ISSN 2304-120X
КОНЦЕПТ
научно-методический электронный журнал

Елаховский Д. В. Некоторые аспекты архитектурной акустики в программе физического образования студентов строительной специальности университетов // Концепт. – 2016. – № 01 (январь). – ART 16011. – 0,5 п. л. – URL: http://e-koncept.ru/2016/16011.htm. – ISSN 2304-120X.

ART 16011 **УДК 378.147:372.853**

Елаховский Дмитрий Вячеславович,
кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики ФГБОУ ВПО «Петрозаводский государственный университет», г. Петрозаводск
Elahovsky@mail.ru

Некоторые аспекты архитектурной акустики в программе физического образования студентов строительной специальности университетов

Аннотация. *В статье отражены некоторые вопросы физических основ строительной акустики, не представленные (или вскользь упоминаемые) в программе курса общей физики. С учетом важной роли характеристик строительных ограждений (толщина, материал, наличие полостей) при формировании акустической среды помещений, рассмотрены процессы взаимодействия упругих волн с твердым телом, влияющие на обеспечение звукового комфорта людей при эксплуатации помещений различного предназначения. Рассмотрены фазовые и энергетические соотношения, связанные с переходом звуковых волн из одной среды в другую с учетом соотношения звуковых сопротивлений сред; реверберационные процессы, влияющие на качество звуковых полей.*
Ключевые слова: *звуковое поле, акустическое сопротивление, коэффициент проникновения звуковой энергии, реверберация.*
Раздел: *(01) педагогика; история педагогики и образования; теория и методика обучения и воспитания (по предметным областям).*

В [1] рассмотрен один из способов повышения мотивационной составляющей физического образования студентов-строителей, связанный с адаптацией учебной дисциплины к предполагаемой профессиональной деятельности выпускников университета. Как отмечалось, его реализация связана с рассмотрением в рамках курса «Общая физика» основных элементов строительной физики, и в качестве примера в [2] представлены фрагменты архитектурной климатологии, влияющие на эксплуатационные характеристики помещений, обеспечивающие комфортное пребывание людей, долговечность конструкций зданий и соблюдение технологических условий с точки зрения качества продукции. Немаловажным условием комфортных условий жизнедеятельности людей является состояние звуковой среды помещений, формирование которой рассматривается в рамках раздела строительной физики под названием архитектурная акустика, которая изучает процессы проникновения звука через строительные ограждения и распространения его внутри помещений с целью установления строительных норм, обеспечивающих оптимальный «слуховой комфорт». В театрах, концертных залах, лекционных аудиториях необходимо обеспечить четкое восприятие слов и музыки в любом месте нахождения слушателей, при этом звук как носитель речевой и музыкальной информации должен доходить до «потребителя» в неискаженном виде.

Другой важной задачей архитектурной акустики являются вопросы звукоизоляции и предотвращения вредных воздействий производственных и бытовых шумов. Развитие новых транспортных средств и новых производств, создающих повышенный шум, поставило проблему шумоподавления в один ряд с проблемами очистки воздуха, воды и недр от промышленных загрязнений. Вредное воздействие, приводящее

к разным заболеваниям и психологическим расстройствам, оказывают шумы различного частотного диапазона, включая инфразвуковой и ультразвуковой. С появлением сборного домостроения и легких ограждений из эффективных материалов повысилась их звукопроницаемость, что вызывает необходимость дальнейшей разработки методов улучшения их акустических характеристик.

Следует отметить, что вся совокупность архитектурно-строительных методов воздействия на качество звуковой среды помещений и ее защита от шумов различной природы основаны на различных физических законах, связанных с процессом распространения звуковых волн и их взаимодействием с ограждениями. Можно привести такой пример. Уже в древности было замечено, что в воздухе особенно быстро поглощаются звуки высокой частоты, поэтому для их усиления использовались заделанные в пол металлические сосуды-голосники. В своды первых русских церквей Чернигова и Киева в XI в. тоже закладывались голосники из керамических сосудов. И в том и другом случае срабатывал вполне определенный физический закон – резонансное усиление сигнала определенной частоты.

