

# Техническая акустика и защита от шума



Лекция №4

Источники звука. Звуковая энергия.

Плотность звуковой энергии.

# 18 Источники звука. Звуковая энергия. Плотность звуковой энергии.

- Звуковые волны – результат колебательного процесса. Всякое колебание связано с нарушением равновесного состояния системы и выражается в отклонении её характеристик от равновесных значений с последующим возвращением к исходному значению. Для звуковых колебаний такой характеристикой является давление в точке среды, а её отклонение — **звуковым давлением**.

- ▶ Источники звука бывают естественными (голосовые связки, звуки природы) и искусственные (камертон, струна).
- ▶ Звуковая энергия ( $W$ ) — энергия колебаний частиц среды, переносящей звуковые волны. Измеряется в Джоулях.
- ▶ Плотность звуковой энергии — величина, равная отношению звуковой энергии  $dW$ , содержащейся в элементе среды, к объёму  $dV$  этого элемента [Дж/м<sup>3</sup>].

$$\omega = \frac{dW}{dV}$$

Другими словами плотность энергии звуковой волны можно представить в виде суммы плотностей ее кинетической и потенциальной энергий:

$$\omega = \omega_{\text{пот}} + \omega_{\text{кин}} = \frac{\rho v^2}{2} + \frac{\beta P^2}{2}$$

$\rho$  – плотность среды,

$v$  – колебательная скорость частиц,

$P$  – звуковое давление,

$\beta = \frac{1}{\rho c^2}$  – сжимаемость среды,  $c$  – скорость звука.

# 19 Звуковое давление. Уровень звукового давления. Объемная скорость

**Звуко́вое давлéние** — переменное избыточное давление, возникающее в упругой среде при прохождении через неё звуковой волны. Единица измерения — паскаль (Па). Мгновенное значение звукового давления в точке среды изменяется как со временем, так и при переходе к другим точкам среды, поэтому практический интерес представляет среднеквадратичное значение данной величины, связанное с интенсивностью звука:



$$I = \frac{\langle p^2 \rangle_t}{Z_s}$$

$I$  – интенсивность звука, Вт/м<sup>2</sup>,  $Z_s$  – удельное акустическое сопротивление среды,  $\langle p^2 \rangle_t$  – квадрат звукового давления, усредненный по времени.

При рассмотрении периодических колебаний иногда используют амплитуду звукового давления; так, для синусоидальной волны

$$p = p_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi);$$

$$\langle p^2 \rangle_t = \frac{\pi \cdot p_0^2}{\omega}.$$

▣ Уровень звукового давления (англ. *SPL*, *Sound Pressure Level*) — измеренное по относительной шкале значение звукового давления, отнесённое к опорному давлению  $p_0=20$  мкПа, соответствующему порогу слышимости синусоидальной звуковой волны частотой 1 кГц, дБ:

$$N = 20 \lg \frac{p}{p_0} = 20 \lg \frac{p}{20 \cdot 10^{-6} \text{Па}}$$

Уровни звукового давления от различных источников

0 дБ SPL — специальная измерительная камера;

5 дБ SPL — почти ничего не слышно;

10 дБ SPL — почти не слышно — шёпот, тиканье часов, тихий шелест листьев;

15 дБ SPL — едва слышно — шелест листьев;

20 дБ SPL — едва слышно — уровень естественного фона на открытой местности при отсутствии ветра, норма шума в жилых помещениях;

25 дБ SPL — тихо — сельская местность вдали от дорог;

30 дБ SPL — тихо — настенные часы;

35 дБ SPL — хорошо слышно — приглушённый разговор;

40 дБ SPL — хорошо слышно — тихий разговор, учреждение (офис) без источников шума, уровень звукового фона днём в городском помещении с закрытыми окнами выходящими во двор;

50 дБ SPL — отчётливо слышно — разговор средней громкости, тихая улица, стиральная машина;

60 дБ SPL — шумно — обычный разговор, норма для контор;

65 дБ SPL — шумно — громкий разговор на расстоянии 1 м;

70 дБ SPL — шумно — громкие разговоры на расстоянии 1 м, шум пишущей машинки, шумная улица, пылесос на расстоянии 3 м;

75 дБ SPL — шумно — крик, смех с расстояния 1 м; шум в железнодорожном вагоне;

