

Механические колебания и волны

Механические колебания характеризуются величиной **смещения** колеблющейся материальной точки (колеблющегося тела) от положения равновесия.

Колебания, при которых смещение изменяется по закону синуса или косинуса, называются **гармоническими**.

Если колебания происходят под действием внутренних сил системы и начинаются тогда, когда систему выводят из положения равновесия, то такие колебания называются **свободными**.



Уравнение колебаний

Уравнение гармонических колебаний

$$x = A \sin(\omega_0 t + \phi_0),$$

где величины A , ω_0 , ϕ_0 не зависят от времени.

Характеристики гармонических колебаний

A — амплитуда колебаний — максимальное смещение от положения равновесия (максимальное значение изменяющейся величины).

Циклическая (или круговая) частота ω_0 — число полных колебаний, совершаемых системой за промежуток времени 2π секунд.

Частота ν_0 — число полных колебаний, совершаемых системой за 1 с.

Период колебаний T_0 — промежуток времени, за который совершается одно полное колебание.

$$\nu_0 = \frac{1}{T_0} \quad \omega_0 = 2\pi\nu_0 = \frac{2\pi}{T_0}$$

Фаза колебаний $(\omega_0 t + \phi_0)$ определяет положение колеблющейся точки (тела) в данный момент времени, ϕ_0 — начальная фаза, определяющая положение колеблющейся точки в начальный момент времени при $t = 0$.

Кинематические характеристики гармонических колебаний

$$x = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$$

$$v_x = x' = A \omega_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = v_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$$

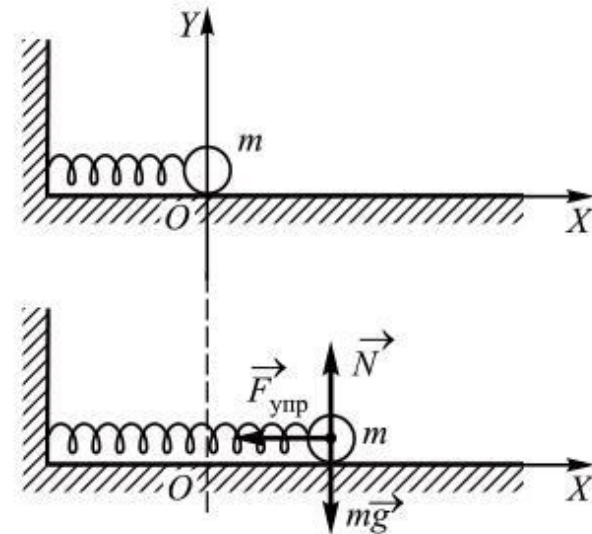
$$v_0 = A \omega_0$$

$$a_x = v'_x = -A \omega_0^2 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) = -a_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$$

$$a_0 = A \omega_0^2$$

$$a_x = -\omega_0^2 x \quad x'' = -\omega_0^2 x$$

$$a_x = -cx \quad \omega_0 = \sqrt{c}$$



Динамика гармонических колебаний

$$ma_x = F_{\text{рав}x}$$

$$a_x = -\omega_0^2 x$$

$$F_{\text{рав}x} = -m\omega_0^2 x$$

$$F_x = -kx$$

Гармонические колебания совершаются под действием **упругих** или **квазиупругих** сил.

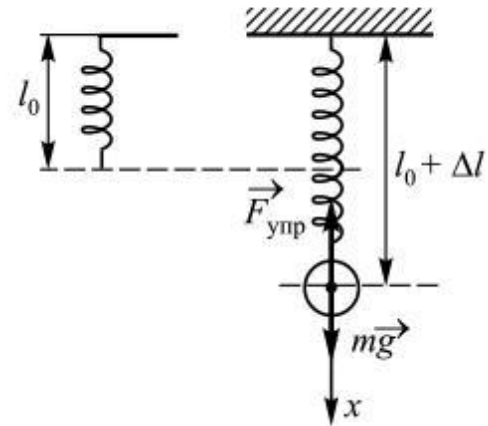
Примеры расчета частоты колебаний в различных механических системах

Пример 1. Тело массой m подвешивается на пружине длиной l_0 с коэффициентом упругости k . Определить период колебаний.

$$F_{\text{т}} = F_{\text{упр}0}, \quad mg = k\Delta l$$

$$\Delta l = mg / k$$

$$l = l_0 + \Delta l = l_0 + mg / k$$



$$m\ddot{a} = \ddot{F}_T + \ddot{F}_{\text{упр}}$$

$$\text{на ось } X : m\ddot{a}_{\text{упр}} = mg - F$$

$$F_{\text{упр}} = k(\Delta l + x)$$

$$m\ddot{a}_x = -kx$$

$$\ddot{a}_x = -\frac{k}{m}x$$

$$\omega_0^2 = \frac{k}{m} \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

Пример 2. Математический маятник представляет собой тело, которое можно считать материальной точкой, подвешенное на длинной невесомой нерастяжимой нити. Длина нити l . Определить период колебаний математического маятника T .

