

Возбуждение в трубах плоских звуковых волн с помощью поршневого излучателя ограниченных размеров имеет некоторое преимущество перед способом возбуждения плоских волн с помощью кольцевого преобразователя. Если необходимо возбуждать звуковые волны на резонансных частотах, то для цилиндрического преобразователя, вмонтированного в трубу диаметром d , имеется только одна возможная частота $f = c_0/(2\pi a)$ (c_0 — скорость звука в материале преобразователя). Сравнивая эту формулу с (VI.4.9), можно видеть, что кольцевые преобразователи возбуждают плоские волны в цилиндрических трубах при выполнении определенного соотношения между скоростями звука в материале преобразователя и в веществе, заполняющем трубу. Это соотношение следует из неравенств

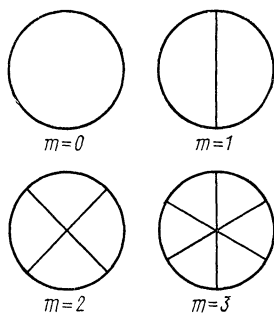


Рис. VI.5.2

$$\frac{c_0}{2\pi a_{cp}} < \frac{1,2197}{2} c; \quad \frac{c_0}{c} < 1,2197\pi \frac{a_{cp}}{a} \approx 3,8 \frac{a_{cp}}{a}. \quad (VI.5.14)$$

Для преобразователя из магнитоэлектрического материала $c_0 \approx 5000$ м/с; $a_{cp}/a \approx 1$; для воды $c = 1500$ м/с; $c_0/c \approx 3,3$. Однако если труба заполнена воздухом, отношение c_0/c не удовлетворяет условию (VI.5.14), т. е. плоская волна не будет возбуждаться.

Значительно большими возможностями обладает способ прямоугольного поршня: во-первых, резонансная частота поршня не зависит от диаметра трубы и определяется толщиной преобразователя. Изменяя толщину преобразователя, начиная со стержневых систем и кончая пластинами, можно в пределах от небольших частот, вплоть до первой критической, изменять частоту возбуждения плоских волн в трубах. Кроме того, способ возбуждения плоских волн с помощью прямоугольного поршня универсален относительно вещества, заполняющего трубу.

ГЛАВА VII

ЭЛЕМЕНТЫ АКУСТИКИ ПОМЕЩЕНИЙ

§ VII.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Звуковые волны в закрытых помещениях, многократно отражаясь от границ, образуют сложное поле колебательного движения воздуха. Законы распределения колебательной скорости частиц воздуха, добавочного давления и потока акустической энергии в закрытых помещениях определяются не только свойствами источника звука, но также геометрическими размерами, формой помещения и способностью стен, потолка и пола поглощать акустическую энергию.

Таким образом, звуковые поля в закрытом помещении и свободном пространстве существенно отличаются. В частности, в свободном поле интенсивность звука есть средний за период поток мощности в направлении распространения волны и является энергетической характеристикой поля бегущей волны. Для звукового поля в помещении, если поглощение незначительно, понятие интенсивности теряет смысл, поскольку в каждый момент времени существуют потоки мощности различных направлений, поэтому в некоторых случаях они компенсируются, тогда как в этот момент уровень звуковых колебаний воздуха в данной точке пространства может достигать значительной величины.

Вместо интенсивности звука для акустического поля помещений используют поток звуковой мощности, падающей на единицу площади во всех направлениях полупространства. Эту величину называют *удельной мощностью облучения границ*.

Универсальной энергетической характеристикой поля является *плотность акустической энергии*, характеризующая как поле закрытого объема, так и поле бегущих волн. Для свободного пространства вдали от источника она убывает с расстоянием и пропорциональна акустической мощности источника. Для звукового поля помещения эта закономерность не выполняется. В некоторых случаях плотность звуковой энергии в помещении не зависит от расстояния до источника (если не включать небольшую область вблизи источника), иногда с увеличением расстояния плотность звуковой энергии может увеличиваться. Плотность звуковой энергии помещений зависит не только от акустической мощности источника, но и от акустических свойств помещений.

Диффузное поле. Звуковое поле помещения в каждой точке пространства можно представить как совокупность волн, приходящих непосредственно от источника, и волн, попадающих в данную точку не по прямому пути, а после одного или нескольких отражений. Направления потоков мощности отраженных волн зависят от геометрической формы помещения и степени поглощения акустической энергии границами помещения.

При изменении соотношения между длиной волны и размерами помещения, структурой и формой отражающих поверхностей характер звукового поля помещения изменяется. Если помещение не содержит фокусирующих сводов и геометрически симметричных сечений, а размеры помещения значительно больше, чем средняя длина волны, и если стены не сильно поглощают звуковую энергию, то через произвольный элемент объема помещения при непрерывном действии источника звука в каждый момент времени будет проходить большое число отдельных волн. В результате этого звуковое поле будет иметь следующие свойства: во-первых, все направления потоков энергии этих волн равновероятны; во-вторых, плотность акустической энергии такого поля по всему объему помещения постоянна. Назовем первое свойство *изотропией*, второе — *однородностью*. Звуковое поле, изотропное и однородное, называют *диффузным*.

Для диффузного поля постулируется еще одно важное свойство:

все элементарные волны этого поля некогерентны, поэтому в нем отсутствуют устойчивые явления интерференции.