1. Поведение продольной волны на границе двух сред

В формировании звуковой среды в помещениях важную роль играют звуковые волны, отраженные от элементов конструкции зданий. Эти волны (особенно при первичном отражении) оказывают существенное влияние на качество музыки и на разборчивость речи. Различают звуковые отражения направленные (зеркальные) и рассеянные, при этом характер отражения зависит от размеров и фактуры отражающей поверхности. При малой глубине фактуры отделочного слоя и больших размерах отражающих поверхностей (по сравнению с длиной волны) звуковые волны отражаются направленно, подобно отражению света от зеркальной поверхности, при этом: а) звуковые лучи, падающий и отраженный, лежат в одной плоскости с перпендикуляром, восстановленным в точке падения луча; б) угол падения равен углу отражения.

Кроме отраженной волны на границе раздела двух сред возникает также и проходящая волна, т. е. часть звуковой энергии падающей волны проникает в другую среду. Исследование закономерностей проникновения звуковых волн из одной среды в другую является важной задачей разработки архитектурных и строительных методов звуковой изоляции помещений. Говоря о границе раздела двух сред, следует иметь в виду не только реальное соседство различных веществ с отличающимися химико-физическими свойствами (воздух – твердое тело, воздух – жидкость и т. п.), но и тот случай, когда в химически однородном веществе вследствие влияния определенных факторов (например, температуры) возникают зоны с различающимися значениями звукового сопротивления.

Рассмотрим простейший случай нормального падения плоской звуковой волны на плоскую границу раздела двух сред.

Пусть плоскость x = 0 (см. рис. 1) является границей двух сред, обладающих различными упругими свойствами. Источник находится в среде I, и поэтому на границу раздела сред нормально падает звуковая волна $y_1 = A_1 \cdot \cos(\omega t - k_1 x)$, где k_1 – волновое число, соответствующее падающей волне. Благодаря отражению на границе раздела сред возникает отраженная волна:

$$y_2 = A_2 \cdot \cos(\omega t + k_1 x + \varphi_1),$$

а также проходящая волна:

$$y_3 = A_3 \cdot \cos(\omega t - k_2 x + \varphi_2).$$

Так как процесс отражения волны и ее проникновение в другую среду может сопровождаться изменением фазы, то это обстоятельство учитывается введением символов φ_1 и φ_2.

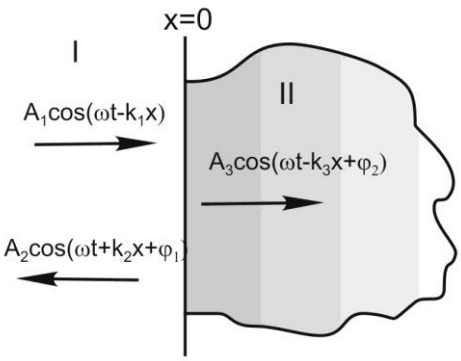

Рис. 1. Поведение звуковой волны на границе двух сред

Учитывая граничные условия при x = 0,

$$y_1 + y_2 = y_3; \quad (1)$$

$$P_1 + P_2 = P_3. \quad (2)$$

Эти формулы выражают равенство смещений частиц среды и равенство деформаций (давлений) в каждый момент времени. P_1, P_2 и P_3 – звуковые давления в падающей, отраженной и проходящей волнах. Тогда

$$A_1 \cdot \cos\omega t + A_2 \cdot \cos(\omega t + \varphi_1) = A_3 \cdot \cos(\omega t + \varphi_2). \quad (3)$$

Так как давление в плоской волне равно:

$$P = -\gamma P_0 \frac{\partial y}{\partial x},$$

где γ – показатель адиабаты, то

$$P_1 = -\gamma_1 P_0 A_1 k_1 \cdot \sin(\omega t - k_1 x). \quad (4)$$

Аналогичные выражения можно получить для P_2 и P_3. Подставляя эти выражения в (2), получим

$$k_1 \gamma_1[-A_1 \sin \omega t + A_2 \sin(\omega t + \varphi_1)] = -\gamma_2 k_2 A_3 \sin(\omega t + \varphi_2). \quad (5)$$

Равенства (3) и (5) должны удовлетворяться при любом значении t, поэтому выделим в каждом равенстве члены, содержащие cos (ωt) и sin (ωt), и приравняем коэффициенты при них нулю:

$$\cos\omega t(A_1 + A_2\cos\varphi_1 - A_3\cos\varphi_2) = \sin\omega t(A_2\sin\varphi_1 - A_3\sin\varphi_2); \quad (6)$$

$$A_1 + A_2 \cdot \cos\varphi_1 = A_3 \cdot \cos\varphi_2$$
$$A_2 \sin\varphi_1 = A_3 \sin\varphi_2. \quad (7)$$