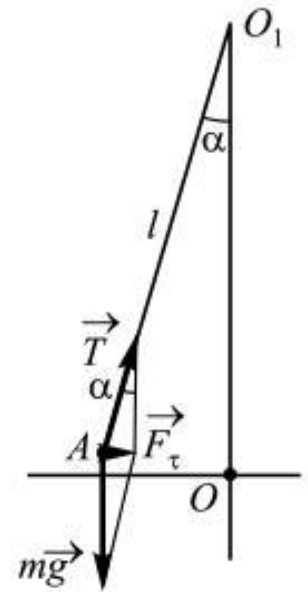
$$F_{\tau} = mgtg\alpha$$

$$x / l = \sin\alpha \approx tg\alpha \approx \alpha$$

$$F_{\tau} \approx F_x = mg\alpha, F_x = T\sin\alpha$$

$$ma_x = -mg \frac{x}{l}$$

$$a_x = -\frac{g}{l}x \quad \omega_0^2 = \frac{g}{l} \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}} \quad T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$



Пример 3. В жидкости плотностью $\rho_{\text{ж}}$ плавает цилиндр высотой h . Если цилиндр поглубже погрузить в жидкость или, напротив, немного вытащить из жидкости, то после того, как его отпустят, цилиндр начнет колебаться. Плотность материала, из которого сделан цилиндр, $\rho_{\text{м}}$. Определить частоту колебаний цилиндра.

$$F_{\text{выт}} = F_{\text{т}} \rho_{\text{ж}} S x_0 g = \rho_{\text{м}} S h g$$

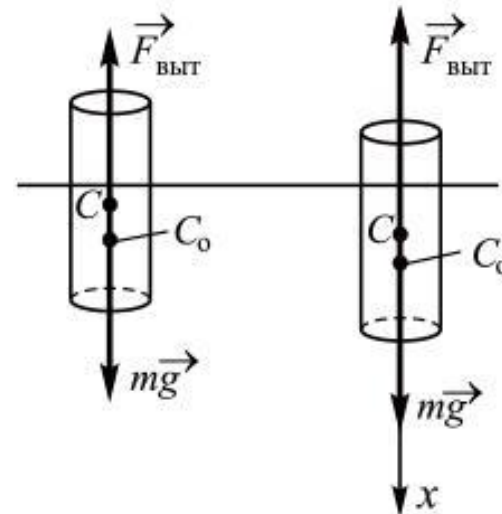
$$x_0 = \frac{\rho_{\text{м}}}{\rho_{\text{ж}}} h$$

$$m a_x = -\rho_{\text{ж}} S g x \quad m = \rho_{\text{м}} V$$

$$\rho_{\text{м}} h S a_x = -\rho_{\text{ж}} S g x$$

$$a_x = -\frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{м}}} \frac{g}{h} x$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{\rho_{\text{ж}} g}{\rho_{\text{м}} h}}$$



Примеры решения задач

Задача 1. Колебания материальной точки происходят относительно положения равновесия по закону: $x = A \sin(\omega t)$ с периодом 12 с. Определите, за какой наименьший промежуток времени t_1 точка удалится от положения равновесия на расстояние, равное половине амплитуды. За какой промежуток времени t_2 она пройдет оставшуюся часть пути до максимального отклонения?

Решение.

В момент времени t_1 смещение $A/2 = A \sin(\omega t_1)$

$$\sin(\omega t_1) = 1/2$$

$$\omega t_1 = \pi/6 \quad 2\pi t_1/T = \pi/6 \quad t_1 = T/12 = 1 \text{ с}$$

$$t_2 = T/4 - T/12 = 2 \text{ с}$$

Задача 2. $x = 0,3 \sin \pi(t + 0,5)$ м. Определите: 1) амплитуду; 2) период колебаний; 3) начальную фазу, а также смещение и ускорение через 0,25 с после начала колебаний.

Решение.

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

$$x = 0,3 \sin [\pi(t + 0,5)]$$

$$A = 0,3, \quad \omega = \pi \text{ с}^{-1}, \quad \varphi_0 = 0,5\pi$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\pi} = 2 \text{ с}$$

$$x = 0,3 \sin \pi(0,25 + 0,5) \approx 0,3 \text{ м},$$

$$a_x = -\omega^2 x \approx -1 \text{ м/с}^2$$

Задача 3. В U-образной трубке находится столбик жидкости длиной l . При кратковременном изменении давления жидкости в одном из колен уровни жидкости сместились, и столбик начал колебаться. Определите частоту колебаний. Трением о стенки пренебечь.