80 дБ SPL — очень шумно — громкий будильник на расстоянии 1 м; крик; мотоцикл с глушителем; шум работающего двигателя грузового автомобиля;

85 дБ SPL — очень шумно — громкий крик, мотоцикл с глушителем;

90 дБ SPL — очень шумно — громкие крики, пневматический отбойный молоток, тяжёлый дизельный грузовик на расстоянии 7 м, грузовой вагон на расстоянии 7 м;

95 дБ SPL — очень шумно — вагон метро на расстоянии 7 м;

100 дБ SPL — крайне шумно — громкий автомобильный сигнал на расстоянии 5—7 м, кузнечный цех, очень шумный завод;

110 дБ SPL — крайне шумно — шум работающего трактора на расстоянии 1 м, громкая музыка, вертолёт;

115 дБ SPL — крайне шумно — пескоструйный аппарат на расстоянии 1 м, мощный автомобильный сабвуфер;

120 дБ SPL — почти невыносимо — болевой порог, **гром** (иногда до 120 дБ), отбойный молоток, **вувузела** на расстоянии 1 м;



- 130 дБ SPL — боль — [сирена](#), шум [клёпки](#) котлов;
- 140 дБ SPL — травма внутреннего уха — взлёт реактивного самолёта на расстоянии 25 м, максимальная громкость на [рок-концерте](#);
- 150 дБ SPL — контузия, травмы — взлёт ракеты на Луну с экипажем, на расстоянии 100 м, реактивный двигатель на расстоянии 30 м, соревнования по автомобильным звуковым системам;
- 160 дБ SPL — шок, травмы, возможен разрыв барабанной перепонки — выстрел из ружья близко от уха; ударная волна от сверхзвукового самолёта или [взрыва](#) давлением 0,002 МПа;
- 168 дБ SPL — шок, травмы, возможен разрыв барабанной перепонки — выстрел из винтовки [M1 Garand](#) на расстоянии 1 м;
- 170 дБ SPL — световумовая граната, воздушная [ударная волна](#) давлением 0,0063 МПа;
- 180 дБ SPL — световумовая граната, воздушная ударная волна давлением 0,02 МПа, длительный звук с таким давлением вызывает смерть;
- 190 дБ SPL — воздушная ударная волна давлением 0,063 МПа;
- 194 дБ SPL — воздушная ударная волна давлением 0,1 МПа, равным [атмосферному давлению](#), возможен разрыв лёгких;
- 200 дБ SPL — воздушная ударная волна давлением 0,2 МПа, возможна смерть;
- 210 дБ SPL — воздушная ударная волна давлением 0,63 МПа;
- 220 дБ SPL — воздушная ударная волна давлением 2 МПа;
- 230 дБ SPL — воздушная ударная волна давлением 6,3 МПа;
- 240 дБ SPL — воздушная ударная волна давлением 20 МПа;
- 249,7 дБ SPL — максимальное давление 61 МПа воздушной ударной волны при [взрыве тринитротолуола](#)<sup>[1]</sup>. Давление ударных волн при обычном взрыве может быть больше (максимальное — [давление детонации](#)), но это будет ещё не воздушная, а начальная взрывная ударная волна, образованная разлётом продуктов детонации;
- 260 дБ SPL — ударная волна давлением 200 МПа;
- 270 дБ SPL — ударная волна давлением 632 МПа;
- 280 дБ SPL — ударная волна давлением 2000 МПа;
- 282 дБ SPL — 2500 МПа — максимальное давление воздушной ударной волны при [ядерном взрыве](#)<sup>[2]</sup>. Максимальное давление продуктов реакции в момент ядерного взрыва гораздо больше — до 100 млн. МПа.
- 300 дБ SPL — 20 000 МПа — среднее [давление детонации](#) обычных взрывчатых веществ;
- 374 дБ SPL — 100 млн МПа — давление в ядерном заряде в момент ядерного взрыва;

Объёмная скорость ( $V$ ) – поток колебательной скорости частиц через данную поверхность.

$$V = \iint v \cdot n \cdot dS$$

где  $v$  – вектор колебательной скорости частиц в данной точке поверхности,  $n$  – единичный вектор нормали к поверхности в этой точке,  $dS$  – элемент площади поверхности  $S$ , для которой вычисляется  $V$ .