Аналогично для уравнения (5):

$$-k_1\gamma_1 A_1 \sin \omega t + k_1 \gamma_1 A_2 \sin \omega t \cdot \cos \omega t + k_1 \gamma_1 A_2 \cos \omega t \cdot \sin \omega t =$$

$$=-\gamma_2 k_2 A_3 \sin\omega t\cdot\cos\varphi_2 - \gamma_2 k_2 A_3 \cos\omega t\cdot\sin\varphi_2$$

$$\sin\omega t\left(\gamma_2 k_2 A_3\cos\varphi_2 - \gamma_1 k_1 A_1 + A_2 k_1\gamma_1\cos\varphi_1\right) =$$

$$= -\cos\omega t\left(k_1\gamma_1 A_2\sin\varphi_1 - \gamma_2 k_2 A_3\sin\varphi_2\right);$$

$$A_2\cos\varphi_1 - A_1 = -\frac{k_2\gamma_2}{k_1\gamma_1}A_3\cos\varphi_2. \qquad (8)$$

$$A_2\sin\varphi_1 = -\frac{k_2\gamma_2}{k_1\gamma_1}A_3\sin\varphi_2 \qquad (1.67)$$

Обозначим: $\Delta = \frac{k_2\gamma_2}{k_1\gamma_1} = \frac{\lambda_1\gamma_2}{\lambda_2\gamma_1} = \frac{c_1\gamma_2}{c_2\gamma_1}$,

где k = 2π /λ – волновое число, c – звуковая скорость.

Так как скорость звука равна $c = \sqrt{\gamma P_o/\rho}$, где ρ – плотность среды, то

$$\Delta = \frac{c_2\rho_2}{c_1\rho_1} = \frac{æ_2}{æ_1},$$

где æ = c· ρ – звуковое сопротивление. Уравнение имеет смысл соотношений звуковых сопротивлений граничащих сред.

Таким образом, имеем систему уравнений:

$$\begin{aligned} A_1 + A_2\cdot\cos\varphi_1 &= A_3\cdot\cos\varphi_2 \\ A_2\sin\varphi_1 &= A_3\sin\varphi_2 \\ -A_1 + A_2\cos\varphi_1 &= -\Delta\cdot A_3\cdot\cos\varphi_2. \\ A_2\sin\varphi_1 &= -\Delta\cdot A_3\cdot\sin\varphi_2 \end{aligned} \qquad (9)$$

Комбинация второго и четвертого уравнений дает:

$$A_3\left(1+\Delta\right)\cdot\sin\varphi_2 = 0,$$

где Δ > 0.

Последнее равенство удовлетворяется при $\varphi_2 = k\pi$, где k = 0, 1, 2,… Из второго уравнения, учитывая, что $A_2 \neq 0$ (отражение имеет место), находим, что $\varphi_1 = m\pi$ (m = 0, 1, 2,…). Вычитая из первого уравнения третье, получим:

$$2A_1 = A_3\left(1+\Delta\right)\cdot\cos\varphi_2.$$

Так как $A_3 > 0$ и Δ > 0, то $\cos\varphi_2 = +1$ или $\varphi_2 = k\cdot 2\pi$. Следовательно, амплитуда проходящей волны

$$A_3 = A_1\frac{2}{1+\Delta}. \qquad (10)$$

Подставляя это выражение в первое уравнение и учитывая, что $\cos\varphi_2 = +1$, получим:

$$A_2\cdot\cos\varphi_1 = A_1\frac{1-\Delta}{1+\Delta}. \qquad (11)$$

Так как $\cos\varphi_1 = \pm 1$, то из последнего равенства, учитывая, что все величины в нем положительны, получим:

если Δ < 1, то $\cos\varphi_1 = 1$, $\varphi_1 = 0$;

$\Delta > 1$, то $\cos \varphi_1 = -1$, $\varphi_1 = \pi$.

