отражение звуковой волны от плоской границы при нормальном падении.....	44
5.2 Отражение и преломление при наклонном падении.....	48
5.3 Прохождение звуковой волны через плоский слой материала....	51
МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЗВУКОВОГО ПОЛЯ В ПОМЕЩЕНИИ.....	54
6 ВОЛНОВОЙ МЕТОД РАСЧЕТА ЗВУКОВОГО ПОЛЯ В ЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ	
6.1 Постановка задачи.....	55
6.2 Собственные колебания и собственные частоты прямоугольного объема.....	56
6.3 Классификация собственных колебаний замкнутого объема.....	57
6.4 Особенности спектра собственных частот колебаний замкнутого объема.....	59
7 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ СТАТИСТИЧЕСКОЙ АКУСТИКИ ДЛЯ РАСЧЕТА ЗВУКОВОГО ПОЛЯ В ПОМЕЩЕНИИ	
7.1 Диффузное звуковое поле и его основные характеристики.....	60
7.2 Решение задачи о расчете плотности энергии звукового поля в помещении.....	61
7.3 Время реверберации как характеристика акустических качеств помещения.....	64
7.4 Расчет уровня звука в помещении	
7.4.1 Учет прямого и отраженного звука.....	66
7.4.2 Приближенная оценка постоянной помещения.....	67
7.4.3 Учет расположения и характеристики направленности источника звука.....	68
ПРОБЛЕМЫ БОРЬБЫ С ШУМОМ	
8 ИСТОЧНИКИ ШУМА	
8.1 Шум. Классификация шумов.....	70
8.2 Источники шума в жилых помещениях.....	73
8.3 Производственный шум.....	74
8.4 Транспорт как источник шума.....	76
9 ДЕЙСТВИЕ ШУМА НА ЧЕЛОВЕКА. НОРМИРОВАНИЕ ШУМА	
9.1 Действие шума на организм человека	
9.1.1 Общая характеристика шумового воздействия.....	77
9.1.2 Влияние шума на слух.....	78
9.1.3 Воздействие шума на нервную систему.....	79
.....9.1.4 Психологическая реакция человека на шум.....	79
9.1.5 «Шумовая болезнь» и ее симптомы.....	80

9.2 Требования к шумовым характеристикам жилых помещений и рабочих мест.....	80
10 МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ЗАЩИТЫ ОТ ШУМА	
10.1 Классификация средств и методов защиты от шума.....	83
10.2 Акустические методы защиты от шума.....	84
10.3 Резонансные звукопоглотители.....	85
10.3.1 Основные характеристики резонансных звукопоглотителей и методы их расчета.....	86
10.3.2 Использование РЗП для снижения уровня шума в низкочастотном диапазоне.....	90
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.....	92

Учебное издание

Вощукова Елена Анатольевна

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СТРОИТЕЛЬНОЙ АКУСТИКИ

Учебное пособие

Технический редактор - А.Г. Савельева
Компьютерный набор текста и верстка – Е.А.Вощукова

Формат 60×84 1/16. Объем 6 п.л. Тираж 50 экз. Заказ № .
ФГОУ ВПО Брянская государственная инженерно-технологическая академия
241037, г. Брянск, просп. Станке Димитрова, 3, тел./факс (4832) 74-60-08
Редакционно-издательский отдел, тел. (4832) 64-69-31, E-mail: mail@bgita.ru
Подписано к печати 30.06.2011

Отпечатано в Брянском центре научно-технической информации
241050, г. Брянск, ул. Горького, 30, тел. (4832) 74-09-43, 66-09-18
E-mail: cnti@online.bryansk.ru