Решение.

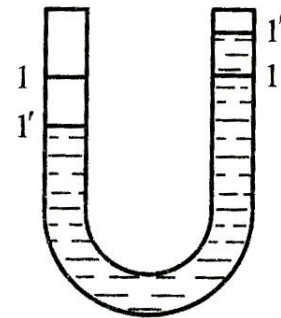
$$F_d = pS = \rho g S 2x$$

$$ma_x = -\rho g 2Sx$$

$$m = \rho l S$$

$$a_x = -\left(\frac{2g}{l}\right)x$$

$$\omega = \sqrt{\frac{2g}{l}}$$



Задача 4. На горизонтальной плите находится груз. Плита колеблется с частотой ω , совершая по вертикали гармонические колебания. При каких амплитудах колебания груз не оторвется от плиты?

Решение.

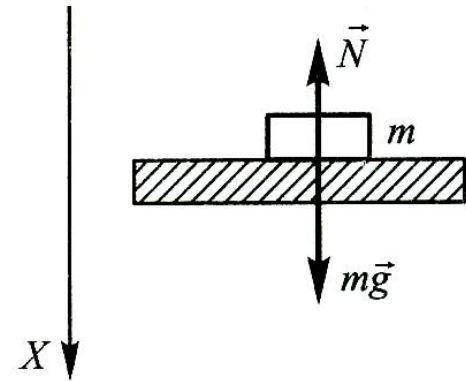
$$ma_x = mg - N$$

$$N = 0 \quad x = A$$

$$x = A \sin(\omega t), \quad a_x = -\omega^2 A \sin(\omega t)$$

$$A - g = -\omega^2 A \quad \omega^2 = \frac{g}{A}$$

$$A \leq g / \omega^2$$



Задача 5. Шарик массой m подвешен на двух пружинах одинаковой длины, но с разными упругими свойствами. Коэффициенты жесткости пружин k_1 и k_2 . Определите частоту колебаний шарика в двух случаях, показанных на рисунках. Массами пружин можно пренебречь.

Решение.

$$mg = - (k_1 + k_2)x_0$$

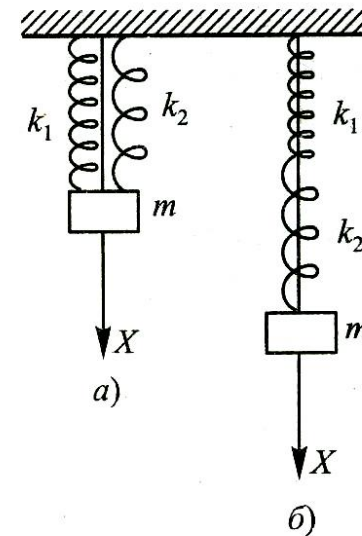
$$F_{\text{упр}x} = - (k_1 + k_2)(x_0 + x)$$

$$ma_x = - (k_1 + k_2)(x_0 + x) + mg$$

$$ma_x = - (k_1 + k_2)x$$

$$a_x = - \frac{(k_1 + k_2)}{m}x$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k_1 + k_2}{m}}$$



$$mg = k_2 x_{20}$$

$$ma_x = -k_2(x_{20} + x_2) + mg$$

$$ma_x = -k_2 x_2$$

$$a_x = x'' \quad x = x_1 + x_2$$

$$k_1(x_{10} + x_1) = k_2(x_{20} + x_2)$$

$$k_1 x_{10} = k_2 x_{20}$$

$$x_2 = \frac{x}{1 + \frac{k_2}{k_1}} = \frac{k_1 x}{k_1 + k_2}$$

$$a_x = -\frac{k_1 k_2}{(k_1 + k_2)m} x \Rightarrow \omega_2 = \sqrt{\frac{k_1 k_2}{(k_1 + k_2)m}}$$

Преобразование энергии при гармонических колебаниях

$$x = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$$

$$W_{\text{кин}} = \frac{m v_x^2}{2} = \frac{m A^2 \omega_0^2 \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0)}{2}$$