Проанализируем полученные результаты. Так как $\varphi_2 = k \cdot 2\pi$ ($k = 0, 1, 2, \ldots$) то на границе раздела двух сред фаза проходящей волны не изменяется. В то же время фаза отраженной волны может быть равна как нулю, так и π, поэтому если звуковое сопротивление второй фазы меньше, то отражение волны происходит без изменения фазы, в противном случае отраженная волна изменяет фазу на противоположную. Таким образом,

$$A_2 = \pm A_1 \frac{1-\Delta}{1+\Delta}, \qquad A_3 = A_1 \frac{2}{1+\Delta}. \tag{12}$$

Учитывая, что $k = 2\pi/\lambda$, а частоты всех волн одинаковы (уравнения (3) и (5) тождественно выполняются при любом t, если y_3 – гармоническое колебание той же частоты, что и y_1), то $\lambda 1/\lambda 2 = c1/c2$. Таким образом, при переходе волны из одной среды в другую изменяется длина волны.

Если воспользоваться табличными значениями акустических сопротивлений для воздуха и воды, то окажется, что при переходе волны из воздуха в воду амплитуда проходящей волны в 1650 раз меньше амплитуды падающей, а при переходе волны из воды в воздух, наоборот, в два раза больше.

Рассмотрим теперь энергетические соотношения, связанные с переходом звуковой волны из одной среды в другую. Для этого вспомним, что интенсивность волны определяется величиной:

$$I = \frac{1}{2}\rho c A^2 \omega^2.$$

Тогда, учитывая соотношения между амплитудами падающей и проходящей волн $A_3 = 2A_1/(1 + \Delta)$, получим:

$$I_3 = \frac{1}{2}\rho_2 c_2 A_2^2 \omega^2 = \frac{\rho_2 c_2 \omega^2 4A_1^2}{2(1+\Delta)^2}. \tag{13}$$

Умножив числитель и знаменатель на $\rho_1 c_1$ (звуковое сопротивление первой среды), получим:

$$I_3 = \frac{4\Delta}{(1+\Delta)^2}\frac{1}{2}\rho_1 c_1 A_1^2 \omega^2 = \frac{4\Delta}{(1+\Delta)^2} I_1, \tag{14}$$

где I_1 – интенсивность падающей волны. Доля энергии, прошедшей через границу раздела, характеризует коэффициент проникновения звуковой энергии α:

$$\alpha = \frac{I_3}{I_1} = \frac{4\Delta}{(1+\Delta)^2}. \tag{15}$$

Эта величина не зависит от направления распространения. С учетом закона сохранения энергии *коэффициент отражения звуковой энергии* равен:

$$R = 1 - \alpha = 1 - \frac{4\Delta}{(1+\Delta)^2} = \frac{(1-\Delta)^2}{(1+\Delta)^2}. \tag{16}$$

На рис. 2 представлена зависимость коэффициента проникновения звуковой энергии от отношения звуковых сопротивлений сред.

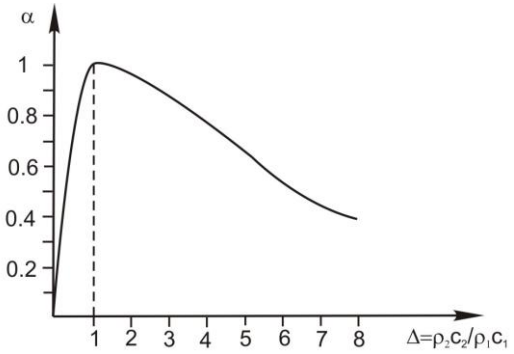

Рис. 2. Зависимость коэффициента проникновения звуковой энергии от отношения звуковых сопротивлений сред

Анализ этого графика позволяет сделать некоторые качественные и полуколичественные выводы. Так, при одинаковых звуковых сопротивлениях величина α = 1, и волна проходит через границу, не отражаясь. Когда звуковые сопротивления сред сильно отличаются друг от друга, то независимо от направления распространения

$$\alpha \approx 4\frac{(c\rho)_{min}}{(c\rho)_{max}} << 1, \qquad (17)$$

т. е. волна почти целиком отражается.

Такая ситуация имеет место при падении звуковой волны из воздуха помещения на кирпичную стенку, и если воспользоваться значениями звуковых сопротивлений, то:

$$\alpha = 4\frac{440}{3000000} = \frac{1}{1700},$$

следовательно, уровень силы звука при прохождении из воздуха в кирпичную стену снижается на величину:

$$\Delta L = 10l\,g\frac{I_{пад}}{I_{прош}} = 10\lg\frac{1}{\alpha} = 32\ дБ.$$

Аналогичная ситуация имеет место при взаимодействии волны с внешней стенкой, т. е. волна опять почти целиком отражается, а интенсивность выходящего наружу звука снизится еще на 32 дБ. Поэтому, без учета многократных отражений волны внутри стенки от обеих границ и колебаний самой конструкции, суммарное ослабление проходящего через кирпичную стенку звука должно составить 64 дБ.

