

## Ф И З И К А

### Часть 3. Оптика. Элементы физики твердого тела (физика конденсированного состояния вещества)

1. Колебания и волны.
2. Волновая оптика.
3. Элементы физики твердого тела.

<b>27</b>	<b>Лекций</b>	<b>(5)</b>	
<b>18</b>	<b>Практических занятий</b>	<b>(15)</b>	
<b>18</b>	<b>Лабораторных работ</b>	<b>(20)</b>	
<b>2</b>	<b>Теоретических коллоквиума</b>	<b>(100)</b>	
<b>2</b>	<b>ИДЗ</b>	<b>(50)</b>	
<b>2</b>	<b>Контрольные</b>	<b>(85)</b>	
<b>1</b>	<b>Конспект</b>	<b>(40)</b>	

# Литература

1. Ю.И. Тюрин, И.П. Чернов, Ю.Ю. Крючков.  
ФИЗИКА, Ч.3. Оптика. Квантовая физика.
2. И.В. Савельев, КУРС ФИЗИКИ Ч.3;
3. А.А. Детлаф, Б.М.Яворский КУРС  
ФИЗИКИ.
- 4.Т.И. Трофимова. Курс физики.
5. Фейнмановские лекции по физике.
6. С.И. Кузнецов. Колебания и волны.

# Развитие оптики и квантовой физики

Оптика - раздел физики, который изучает распространение световых волн и их взаимодействие с веществом. Разделы оптики: геометрическая, волновая, физиологическая.

Математическая основа волновой оптики-уравнения Максвелла (  $n = \sqrt{\epsilon\mu}$  ). В ряде случаев при экстремальных значениях ЭМ полей и интенсивностей света используется нелинейная оптика.

Процессы испускания и поглощения света рассматриваются в рамках квантовой физики.

Создание лазеров стимулировало новые направления развития оптики (*когерентная оптика, адаптивная оптика, силовая оптика*).

Иногда используется термин *прикладная оптика*, в которую, в частности, входят оптоэлектроника (*конструирование вычислительных машин*), интегральная оптика (*конструкции волноводов, преобразователей излучения и др.*), оптическая дальнометрия (*локация, оптическая связь*).

Физиологическая оптика изучает строение и работу аппаратов зрения.

# Историческая справка

**1590 г** изобретен микроскоп;

**1609 г.** телескоп;

**1620 г.** открыты законы преломления света;

**1665 г.** открыты дифракция и интерференция.

Начало развития волновой оптики относится к 1800 г. (опыт Юнга). Исследования 1848 - 1888 гг. показали, что свет это электромагнитная волна, определена скорость света. Параллельно, с 1860 г. развивается квантовая теория света.

1924 г. выдвинута гипотеза Де-Бройля.

1926 г. записано уравнение Шредингера.

1954 г. наиболее важное открытие современной оптики – создание лазера.

Сегодня: \*

# Тема 1 ГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

1.1 Виды и признаки колебаний

1.2 Параметры гармонических колебаний

1.3 Скорость и ускорение колеблющегося тела

1.4 Основное уравнение динамики гармон. колебаний

1.5 Энергия гармонических колебаний

1.6 Гармонический осциллятор

## Примеры колебательных процессов



**Круговая волна на поверхности жидкости, возбуждаемая точечным источником (гармонически колеблющимся шариком).**

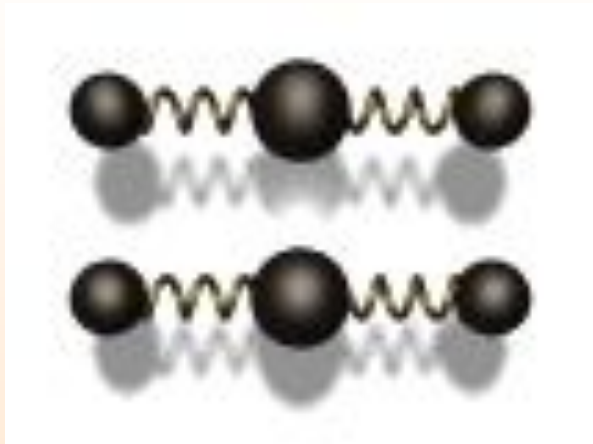


**Генерация акустической волны громкоговорителем.**

## Примеры колебательных процессов



**Поперечная волна в сетке, состоящей из шариков, скреплённых пружинками. Колебания масс происходят перпендикулярно направлению распространения волны.**



**Возможные типы колебаний атомов в кристалле.**



## 1.1 Виды и признаки колебаний

В физике выделяют колебания двух видов – механические и электромагнитные и их электромеханические комбинации, поскольку они чрезвычайно актуальны для жизнедеятельности человека.

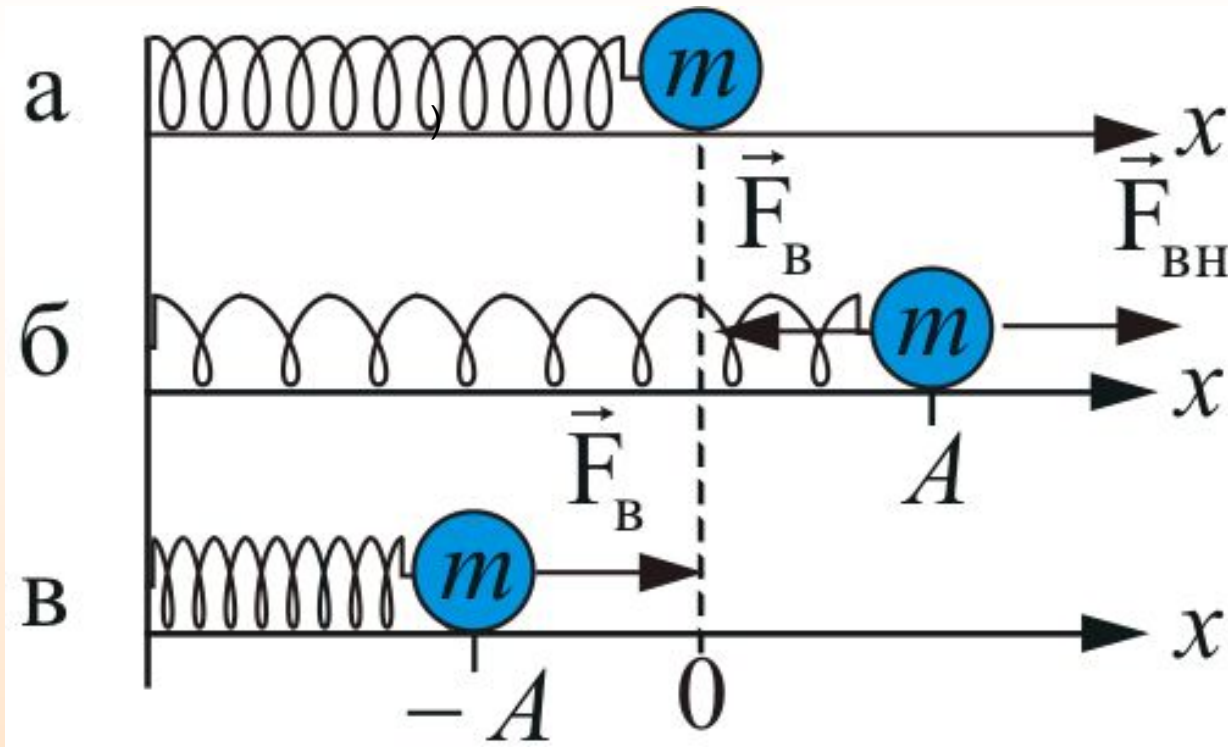
Для колебаний характерно превращение одного вида энергии в другую – кинетической в потенциальную, магнитной в электрическую и т.д.