$$W_{\text{кин max}} = W = \frac{m A^2 \omega_0^2}{2}$$

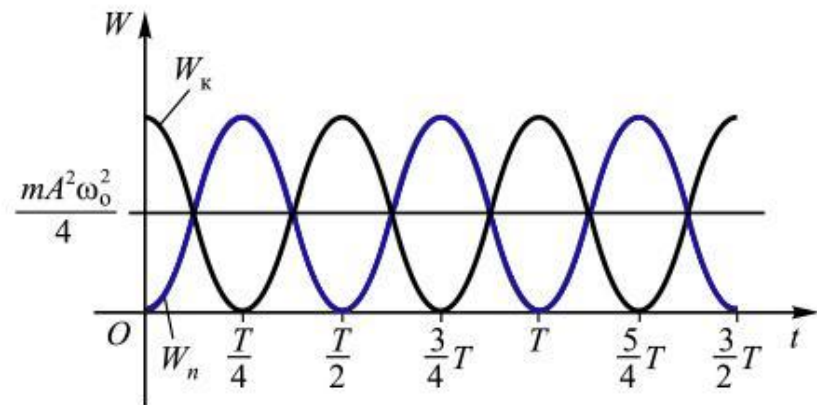
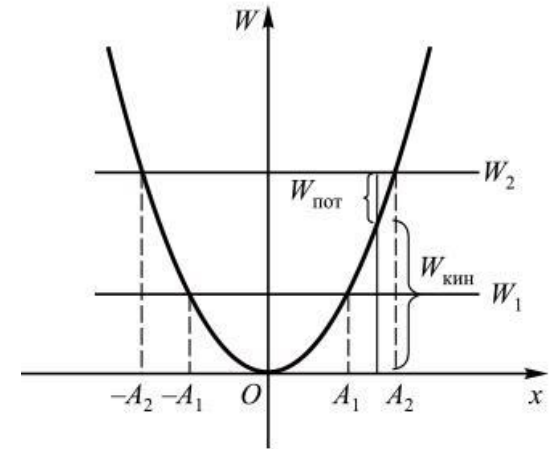
$$W_{\text{пот}} = W_0 - W_{\text{кин}} = \frac{m A^2 \omega_0^2}{2} [1 - \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0)] =$$

$$\frac{m \omega_0^2 A^2 \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0)}{2} = \frac{m \omega_0^2 x^2}{2} = \frac{k x^2}{2}$$

$$A = \frac{1}{\omega_0} \sqrt{\frac{2W_0}{m}}$$

$$W_{\text{пот}} = \frac{m A^2 \omega_0^2}{4} [1 - \cos 2(\omega_0 t + \varphi_0)]$$

$$W_{\text{кин}} = \frac{m A^2 \omega_0^2}{4} [1 + \cos 2(\omega_0 t + \varphi_0)]$$



Сложение колебаний, направленных вдоль одной прямой

$$x_1 = A_1 \cdot \sin(\omega_0 t), \quad x_2 = A_2 \cdot \sin(\omega_0 t + \Delta\varphi)$$

$$x = x_1 + x_2 = A_1 \cdot \sin(\omega_0 t) + A_2 \cdot \sin(\omega_0 t + \Delta\varphi)$$

$$\Delta\varphi = \pm 2\pi n, n = 0, 1, 2, \dots$$

$$x = (A_1 + A_2) \sin(\omega_0 t)$$

$$\Delta\varphi = \pm(2n + 1)\pi$$

$$x = (A_1 - A_2) \sin(\omega_0 t)$$

$$|A_1 - A_2| < A < A_1 + A_2$$

Задача 9. Шарик массой 10 г совершает гармонические колебания с амплитудой $A = 0,2$ м и периодом $T = 4$ с. В момент $t_0 = 0$ смещение шарика $x = A$. Найдите кинетическую и потенциальную энергию в момент времени $t_1 = 1$ с.

Решение.

$$W_{\text{кин max}} = W_0 = \frac{mv_{\text{max}}^2}{2}$$

$$v_{\text{max}} = A\omega = A\frac{2\pi}{T}$$

$$W_{\text{кин max}} = W_0 = \frac{mA^2 4\pi^2}{2T^2} = \frac{2mA^2\pi^2}{T^2}$$

Затухающие колебания

$$\vec{F}_2 = -r\vec{V} \quad F_{2x} = rV_x$$

$$ma_x = -kx - rV_x$$

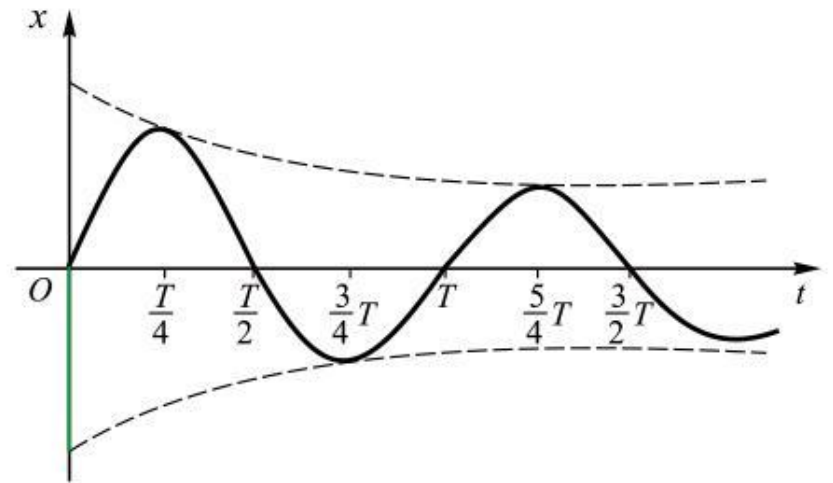
$$a_x = -\omega_0^2 x - 2\beta v_x$$

$$\omega_0^2 = k/m \quad \beta = \frac{r}{2m}$$

коэффициент затухания

$$x = A_0 e^{-\beta t} \sin(\omega t + \varphi_0)$$

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} \quad T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}$$