- ▶ **КОЛЕБАТЕЛЬНАЯ СКОРОСТЬ ЧАСТИЦ** – скорость, с которой движутся частицы среды, колеблющиеся при прохождении звуковой волны около положения равновесия, по отношению к среде в целом.

$$V = \frac{p}{\rho c}$$

- ▶ К примеру, вблизи двигателя реактивного самолёта  $V=2,5$  м/с.

# 20 Понятия акустического сопротивления и импеданса

Акустический импеданс

(англ. impedance от лат. impedio — препятствую) — комплексное акустическое сопротивление среды, представляющее собой отношение комплексных амплитуд звукового давления к колебательной объёмной скорости.

В общем случае, акустический импеданс выражается как:

$$Z_a = R_a + iX_a$$

$i$  – мнимая единица;

$R_a$  – активное акустическое сопротивление, определяется диссипацией энергии в самой акустической системе и потерями на излучение звука;

$X_a$  – реактивное акустическое сопротивление, является следствием наличия в акустической системе сил упругости или инерции масс. Поэтому реактивное сопротивление бывает упругим или инерционным

□ Единицей измерения акустического импеданса в системе СИ является —

$$\frac{\text{Па} \cdot \text{с}}{\text{м}^3}$$

Её устаревшее название — акустический ом.

## 21 Единицы измерения уровней звука (бел, непер)

- 1) **Бел** (сокращение: В) — безразмерная единица измерения отношения (разности уровней) некоторых величин (например, энергетических — мощности и энергии или „силовых“ — напряжения и силы тока) по логарифмической шкале.

Согласно ГОСТ бел определяется как «логарифмическая величина (десятичный логарифм безразмерного отношения физической величины к одноименной физической величине, принимаемой за исходную)

Для одноименных энергетических величин:

$$1B = \lg \frac{P}{P_0} \text{ при } P = 10 P_0$$

- ▶ Бел впервые был введен в использование инженерами из телефонной лаборатории Белла (Александр Грейам Белл).
- ▶ Используют различные кратные и дольные единицы Бел. Декабел – даВ (даБ), децибел – дВ (дБ).



2) **Не́пер** — безразмерная единица измерения отношения двух величин. Непер не входит в систему единиц СИ, однако, по решению Генеральной конференции по мерам и весам, допускается его применение без ограничений совместно с СИ. Единица названа в честь Джона Непера, который ввёл в математику понятие логарифма. Русское обозначение — Нп; международное — Np.

□ Так же, как бел и децибел, непер является единицей логарифмической шкалы. Разница между ними в том, что отношение величин, выраженное в беллах (децибеллах), предполагает использование десятичных логарифмов, тогда как для отношения в неперах используются натуральные логарифмы. Отношение величин  $x_1$  и  $x_2$  в неперах:

$$N = \ln \frac{x_1}{x_2} = \ln x_1 - \ln x_2$$

□ Неперы можно выразить через децибелы и наоборот:

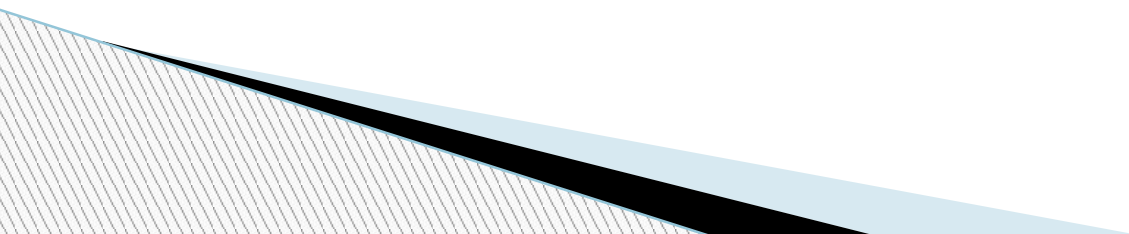
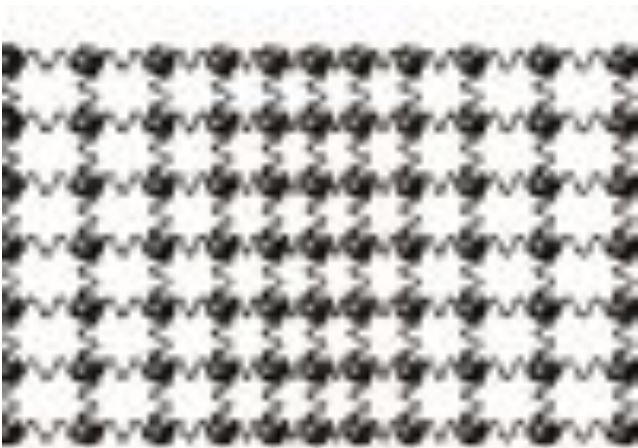
$$1\text{Np} = 20\log_{10}e \text{ dB} \approx 8,686\text{dB}$$
$$1\text{dB} = \frac{1}{20\log_{10}e} \text{ Np} \approx 0,115 \text{ Np}$$