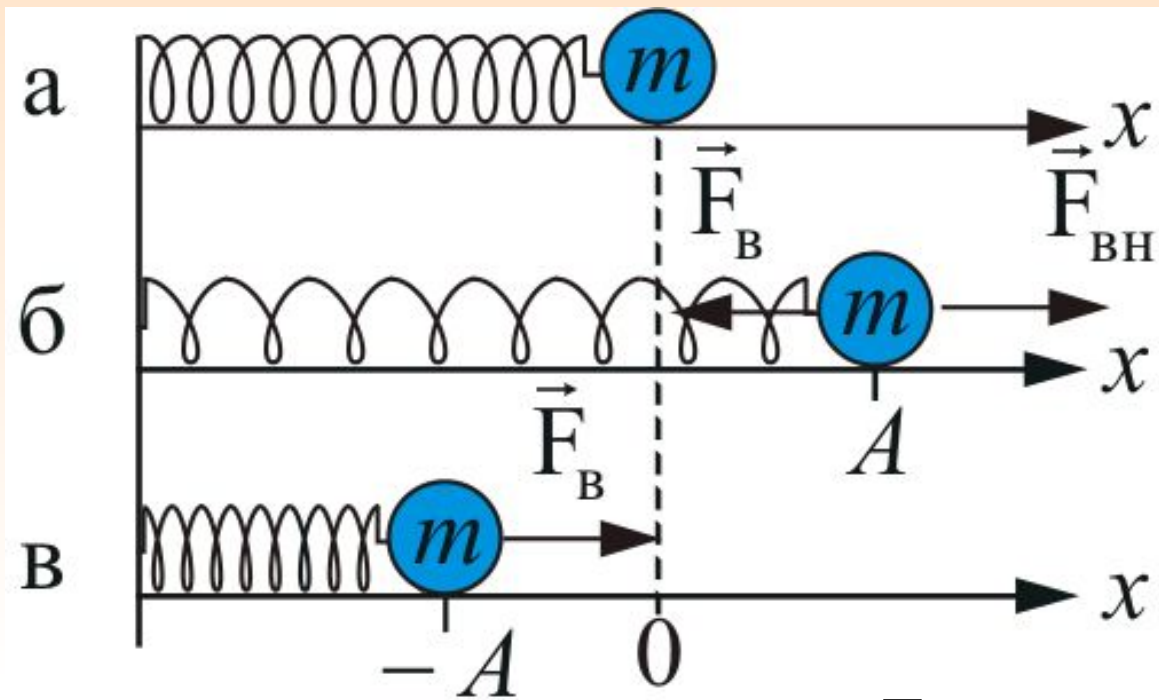
*Колебательным движением (или просто колебанием) называются процессы, повторяющиеся во времени.*

Общие закономерности этих явлений, которые мы далее рассмотрим, должны стать фундаментом для изучения любых видов колебаний.

Различные колебательные процессы описываются одинаковыми характеристиками и одинаковыми уравнениями.

Говоря о колебаниях или осцилляциях тела, мы подразумеваем повторяющееся движение его туда и обратно по одной и той же траектории. Иными словами *колебательное движение является периодическим*. Простейшим примером периодического движения служат *колебания груза на конце пружины*.





$x = 0$  – положение равновесия;  $F_{\text{вн}}$  – внешняя растягивающая сила;  $F_{\text{в}}$  – возвращающая сила;  $A$  – амплитуда колебаний.

$$F_{\text{в}} = -kx \quad (\text{закон Гука})$$

Знак минус означает, что возвращающая сила, всегда противоположна направлению перемещения  $x$

Постоянная  $k$  называется *жесткостью пружины*.

$$F_{\text{вн}} = +kx$$

Из приведенного примера следуют *три признака* колебательного движения:

- *повторяемость (периодичность) – движение по одной и той же траектории туда и обратно;*
- *ограниченность пределами крайних положений;*
- *действие силы, описываемой функцией  $F = -kx$ .*

Колебания называются *периодическими*, если значения физических величин, изменяющихся в процессе колебаний, **повторяются** через равные промежутки времени.

- **Простейшим типом периодических колебаний являются так называемые *гармонические колебания*.**
- Любая колебательная система, в которой возвращающая сила прямо пропорциональна смещению, взятому с противоположным знаком (например,  $F = - kx$ ), совершает *гармонические колебания*.
- Самую такую систему часто называют *гармоническим осциллятором*.

Рассмотрение гармонических колебаний важно по **двум причинам**:

- колебания, встречающиеся в природе и технике, часто имеют характер, *близкий к гармоническому*;
- различные *периодические процессы* (повторяющиеся через равные промежутки времени) можно представить как *наложение гармонических колебаний*.