Вынужденные колебания

$$F_{\text{вын.}x} = F_0 \sin(\Omega t),$$

$$m a_x = -kx - r v_x + F_0 \sin(\Omega t)$$

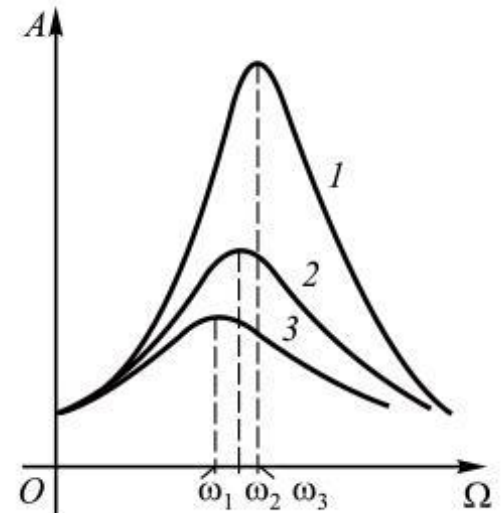
$$x = A \sin(\Omega t + \alpha_0)$$

$$A = \frac{F_0 / m}{\sqrt{(\omega_0^2 - \Omega^2)^2 + 4\beta^2 \Omega^2}} \quad \text{tg} \alpha_0 = -\frac{2\beta \Omega}{\omega_0^2 - \Omega^2}$$

$$\text{arctg} \alpha_0 \rightarrow -\pi / 2$$

$$x = -A \cos(\Omega t)$$

$$v_x = x' = A \Omega \sin(\Omega t)$$



Задача 11. При какой скорости поезда маятник длиной l , подвешенный к потолку вагона, начнет сильно раскачиваться. Расстояние между стыками рельсов равно s .

Решение.

$$v = \frac{s}{T} \quad v_0 = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}$$

$$v = v_0$$

$$v = s / 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

Задачи для самостоятельного решения.

1. Во сколько раз изменится период колебаний математического маятника при увеличении длины нити в 2 раза?
2. Математический маятник, длина нити которого равна 1 м, находится в лифте, движущемся с ускорением $g/2$, направленным вниз.
Чему равен период колебаний маятника?
3. Шарик на пружине совершает гармоническое колебание с амплитудой A . Какое расстояние проходит шарик за половину периода?
4. Чему равна начальная фаза в уравнении $x = A \sin(\omega t + \phi_0)$, если при $t = 0$ $x = A/2$.
5. Во сколько раз изменится период колебаний шарика, подвешенного на пружине, если пружину разрезать пополам и его подвесить к одной из половин?
6. Имеется два одинаковых математических маятника. Нити маятников отводятся на малые углы α и 2α и одновременно отпускают. Какой из маятников первым пройдет положение равновесия?

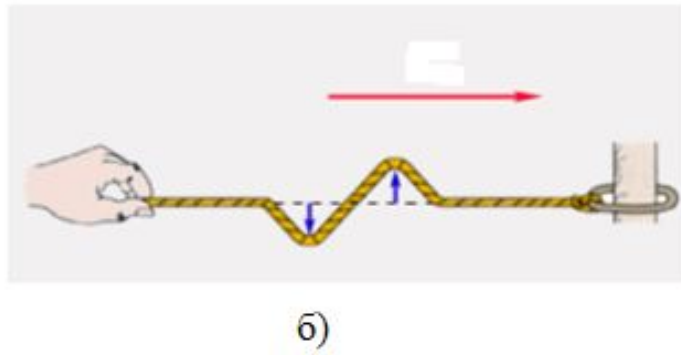
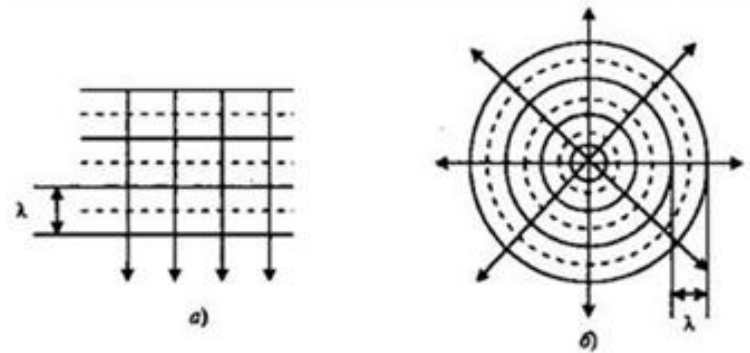
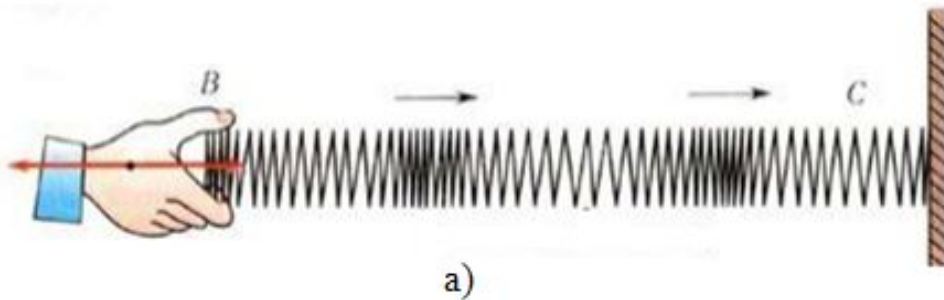
Спасибо за внимание