На реальный коэффициент проникновения α и коэффициент отражения R влияют не только соотношение звуковых сопротивлений сред, но также угол падения волны на поглощающую поверхность и зависимость этого поглощения от частоты и спектрального состава звукового потока. При конечной протяженности (толщины) второй среды процесс отражения усложняется, так как в первую среду начинают возвращаться волны, отраженные от задней границы второй среды. С изменением расстояния между передней и задней границами ограждения могут возникать резонансные явления, связанные с собствен-

ными частотами колебаний стенки. В реальных строительных ограждениях следует учитывать их многослойность в направлении прохождения звука и неоднородность по фронту падающей волны (окна, двери), а также возможность проникновения звука через щели и неплотности в строительной конструкции.

Ослабление энергии звуковой волны имеет место и при ее распространении в однородной среде. Если в качестве источника звуковых волн рассматривать человека и учесть, что длина волны в воздухе заметно превышает размер полости рта, то это обстоятельство позволяет моделировать говорящего человека в качестве точечного источника звука, поэтому сила звука изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния. Оценки показывают, что при изменении расстояния от 1 метра до 5 метров сила звука снижается на 14 дБ. При больших расстояниях от указанного источника звука фронт волны все более становится плоским, что заметно снижает уровень ослабления силы звука. Также следует принять во внимание наличие сил трения, благодаря которым звуковая энергия трансформируется во внутреннюю энергию воздушной среды.

Выше рассматривалось поведение продольных волн на границе раздела двух сред. Для случая нормального падения волны на границу раздела сред были получены выражения для коэффициентов отражения R и коэффициента проникновения α. Ясно, что и при углах падения, отличных от π/2, часть энергии волны при отражении будет потеряна за счет проникновения в материал отражающей поверхности с последующим переходом в тепловую энергию. Этот процесс, характеризующийся поглощением поверхностью звуковой энергии, называется звукопоглощением и количественно характеризуется коэффициентом звукопоглощения α :

$$\alpha = E_{погл}/E_{пад}, \qquad (18)$$

где Епог – энергия, поглощенная данной поверхностью; Епад – энергия, падающая на поверхность. В общем случае коэффициент звукопоглощения некоторой поверхности зависит от частоты колебания звука, от структуры материала и от угла падения. При акустических расчетах обычно применяется среднее значение диффузного коэффициента поглощения при падении звуковой энергии под любым углом. Численное значение среднего коэффициента поглощения определяется из выражения:

$$\alpha = \frac{\sum \alpha_i S_i}{\sum S_i}, \qquad (19)$$

где S_i – площади поверхностей в помещении (потолка, стен, пола и др.); α_i – соответственно коэффициенты их поглощения.

Величина $\alpha_i S_i = C_i$ называется *эффективной поверхностью,* и в системе СИ ее единицей является *Сэбин* (Сэб).

2. Время реверберации и его расчет

Основной характеристикой акустики при проектировании помещений, в которых качество речевой и музыкальной информации играет первостепенное значение, является реверберационный процесс, количественной оценкой которого служит время реверберации.

Наличие в помещении естественных ограждающих конструкций в виде стен, потолка и пола, а также различных предметов приводит к тому, что после прекращения звучания источника в помещении звук не исчезает мгновенно, так как благодаря многократным отражениям от указанных объектов звуковые волны продолжают достигать

слухового аппарата человека. При каждом отражении неизбежна потеря энергии, характеризуемая коэффициентом звукопоглощения, и, естественно, это сопровождается спадом в помещении уровня звукового давления. Процесс постепенного затухания звука в помещении после прекращения действия источника звучания называют реверберацией [3].

До момента прекращения функционирования источника звуковой волны происходит постепенное нарастание силы звука в какой-либо точке помещения в результате суммарного действия прямого звукового сигнала и первых и последующих отражений. Однако процесс нарастания энергии звука вследствие многократных отражений от внутренних поверхностей постепенно замедляется, так как чем выше порядок отражений, тем меньше их вклад в результирующую звуковую энергию. В конечном итоге наступает стационарное состояние звукового поля. И если в этот момент действие источника звука прекращается, начинается процесс постепенного затухания звука в помещении. При этом сначала исчезает вклад звуковой волны непосредственно от источника, а затем и последующих отраженных волн, и так до тех пор, пока звуковая энергия достигает порога слышимости.