Периодический процесс можно описать уравнением:

$$f(t) = f(t + nT)$$

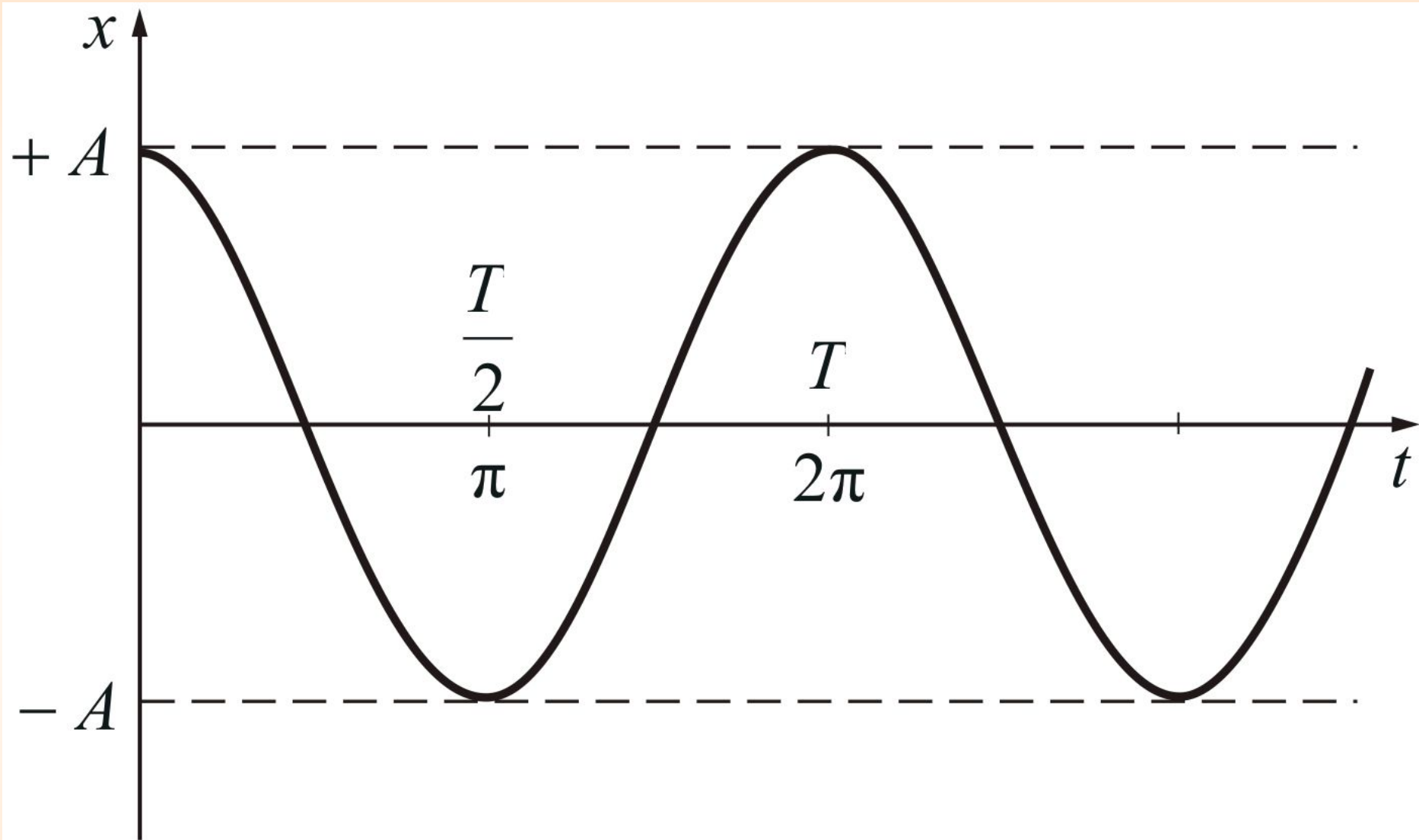
*По определению, колебания называются гармоническими, если зависимость некоторой величины  $x = f(t)$  вид:*

$$x = A \sin \varphi \quad \text{или} \quad x = A \cos \varphi$$

## 1.2 Параметры гармонических колебаний

- Расстояние груза от положения равновесия до точки, в которой находится груз, называют **смещением**  $x$ .
- Максимальное смещение – наибольшее расстояние от положения равновесия – называется **амплитудой** и обозначается, буквой  $A$ .  
 $\varphi = \omega t + \varphi_0$  определяет смещение  $x$  в данный момент времени  $t$  и называется **фазой колебания**.
- При  $t = 0$ ,  $\varphi = \varphi_0$ , поэтому  $\varphi_0$  называется **начальной фазой колебания**.
- Фаза измеряется в радианах.

Т.к. синус и косинус изменяются в пределах от  $+1$  до  $-1$ , то  $x$  может принимать значения от  $+A$  до  $-A$





движение от некоторой начальной точки до  
возвращения в ту же точку, например от  $x = A$  к  $x = -A$   
и обратно в  $x = A$ , называется **полным колебанием**.

• **Частота колебаний  $\nu$**  определяется, как число полных колебаний в 1 секунду. Частоту, измеряют в герцах (Гц):

•  $1 \text{ Гц} = 1 \text{ кол/с} = \text{с}^{-1}$

$$\nu = \frac{1}{T}$$

•  **$T$  – период колебаний** – минимальный промежуток времени, по истечении которого повторяются значения всех физических величин, характеризующих колебание

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{\nu}$$

- $\omega$  – *циклическая (круговая) частота* – ЧИСЛО полных колебаний за  $2\pi$  секунд.

$$\omega = 2\pi\nu$$

- Фаза  $\varphi$  не влияет на форму кривой  $x(t)$ , а влияет лишь на ее положение в некоторый произвольный момент времени  $t$ .
- *Гармонические колебания являются всегда синусоидальными.*
- *Частота и период гармонических колебаний не зависят от амплитуды.*

**Смещение точки описывается уравнением**

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

тогда, по определению:

$$v_x = \frac{dx}{dt} = \omega A \cos(\omega t + \varphi_0)$$

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = -\omega^2 A \sin(\omega t + \varphi_0)$$