## 22 Условный порог звукового давления. Формулы для вычисления продольных и поперечных звуковых колебаний

Условный порог звукового давления – это минимальная величина звукового давления, воспринимаемая человеческим ухом как звук. Международным соглашением пороговое звуковое давление установлено равным

$$20 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$$

# Продольные и поперечные волны



Для продольной волны амплитуда движения каждой равно распределённой в пространстве частицы одинакова, а их положение можно определит так:

$$x_0 = A \sin(\omega t); x_1 = A \sin(\omega t + \varphi_0); \\ x_2 = A \sin(\omega t + 2\varphi_0) \dots x_n = A \sin(\omega t + n\varphi_0)$$

$\omega$  – частота волны,  $t$  – время колебаний,  
 $\varphi_0$  – сдвиг по фазе между соседними частицами.

В поперечной волне колебания происходят в направлении, перпендикулярном направлению распространения волны. Как и в случае продольных волн амплитуды колебаний всех шариков одинаковы, а фаза линейно изменяется от шарика к шарика

$$y_0 = B \sin(\omega t); y_1 = B \sin(\omega t + \varphi_0);$$
$$y_2 = B \sin(\omega t + 2\varphi_0) \dots y_n = B \sin(\omega t + n\varphi_0)$$

В общем виде уравнение распространения волны может быть записано в виде

$$z = A(\cos \omega t - kx)$$

где  $z$  – координата, по которой происходит движение частиц,  $x$  – координата оси, вдоль которой распространяется волна,  $k$  – волновое число, равное  $\omega/v$ ,  $v$  – скорость распространения волны.

Зная частоту волны и скорость её распространения, мы можем найти сдвиг фаз между соседними шариками (частицами):

$$\varphi_0 = \frac{\omega}{v} a, \text{ где } a \text{ – расстояние между шариками}$$



Сопряжем поперечные и продольные колебания:

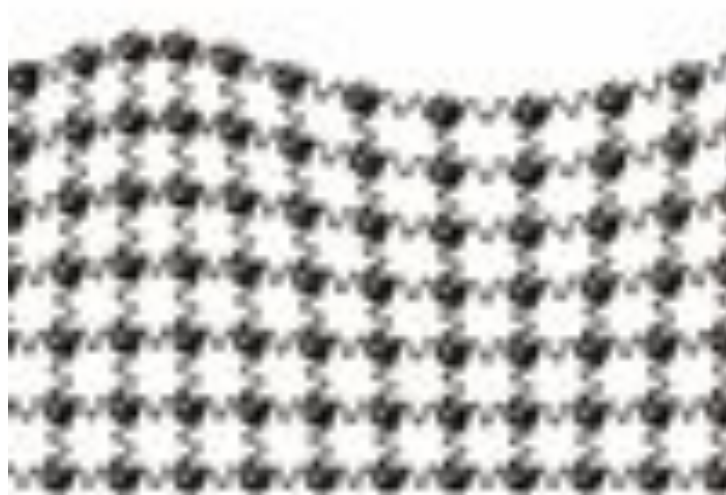


Сдвигка по фазе – 90 градусов.

Каждая частица совершает круговое движение, имеющее следующее уравнение:

$$x = A \cos(\omega t + \varphi_0); y = A \sin(\omega t + \varphi_0)$$

Смоделируем поверхностное натяжение воды и колебания на ее поверхности:



## 23 Расчет скорости распространения звуковых волн в твердой неограниченной среде. Примеры численных значений для различных материалов (железо, бетон, стекло)

В неограниченной твердой среде распространяются как продольные, так и поперечные упругие волны. Для каждой твердой среды скорость распространения продольной волны  $c_p$  всегда больше скорости распространения поперечной волны  $c_s$ .