В открытых театрах и аудиториях, при отсутствии отражающих поверхностей, источником звуковой информации являются звуковые волны непосредственно от их источника, поэтому звуковая энергия, достигая максимального значения, исчезает сразу же после прекращения действия источника.

Идеальная картина динамики звукового сигнала в закрытом помещении приведена на рис. 3, тогда как в действительности подобная зависимость уровня звукового сигнала имеет более сложный вид.

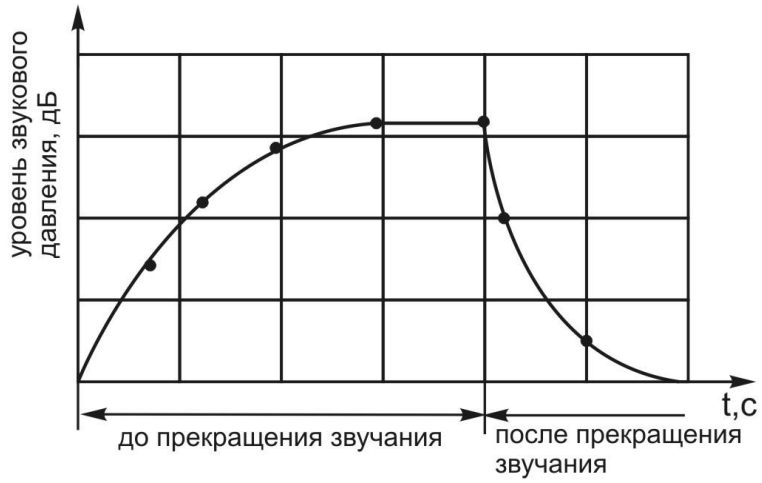

Рис. 3. Картина нарастания и затухания звукового сигнала

Количественная оценка реверберации может быть получена при анализе скорости спадания уровня силы звука us, измеряемой в дБ/с. В предположении диффузности звукового поля скорость спадания уровня силы звука можно считать постоянной и одинаковой во всех точках помещения вне зависимости от положения источника звука. Однако эта величина зависит от частоты звуковой волны. Обычно вместо скорости спадания уровня силы звука применяется время реверберации T, характеризующее спад уровня звукового давления.

Для конкретизации понятия времени реверберации учитывают следующее обстоятельство. Средний уровень интенсивности звука в залах составляет около 60 дБ. Поэтому оказалось удобным ввести понятие стандартного времени реверберации,

под которым понимают время, в течение которого плотность звуковой энергии стандартного тона частотой 500 Гц уменьшилась в процессе ее свободного затухания до одной миллионной доли начального значения. А это как раз и соответствует уменьшению уровня силы звука на 60 дБ. Следовательно, время стандартной реверберации можно определить как время, в течение которого уровень силы звука стандартного тона (ν = 500 Гц) уменьшается на 60 дБ, т. е. до порога слышимости.

Наличие многократных отражений, кроме увеличения интенсивности воспринимаемого звукового импульса, приводит к его значительному удлинению – помещение становится «гулким», т. е. на вновь возникающий звук начинает накладываться гул от звуков, ранее инициированных источником, но еще продолжающих существовать в помещении за счет отражений. При излишней гулкости помещения воспринимаемая в нем речь становится нечленораздельной.

Если α – коэффициент звукопоглощения волны при отражении от поверхности, то в результате n-кратного отражения конечная интенсивность равна:

$$I_n = I_0 (1-\alpha)^n, \tag{20}$$

где I_0 – интенсивность волны, излучаемой источником.

Если интенсивность уменьшается в 106 раз, то число отражений при этом равно:

$$n = \frac{6 \cdot 2.3}{-\ln(1-\alpha)} \quad (\text{т.к. } \ln 10 = 2.3). \tag{21}$$