$\omega A = v_m$  – *амплитуда скорости;*

$-\omega^2 A = a_m$  – *амплитуда ускорения.*

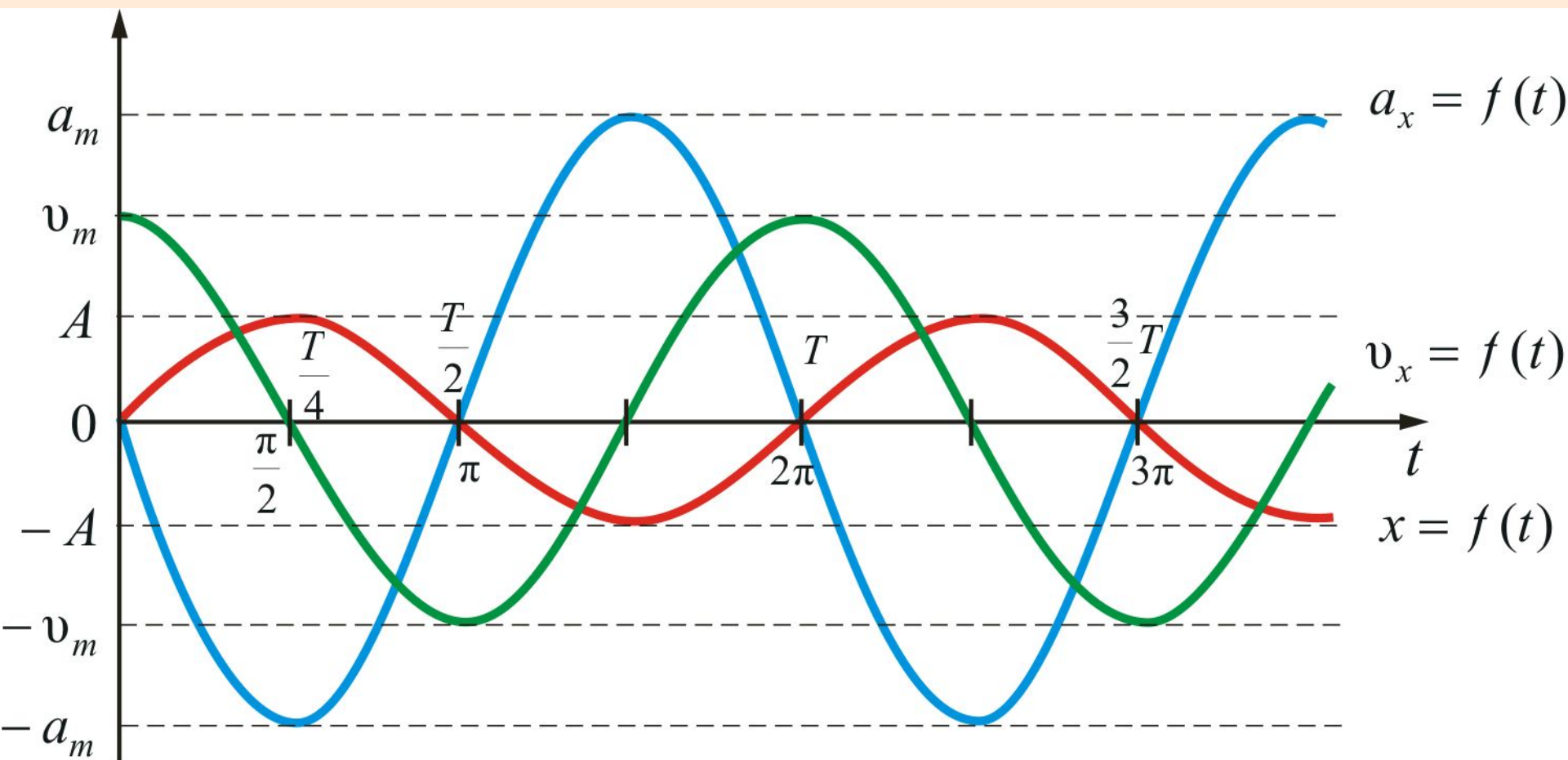
## 1.3 Графики смещения скорости и ускорения

**Уравнения колебаний** запишем в следующем виде:

$$\begin{cases} x = A \sin(\omega t + \varphi_0) \\ v_x = v_m \cos(\omega t + \varphi_0) \\ a_x = -a_m \sin(\omega t + \varphi_0) \end{cases}$$

Из этой системы уравнений можно сделать следующие выводы:

- *скорость колебаний тела максимальна и, по абсолютной величине, равна амплитуде скорости в момент прохождения через положение равновесия ( $x = 0$ ).*
- *При максимальном смещении ( $x = \pm A$ ) скорость равна нулю;*
- *ускорение равно нулю при прохождении телом положения равновесия и достигает наибольшего значения, равного амплитуде ускорения при наибольших смещениях.*



Найдем разность фаз  $\Delta\varphi$  между фазами смещения  $x$  и скорости  $v_x$ .

$$\begin{cases} x = A \sin(\omega t + \phi_0) = A \sin \phi_x \\ v_x = v_m \cos(\omega t + \phi_0) = v_m \sin(\omega t + \phi_0 + \pi / 2). \end{cases}$$

$$\Delta\varphi = \varphi_x - \varphi_v = \pi / 2$$

то есть скорость опережает смещение на  $\pi/2$ .

Аналогично можно показать, что ускорение в свою очередь опережает скорость по фазе на  $\pi/2$ :

$$\varphi_v - \varphi_a = -\pi / 2$$

Тогда ускорение опережает смещение на  $\pi$ , или

$$\varphi_x - \varphi_a = -\pi$$

то есть, смещение и ускорение находятся в противофазе

## 1.4 Основное уравнение динамики гармонических колебаний

• Исходя из второго закона,  $F = ma$  можно записать

$$F_x = -m\omega^2 A \sin(\omega t + \varphi_0) = -m\omega^2 x \quad (1)$$

$$F_x = -m\omega^2 x$$

сила  $F$  пропорциональна  $x$  и всегда направлена к положению равновесия (поэтому ее и называют возвращающей силой).

Период и фаза силы совпадают с периодом и фазой ускорения.

• Примером сил удовлетворяющих (1) являются *упругие силы*. Силы же имеющие иную природу, но удовлетворяющие (1) называются *квазиупругими*.