Механические волны

Упругие (механические) волны.

Классификация волн

1. Продольная и поперечная волны
2. По фронту волны: плоская, сферическая



$$y = A \sin \omega t$$

$$\lambda = vT$$

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

Кинематическое уравнение плоской бегущей волны

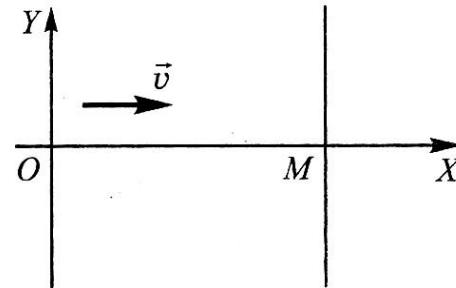
$$y_0 = A \sin(\omega t),$$

$$y_M = A \sin(\omega t')$$

$$t' = t - \tau = t - \frac{x_M}{v}$$

$$y_M = A \sin \omega \left(t - \frac{x_M}{v} \right)$$

$$y = A \sin \left(t - \frac{x}{v} \right)$$



Длина волны – расстояние между точками, разность фаз колебаний в которых, равна 2π

Скорость волны и скорость колебаний

$$u_y = y' = A \omega \cos \omega \left(t - \frac{x}{v} \right)$$

Интерференция волн

Интерференция — явление наложения волн в пространстве с образованием устойчивой во времени картины максимумов и минимумов амплитуды колебаний частиц среды.

Когерентными называются источники, вызывающие в каждой точке пространства колебания с одинаковой частотой и разность фаз которых остается постоянной во времени.

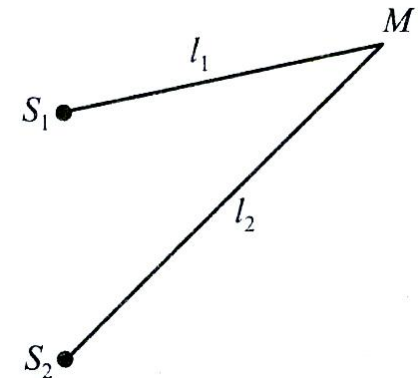
$$y_1 = A_1 \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{l_1}{\lambda} \right) \quad y_2 = A_2 \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{l_2}{\lambda} \right)$$

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = 2\pi \frac{l_1 - l_2}{\lambda} = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) \Delta l$$

$$\Delta\varphi = \pm 2\pi n, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

$$2\pi \frac{\Delta l}{\lambda} = \pm 2\pi n, \quad \Delta l = \pm n\lambda \quad A = A_1 + A_2$$

$$\Delta\varphi = \pm(2n + 1)\pi \quad \Delta l = \pm(2n + 1) \frac{\lambda}{2} \quad A = A_1 - A_2$$



Когерентные источники:

$$W \sim A^2 = \text{максимумы} (I_1 = I_2)$$

$$W = \text{минимумы}$$

$$\overline{W} = \frac{4A_1^2 + 0}{2} = 2A_1^2$$

Некогерентные источники:

$$W_1 \sim A_1^2 \quad W_2 \sim A_2^2$$

$$W = W_1 + W_2 \sim A_1^2 + A_2^2 = \left(I_{cp} \right)^2$$

$$A_1 = A_2, W \approx 2A_1^2$$

Стоячая волна

$$y_{\text{пр}} = A \sin 2\pi \left[\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right] \quad y_{\text{обр}} = A \sin 2\pi \left[\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda} \right]$$

$$y_{\text{ст}} = y_{\text{пр}} + y_{\text{обр}} = 2 \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} x \right) \sin(\omega t)$$