В некоторых случаях величина коэффициента α не превышает 0.1, что позволяет с достаточной степенью точности заменить натуральный логарифм первым членом его разложения в ряд, т. е. ln(1 – α) = -α. Тогда

$$n \approx \frac{6 \cdot 2.3}{\alpha}. \tag{22}$$

Так как расстояния между двумя последовательными отражениями различны, то необходимо использовать среднее значение расстояния между двумя точками поверхности отражения l и среднее время между двумя последовательными отражениями: r* = l /c (c – скорость волны), и поэтому полное время реверберации:

$$T = nr^* = \frac{6 \cdot 2.3 \cdot l}{c\alpha}. \tag{23}$$

Для оценки величины l представим помещение в виде сферы радиусом R [4] и рассмотрим две произвольные точки ее поверхности N и M (см. рис. 4). Точка N занимает произвольное положение, и пусть эта точка находится на вершине полярной оси. Все точки M, расположенные на поверхности кольца между полярными углами θ и θ + dθ, будут находиться на одинаковом расстоянии от N, равном:

$$NM = R\sqrt{2(1-\cos\theta)} = 2R\sin\frac{\theta}{2}.$$

Вероятность расположения точки M в пределах данного кольца равна:

$$P = \frac{dS}{S},$$

где dS – площадь кольца; S – площадь сферы.

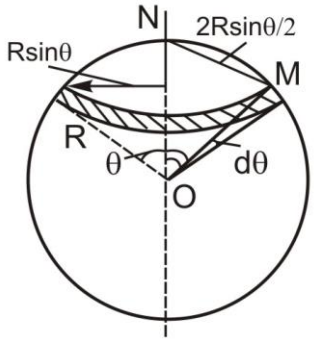

Рис. 4. К расчету времени реверберации

$$dS = 2\pi R^2 \sin\theta d\theta = 4\pi R^2 \sin\frac{\theta}{2}\cos\frac{\theta}{2} = 8\pi R^2 \sin\frac{\theta}{2} d\left(\sin\frac{\theta}{2}\right),$$

$$S = 4\pi R^2.$$

Тогда среднее значение расстояния MN найдем по формуле:

$$l = \mathbf{NM} = \int NM\frac{dS}{S} = \frac{1}{S}16\pi R^2\int_0^{\pi}\sin^2\frac{\theta}{2}d\left(\sin\frac{\theta}{2}\right) = \frac{1}{S}\frac{16}{3}\pi R^3 = \frac{4V}{S},$$ где $V = \frac{4}{3}\pi R^3$ – объем сферы.

Если предположить, что это выражение справедливо и для реальных помещений несферической формы, то время реверберации равно:

$$T = \frac{4\cdot 6\cdot 2.3V}{c\alpha S} = \frac{0.163V}{\alpha S}, \qquad (24)$$

где c = 340 м/с – скорость распространения звуковой волны в воздухе.

Если конструктивные элементы помещения обладают различными коэффициентами звукопоглощения, то с учетом этого обстоятельства:

$$T = \frac{0.163V}{\sum \alpha_i S_i} = \frac{0.163V}{\sum C_i}, \qquad (25)$$

где $C_i = \alpha_i S_i$ – эффективная поверхность.

Следует учесть также объемное поглощение звуковой энергии при многократном отражении волны от различных поверхностей. При прохождении звуковой волной в газовой среде расстояния x закон ослабления интенсивности звука имеет вид:

$$I(x) = I(0)\cdot e^{-mx},$$

где m – коэффициент объемного поглощения.

Ослабление уровня силы звука при этом равно:

$$\Delta I = 10\lg\frac{I(0)}{I(x)} = 10mx\lg e = \frac{10\cdot mx}{2.3}.$$

Следовательно, при снижении уровня сигнала на 60 дБ:

$$T = \frac{x}{c} = \frac{6\cdot 2.3}{cm}.$$

Поглощение при многократном отражении происходит по закону дискретной геометрической прогрессии, аналогичному закону объемного поглощения, соответствующему непрерывной геометрической прогрессии. Поэтому при совместном учете обоих факторов необходимо складывать скорости этих процессов, которые обратны времени. Тогда получим:

$$\frac{1}{T}=\frac{cm}{6\cdot 2.3}+\frac{c\sum\alpha_i S_i}{6\cdot 2.3\cdot 4V}=\frac{c}{6\cdot 2.3\cdot 4V}\left(\sum\alpha_i S_i+4mV\right).$$

В итоге окончательно для стандартного времени реверберации получим:

$$T=\frac{0.163V}{\sum\alpha_i S_i+4mV}. \qquad (26)$$

В том случае, когда помещения характеризуются наличием сильно поглощающих поверхностей (теле- и радиостанции), замена натурального логарифма в (21) на первый член его разложения уже не правомерна, поэтому расчет времени реверберации следует производить по более точной формуле:

$$T=\frac{0.163}{\sum S_i\cdot\ln\left(\frac{1}{1-\alpha_i}\right)+4mV}. \qquad (27)$$

Для удобства расчетов вводится средний коэффициент звукопоглощения:

$$\alpha_{ср}=\frac{\sum\alpha_i S_i}{S_{общ}},$$

где $S_{общ}$ – общая площадь внутренних поверхностей помещения (м^2).