**Квазиупругая сила**

$$F_x = -kx, \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент квазиупругой

силы



Сравнивая (1) и (2) видим, что

$$\omega^2 = \frac{k}{m} \quad a_x = \frac{d^2 x}{dt^2}$$

Получим основное уравнение динамики гармонических колебаний, вызываемых упругими силами:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx \quad \text{или} \quad m \frac{d^2 x}{dt^2} + kx = 0 \quad ; \quad \frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{k}{m} x = 0 \quad , \quad \text{тогда}$$

$$\boxed{\frac{d^2 x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0} \quad (3)$$

Решение этого уравнения всегда будет выражение вида

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

Круговая частота незатухающих колебаний  $\omega = \frac{2\pi}{T}$ , но

$$\omega^2 = \frac{k}{m} \quad \text{тогда} \quad \frac{2\pi}{T} = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{откуда}$$

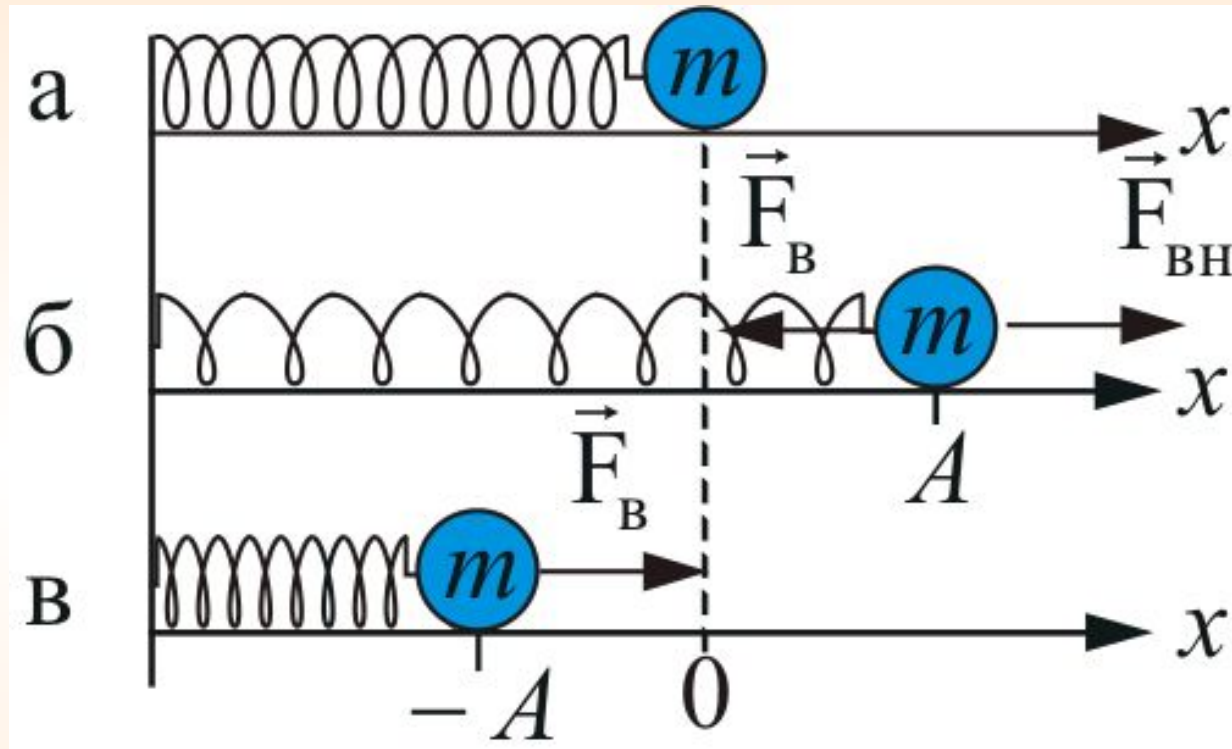
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$



# ЭНЕРГИЯ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ



## 1.5 Энергия гармонических колебаний



Потенциальная энергия тела  $U$ , измеряется той работой, которую произведет возвращающая сила

$$F_x = -kx \quad dU = -Fdx = kx dx \quad , \text{отсюда} \quad U = k \int_0^x x dx \quad \text{или}$$

• **Потенциальная энергия**

$$U = \frac{kx^2}{2}$$

$$U = \frac{1}{2} kA^2 \sin^2(\omega t + \varphi_0)$$

• **Кинетическая энергия**

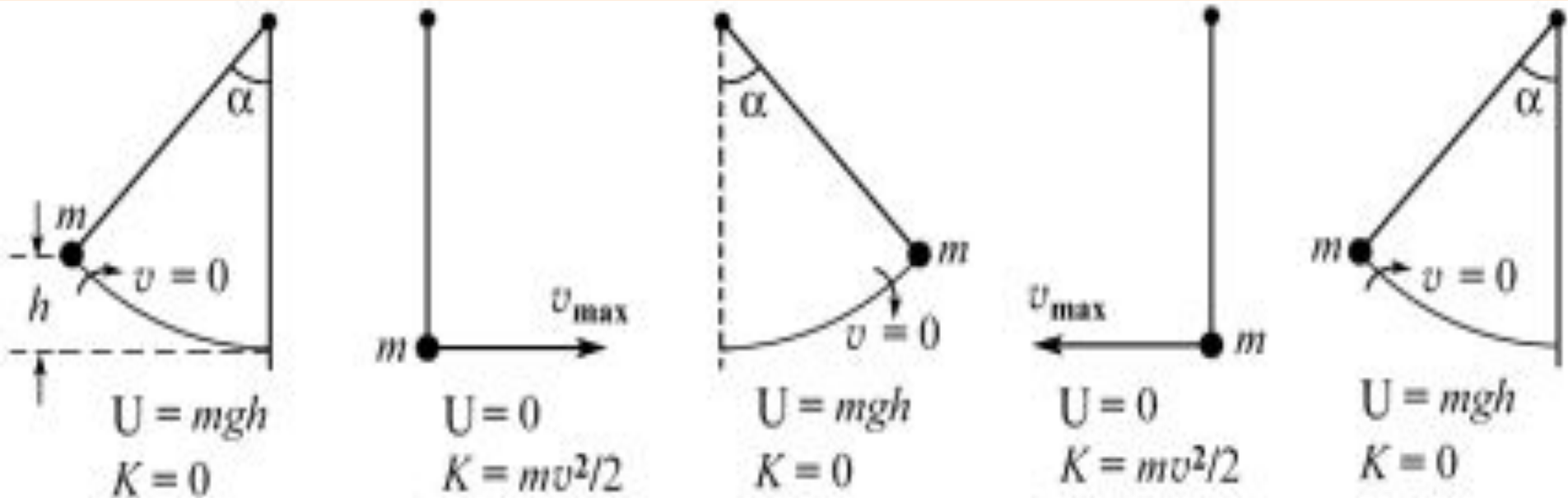
$$K = \frac{mv^2}{2} = \frac{1}{2} m\omega^2 A^2 \cos^2(\omega t + \varphi_0)$$