Энергетической характеристикой диффузного поля наряду с плотностью звуковой энергии является *удельная мощность облучения границ*. Эта величина определяет энергетические свойства поля и представляет собой поток мощности, проходящей через площадь со всех направлений, лежащих в пределах 2π . Плотность акустической энергии \mathcal{E} и удельная мощность облучения границ I_g связаны между собой некоторой зависимостью, которая выводится следующим образом.

Из свойств однородности и изотропности диффузного поля следует, что поток dW звуковой энергии, переносимой от элемента

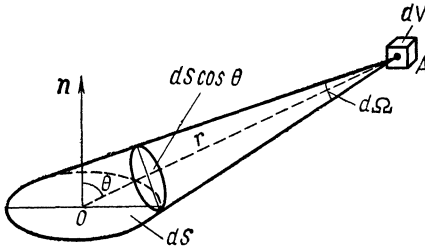


Рис. VII.1.1

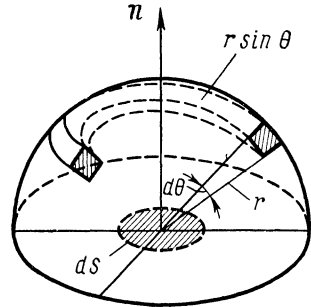


Рис. VII.1.2

объема dV в направлении к площади dS , равен произведению акустической энергии объема $\mathcal{E} dV$ и вероятности \mathcal{P}_Ω распространения волн от выбранного элемента объема к границе объема площадью dS :

$$dW = \mathcal{E} dV \mathcal{P}_\Omega.$$

Вероятность того, что энергия переносится в направлении площади dS , равна отношению телесного угла $d\Omega$, под которым виден элемент площади dS , к углу 4π ср:

$$\mathcal{P}_\Omega = \frac{d\Omega}{4\pi}.$$

В результате

$$dW = \frac{1}{4\pi} \mathcal{E} dV d\Omega.$$

На рис. VII.1.1 показаны элементы объема dV в точке A и телесный угол $d\Omega$, под которым из точки A виден элемент площади dS . Поместим начало сферической системы координат в центр элемента площади dS , полярную ось совместим с направлением нормали. Тогда

$$d\Omega = \frac{dS \cos \theta}{r^2},$$

где $r = OA$.

Поскольку диффузное поле изотропно, то элемент объема dV можно представить в форме элементарного тороида (рис. VII.1.2):

$$dV = 2\pi r \sin \theta r d\theta dr.$$

Полный поток мощности облучения площадки dS определяется интегралом выражения для dW , взятым по полярному углу θ в пределах от 0 до $\pi/2$ и по расстоянию r в пределах от 0 до r_0 :

$$dW = \frac{\mathcal{E}}{4\pi} \int_0^{\pi/2} \cos \theta \sin \theta d\theta \int_0^{r_0} \frac{2\pi r^2 dr}{r^2} dS.$$

Если c — скорость звука, то $r_0 = c \Delta t$. После выполнения интегрирования получаем

$$I_g = \frac{\Delta W}{\Delta S \Delta t} = \frac{\mathcal{E}c}{4}. \quad (\text{VII.1.1})$$

Таким образом [см. (VII.1.1)], удельная мощность облучения границ диффузного поля в 4 раза меньше интенсивности бегущих звуковых волн при той же самой плотности акустической энергии.

Коэффициент поглощения. Звуковые волны, попадая на различные предметы, находящиеся в помещении (стены, пол, потолок), частично поглощаются. Мощность звуковых волн, поглощенных единицей поверхности, называют *удельной мощностью поглощения*, а отношение мощности поглощения к мощности облучения — *удельным коэффициентом поглощения*:

$$\alpha = \frac{\Delta I_g}{I_g}.$$

Удельный коэффициент поглощения α зависит от физической природы покрытия границы и частоты. Если границы имеют различные покрытия с удельными коэффициентами поглощения $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots$ и площади этих покрытий S_1, S_2, S_3, \dots , то полная энергия, поглощаемая границами помещения за единицу времени, равна

$$\Delta W_g = (\alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \alpha_3 S_3 + \dots) I_g = A I_g,$$

где $A = \sum_i \alpha S_i$ — полный коэффициент поглощения для данного помещения. Идеально поглощающее покрытие площадью 1 м^2 имеет коэффициент поглощения, равный единице.

Коэффициенты поглощения зависят от частоты звуковых волн и определяются главным образом упругими свойствами материала. В звуковом диапазоне частот коэффициенты поглощения неупругих материалов больше, чем упругих.

Например, бетон, штукатурка на кирпичной стене имеют коэффициенты поглощения $\approx 0,015 - 0,025$, тогда как у облицовки из сосны 0,061. Толстый ковер, шторы из мягких тканей хорошо поглощают звук, для них коэффициент поглощения на порядок больше, чем для твердых покрытий (например, коэффициент поглощения при 512 Гц толстой ковровой ткани равен 0,30).

Более подробные сведения о коэффициентах поглощения можно найти в специальной литературе, посвященной акустике помещений.

Стандартное время реверберации. В больших помещениях со слабым звукопоглощением стен легко наблюдать явление послезвучания. После прекращения действия источника звук исчезает не мгновенно, а постепенно замирая. Явление послезвучания называют *реверберацией*, время замирания звука — *временем реверберации*.

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

§ VII.2. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ РЕВЕРБЕРАЦИИ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Таким образом,

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

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