–кинематическое уравнение стоячей волны

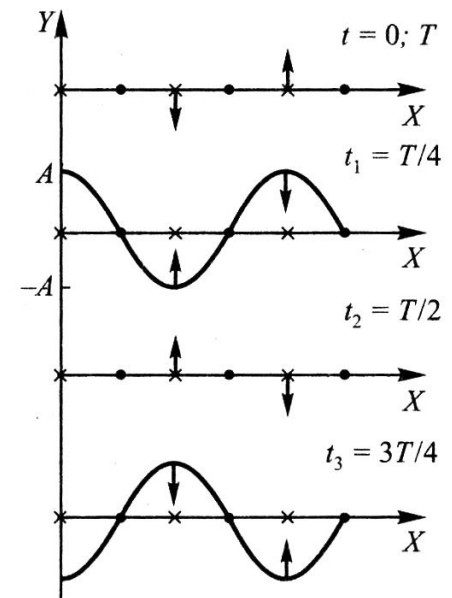
$$A_{\text{ст}} = 2A \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} x \right)$$

$$2\pi \frac{x}{\lambda} = \pi n \quad n = 0, 1, 2 \dots$$

$$x = n \frac{\lambda}{2} \quad A_{\text{ст}} = 2A \quad (\text{пучности волны})$$

$$2\pi \frac{x}{\lambda} = (2n+1) \frac{\pi}{2} \quad x = (2n+1) \frac{\lambda}{4}$$

(узлы стоячей волны)



Сравнение стоячей и бегущей волн

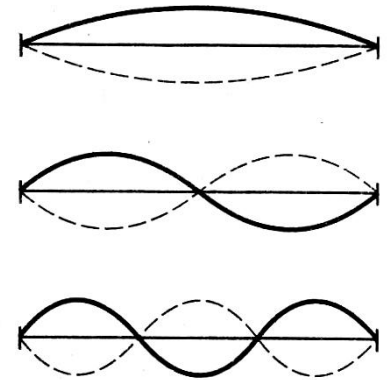
	Бегущая волна	Стоячая волна
Уравнение	$y = A \sin 2\pi \left[\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right]$	$y = 2A \cos \left(\frac{2\pi x}{\lambda} \right) \sin$
Амплитуда	Одинакова во всех точках и равна A .	Зависит от положения колеблющейся частицы (воздуха, резинового шнура и т. д.) $0 \leq A_{\text{ст}} \leq 2A$
Фаза	Зависит от положения колеблющейся точки	Одинакова между двумя соседними узлами

$L = \lambda/2, \lambda = 2L$. ν_1 – основной тон.

Частоты колебаний, возбужденных этими волнами,
кратны ν_1 : $n\nu_1$,

$n = 1, 2, 3, \dots$

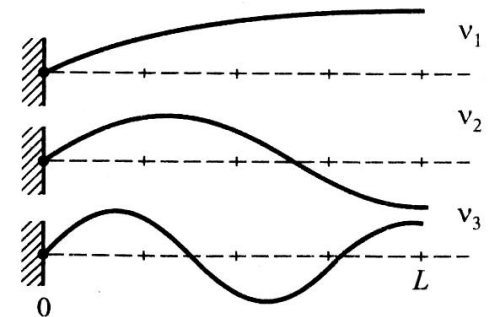
Эти частоты, на которых возникают стоячие волны,
называются *собственными* или *резонансными частотами*.



$$\lambda = 4L, \nu_1 = \frac{v}{4L}$$

резонансные частоты равны $\nu_n = n \frac{v}{4L} = n\nu_1$

$n = 1, 2, 3, \dots$



Звуковые волны

ν – 16 Гц – 20 кГц 16 Гц

$\nu < 16$ Гц – *инфразвук*, $\nu > 20$ кГц – *ультразвук*

$$y = A \sin 2\pi \left[\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right]$$

Вещество	Скорость звука, м/с	Вещество	Скорость звука, м/с
Воздух (20 °C)	343	Вода	1440
Воздух (0 °C)	331	Железо	≈ 5000
Водород	1300	Стекло	≈ 4500
Гелий	1005	Древесина	≈ 4000

$$v \approx 331 + 0,6t^{\circ}\text{C} \text{ (м/с)}$$

Объективные и субъективные характеристики звука

Объективные характеристики звука	Субъективные характеристики звука
Интенсивность волны	Громкость
Частота	Высота тона
Набор гармоник	Окраска звука (тембр, качество звука)

$I = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2$ (порог слышимости)

$I = 1 \text{ Вт/м}^2$ (порог болевого ощущения)

Задача 1. Источник частотой 1000 Гц и амплитудой $A = 0,5$ мм возбуждает в упругом шнуре волны длиной $\lambda = 0,35$ м.