• **Полная энергия:**

$$E = U + K = \frac{1}{2} m\omega^2 A^2 \quad , \text{или} \quad E = \frac{1}{2} m\omega^2 A^2 = \frac{1}{2} kA^2$$

**Полная механическая энергия гармонически колеблющегося тела пропорциональна квадрату амплитуды колебания.**

# Колебания груза под действием сил тяжести (квазиупругих сил).



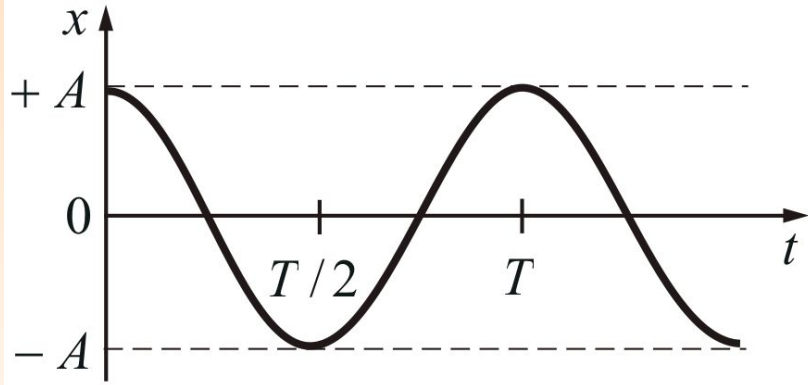
**Максимум  
потенциальной энергии:**

$$U_{\max} = mgh = \frac{1}{2}kA^2$$

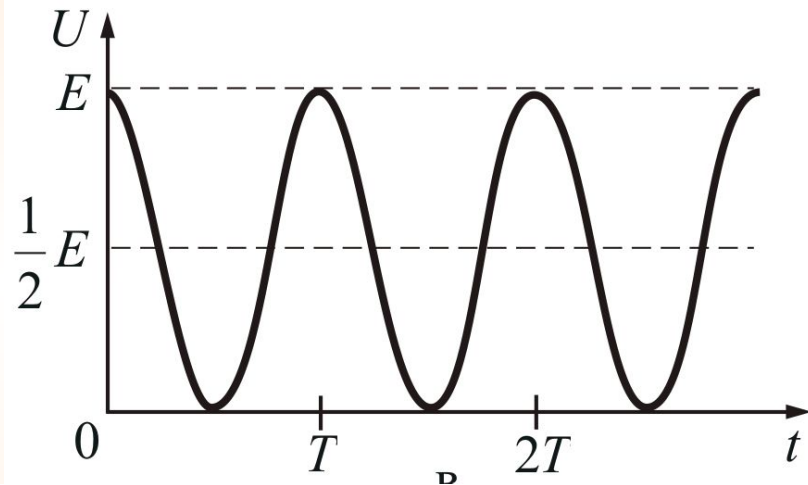
**Максимум  
кинетической энергии:**

$$K_{\max} = \frac{mv^2}{2} = \frac{1}{2}kA^2$$

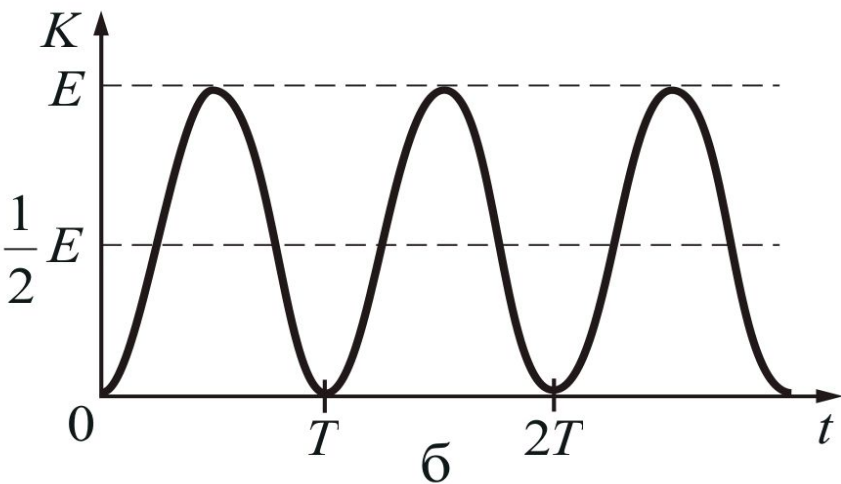
когда  $K = \max$ ,  $U = 0$  (и наоборот).