Кроме того, вводится затабулированная функция φ(αср), равная

$$\varphi\left(\alpha_{ср}\right)=-\ln\left(1-\alpha_{ср}\right). \qquad (28)$$

Тогда расчет времени реверберации проводится по формуле:

$$T=0.163\frac{V}{S_{общ}\varphi\left(\alpha_{ср}\right)+4mV}. \qquad (29)$$

Рассмотренные два аспекта формирования звуковой среды не охватывают весь спектр факторов, влияющих на качество звуковой информации при эксплуатации помещений различного предназначения, так как жесткие рамки журнальной статьи не позволяют в полной мере рассмотреть физические явления, имеющие место при распространении звуковых волн в помещениях. Тем не менее представленный материал может быть полезен для будущих инженеров-строителей. Более полное изложение материала по данной тематике представлено в учебно-методическом пособии «Физические основы архитектурной акустики» [5].

Ссылки на источники

1. Елаховский Д. В. Повышение мотивационной составляющей физического образования студентов строительной специальности вуза // Физическое образование в вузах. – 2013. – Т. 19. – № 4. – С. 74–81.
2. Елаховский Д. В. Элементы архитектурной климатологии как фрагменты физического образования студентов строительной специальности университетов // Концепт. – 2015. – № 05 (май). – URL: http://e-koncept.ru/2015/15146.htm.

3. Гусев Н. М. Основы строительной физики. – М.: Стройиздат, 1975.
4. Тодес О. М. Курс лекций и заданий по строительной физике. – Л., 1972.
5. Елаховский Д. В., Малиненко И. А. Физические основы архитектурной акустики: учеб. пособие. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2008.

Dmitriy Elakhovskiy,
Candidate of Physical-Mathematical Sciences, Associate Professor at the chair of General Physics, Petrozavodsk State University, Petrozavodsk
Elakhovsky@mail.ru

Some aspects of room acoustics in the program of physics for students majoring in civil engineering

Abstract. The paper focuses on some issues of basic physics for building acoustics that are not included (or just mentioned) in the general physics program. Taking into consideration the importance of building elements (thickness, material, presence of cavities) for acoustics environment formation the author considers the processes of acoustic waves interaction with solid bodies which affect people's acoustic comfort in premises of various applications. The paper deals with phase and energy relations resulting from acoustic waves transfer from one medium into another with regard to sound environmental resistance. Reverberation processes affecting acoustic fields quality are also considered.

Key words: acoustic field, acoustic resistance, acoustic energy penetration coefficient, reverberation.

References

1. Elahovskij, D. V. (2013). "Povyshenie motivacionnoj sostavljajushhej fizicheskogo obrazovanija studentov stroitel'noj special'nosti vuza", *Fizicheskoe obrazovanie v vuzah*, t. 19, № 4, pp. 74–81 (in Russian).
2. Elahovskij, D. V. (2015). "Jelementy arhitekturnoj klimatologii kak fragmenty fizicheskogo obrazovanija studentov stroitel'noj special'nosti universitetov", *Koncept*, № 05 (maj). Available at: http://e-koncept.ru/2015/15146.htm (in Russian).
3. Gusev, N. M. (1975). *Osnovy stroitel'noj fiziki*, Strojizdat, Moscow (in Russian).
4. Todes, O. M. (1972*). Kurs lekcij i zadanij po stroitel'noj fizike*, Leningrad (in Russian).
5. Elahovskij, D. V. & Malinenko, I. A. (2008). *Fizicheskie osnovy arhitekturnoj akustiki: ucheb. posobie*, Izd-vo PetrGU, Petrozavodsk (in Russian).

Рекомендовано к публикации:
Горевым П. М., кандидатом педагогических наук,
главным редактором журнала «Концепт»

Поступила в редакцию *Received*	05.11.15	Получена положительная рецензия *Received a positive review*	07.11.15
Принята к публикации *Accepted for publication*	07.11.15	Опубликована *Published*	29.01.16

ISSN 2304-120X
www.e-koncept.ru

© Концепт, научно-методический электронный журнал, 2016
© Елаховский Д. В., 2016