Найдите:

- 1) скорость распространения колебаний в шнуре v ,
- 2) максимальную скорость колеблющихся точек шнура $u_{\max}$.

Решение.

$$1) v = \lambda \nu = 0,35 \cdot 1000 \text{ м/с} = 350 \text{ м/с}.$$

$$2) u_{\max} = A\omega = A \cdot 2\pi\nu = 5 \cdot 10^{-4} \cdot 2\pi \cdot 1000 \text{ м/с} = \pi \text{ м/с}.$$

Задача 2. В среде распространяется волна со скоростью $v = 720$ м/с при частоте источника 600 Гц. Определите разность фаз колебаний в двух точках, отстоящих друг от друга на расстоянии $\Delta x = 0,2$ м.

Решение.

$$y_M = A \sin \left[\omega t - \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) x_M \right] = A \sin \varphi$$

$$y_N = A \sin \left[\omega t - \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) x_N \right] = A \sin \varphi_N$$

$$\Delta \varphi = \varphi_N - \varphi_M = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) (x_M - x_N) = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) \Delta x$$

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi v \Delta x}{v} = \frac{\pi}{3}$$

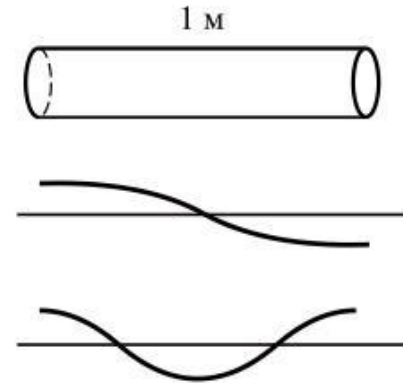
Задача 3. Труба длиной 1 м открыта с обоих концов. Определите самую низкую резонансную частоту в трубе, скорость звука в воздухе равна 330 м/с.

Решение.

$$v = \frac{v_{\text{зв}}}{\lambda}$$

$$\lambda_{\text{max}} = l / 2$$

$$v_1 = \frac{v_{\text{зв}}}{\lambda} = \frac{v_{\text{зв}}}{2l} = 165$$



Задача 4. Выстрел произведен вертикально вверх. Какова начальная скорость пули v_0 , если звук выстрела и пуля достигают одновременно высоты $h = 850$ м? Скорость звука в воздухе $v_{\text{зв}} = 340$ м/с.

Решение.

$$y_{\text{зв}} = v_{\text{зв}} t_2 \quad y_0 = v_0 t - \frac{gt^2}{2}$$

$$y_1 = y_2 = h, \quad t_1 = t_2 = t$$

$$t = \frac{h}{v_{\text{зв}}} \quad h = \frac{v_0 h}{v_{\text{зв}}} - \frac{gh^2}{2v_{\text{зв}}^2}$$

$$v_0 = \frac{\left(h + \frac{gh^2}{2v_{\text{зв}}^2}\right) \cdot v_{\text{зв}}}{h} = \left(1 + \frac{gh}{2v_{\text{зв}}^2}\right) v_{\text{зв}} = 352 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Задачи и тесты для самостоятельного решения

1. Возбуждается поперечная волна в упругом стержне. Как изменится скорость распространения волны в стержне и амплитуда колебаний в разных точках стержня при увеличении периода колебаний в источнике? При этом энергия источника волн постоянна.

Для каждой величины выберите соответствующий характер изменения:

- 1) увеличится;
- 2) уменьшится;
- 3) не изменится.

Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины.

Скорость распространения волны	Амплитуда колебаний

- 2.** С берега высотой 5 м горизонтально бросают камень со скоростью 10 м/с. Скорость бегущей волны, образующейся на поверхности воды, равна 6 м/с. Через какой промежуток времени с момента броска камня волна дойдет до берега?
- 3.** По длинному шнуру начинает бежать волна со скоростью 200 м/с. Амплитуда колебаний точек шнура равна 5 см, частота колебаний 5 Гц. Запишите уравнение бегущей волны, взяв за начало отсчета координаты конец шнура ($x = 0$), а начало отсчета времени — с момента начала колебаний этого конца.
- 4.** Уравнение волны имеет вид $s = 0,2 \sin \left[20\pi \left(t - \frac{x}{300} \right) \right]$. Определите амплитуду и период колебаний точек среды, длину волны и запишите уравнение колебаний в точке, находящейся на расстоянии 15 м от источника.
- 5.** Волна распространяется вдоль прямой со скоростью 50 м/с. Определите разность фаз колебаний в точках, находящихся на этой прямой и отстоящих на расстоянии 50 см друг от друга. Период колебаний 0,05 с.
- 6.** Чему равна длина струны, если при ее укорачивании на 10 см частота колебаний увеличивается в 1,5 раза?

Спасибо за внимание!