Обычно выполняется соотношение:

$$c_p > c_s \cdot \sqrt{2}$$

В изотропном твердом теле фазовая скорость для продольной и поперечной волн равна:

$$c_P = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)\rho}},$$

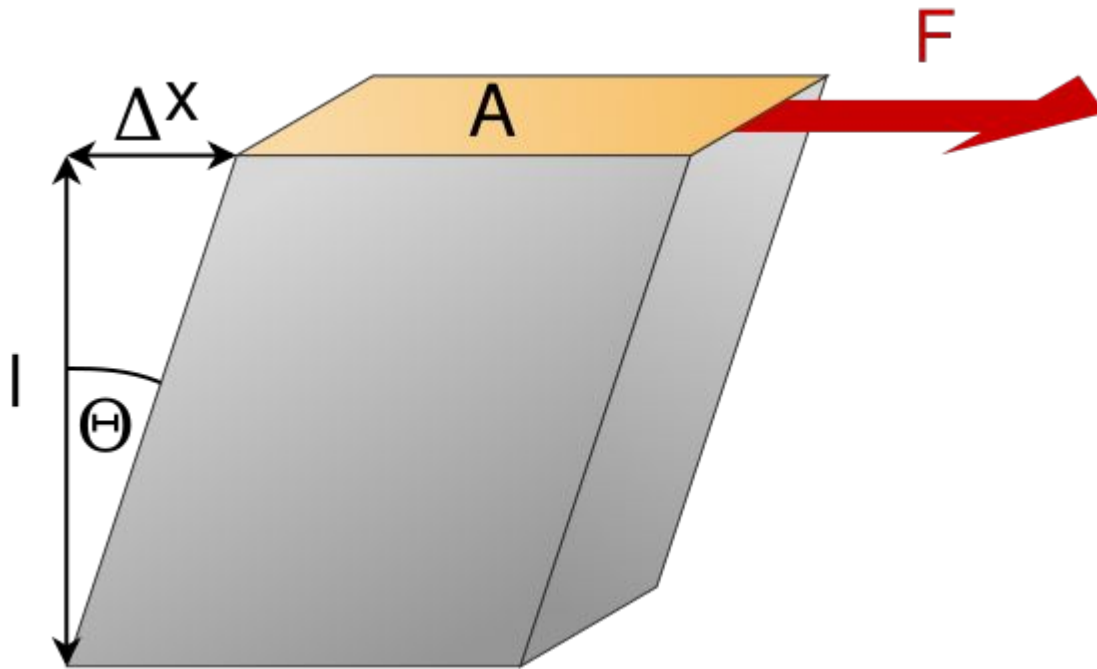
$$c_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2(1 + \nu)\rho}},$$

- ▶ где  $K$  — модуль объемного сжатия;  $G$  — модуль сдвига;  $E$  — модуль Юнга;  $\nu$  — коэффициент Пуассона.

Модуль Юнга — физическая величина, характеризующая свойства материала сопротивляться растяжению/сжатию при упругой деформации.

- ▣ **Объёмный модуль упругости** (модуль объёмного сжатия) — характеристика способности вещества сопротивляться всестороннему сжатию. Эта величина определяет, какое нужно приложить внешнее давление для уменьшения объёма в 2 раза. Например, у воды объёмный модуль упругости составляет около 2000 МПа — это означает, что для уменьшения объёма воды на 1 % необходимо приложить внешнее давление 20 МПа.

Модулем сдвига (обозначается буквой  $G$  или  $\mu$ ), называется отношение касательного напряжения к сдвиговой деформации



Скорость звука для разных типов волн в твердых материалах			
Материал	Продольные волны в протяженных твердых образцах (м/с)	Волны сдвига и кручения (м/с)	Волны сжатия в стержнях (м/с)
Алюминий	6420	3040	5000
Латунь	4700	2110	3480
Свинец	5950	3240	5120
Железо	1960	690	1210
Серебро	3650	1610	2680
Флинтглас	3980	2380	3720
Кронглас	5100	2840	4540
Оргстекло	2680	1100	1840
Полиэтилен	1950	540	920
Полистирол	2350	1120	2240