а



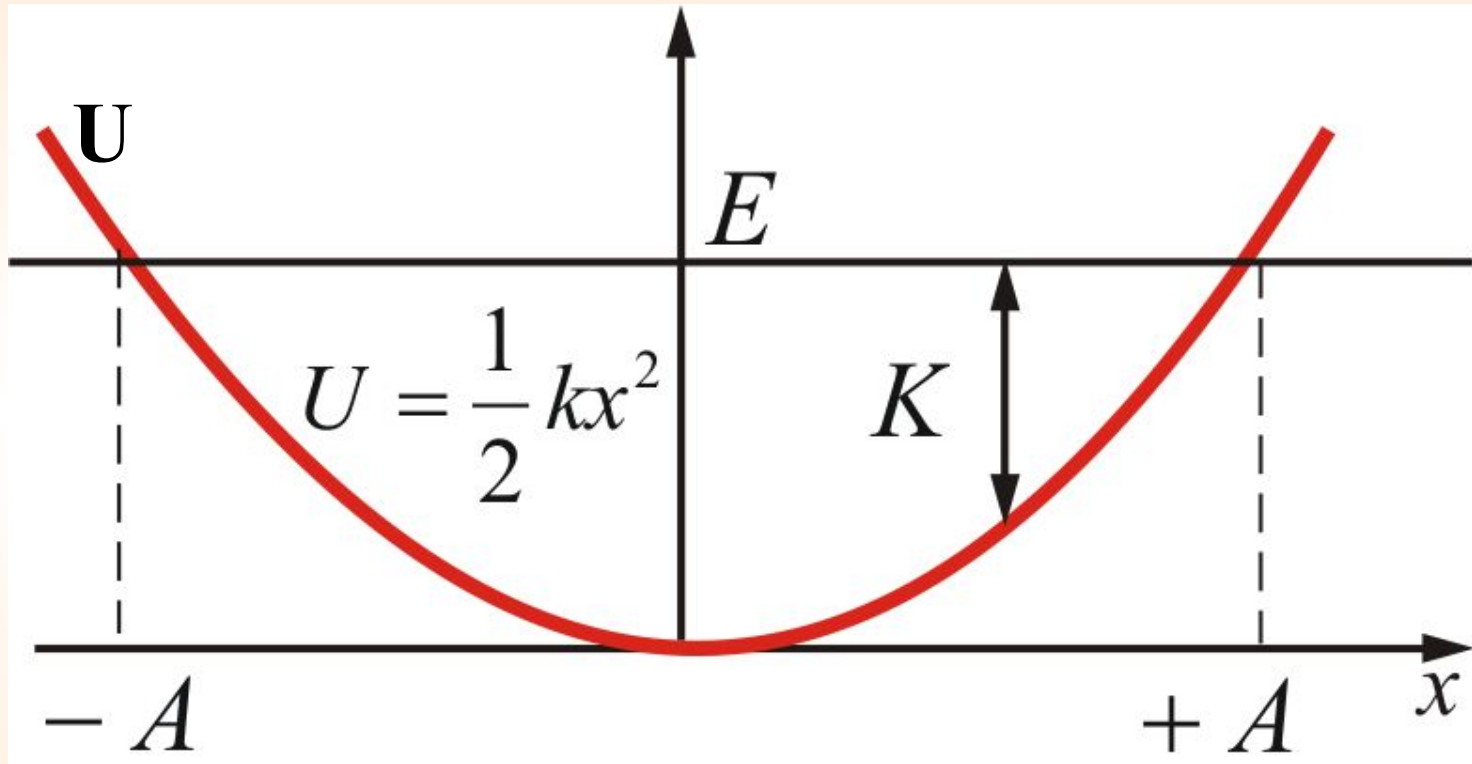
б



в

При колебаниях совершающихся под действием потенциальных (консервативных) сил, происходит переход кинетической энергии в потенциальную и наоборот. Их сумма в любой момент времени постоянна.

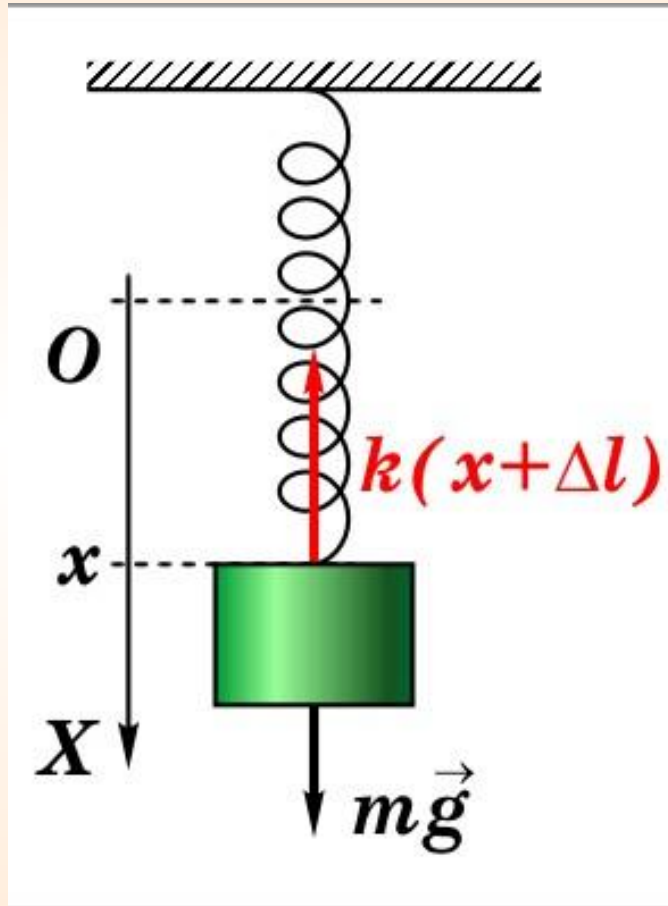
*На рисунке приведена зависимость потенциальной энергии  $U$  в зависимости от отклонения от положения равновесия*



$$E = \frac{1}{2} kA^2.$$

$$K = E - U$$

## 1.6 Гармонический осциллятор



1. **Пружинный маятник** – это груз массой  $m$ , подвешенный на абсолютно упругой пружине с жесткостью  $k$ , совершающий гармонические колебания под действием упругой силы

$$F = -kx$$



Из второго закона Ньютона  $F = ma$ ; или  $F = -kx$   
получим **уравнение движения маятника**:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx \quad \text{или} \quad \frac{d^2 x}{dt^2} + \left( \frac{k}{m} \right) x = 0$$

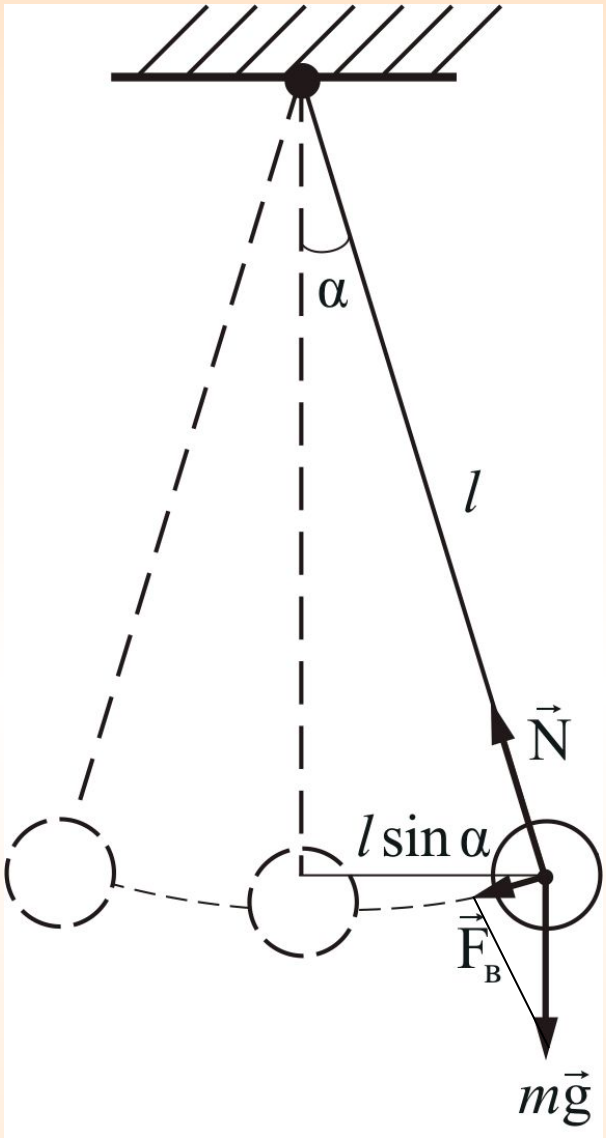
Решение этого уравнения:

$$x = A \cos(\omega t + \varphi)$$

циклическая частота  $\omega$       период  $T$

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}};$$

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



**2. Математическим маятником** — называется идеализированная система, состоящая из невесомой, нерастяжимой нити, на которую подвешена масса, сосредоточенная в одной точке (шарик на длинной тонкой нити).

При отклонении маятника от вертикали, возникает **вращающий момент**,  $M = -mgl \sin \alpha$

Уравнение динамики вращательного движения :  $M = J\varepsilon$

**момент инерции маятника**  $J = ml^2$

**угловое ускорение**  $\varepsilon = \frac{d^2 \alpha}{dt^2}$

Тогда  $ml^2 \frac{d^2\alpha}{dt^2} = -mgl \sin \alpha$  , или  $\frac{d^2\alpha}{dt^2} + \frac{g}{l} \sin \alpha = 0$

$\sin \alpha \approx \alpha$ . Обозначим :  $\frac{g}{l} = \omega^2$

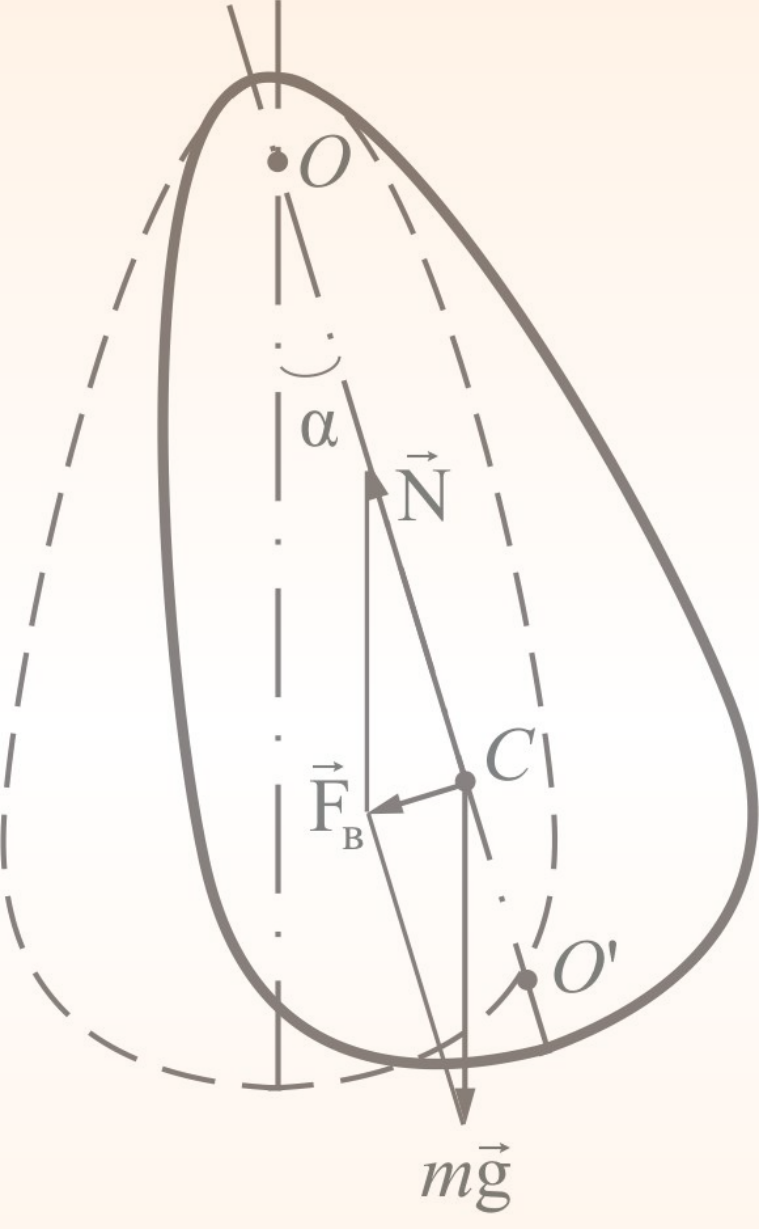
*Уравнение движения маятника*  $\frac{d^2\alpha}{dt^2} + \omega^2 \alpha = 0$

*Решение этого уравнения*  $\alpha = \alpha_m \cos(\omega t + \varphi_0)$

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

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

*T – зависит только от длины маятника и ускорения свободного падения.*



**3. Физический маятник** – это твердое тело, совершающее под действием силы тяжести колебания вокруг неподвижной горизонтальной оси, проходящей через точку подвеса  $O$ , не совпадающую с центром масс  $C$

**Вращающий момент**

**маятника:**  $M = -mgl \sin \alpha$

$l$  – расстояние между точкой подвеса и центром инерции маятника  $O-C$ .

Обозначим:

**$J$  – момент инерции** маятника относительно точки подвеса  $O$ .

$\varepsilon = \frac{d^2\alpha}{dt^2}$  угловое ускорение, тогда

$$J \frac{d^2\alpha}{dt^2} = -mgl \sin \alpha$$

$$\sin \alpha \approx \alpha$$

## *Уравнение динамики движения маятника*

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} + \omega^2 \alpha = 0$$

$$\alpha = \alpha_m \cos(\omega t + \varphi_0) \quad \begin{array}{l} \text{здесь} \\ : \end{array}$$

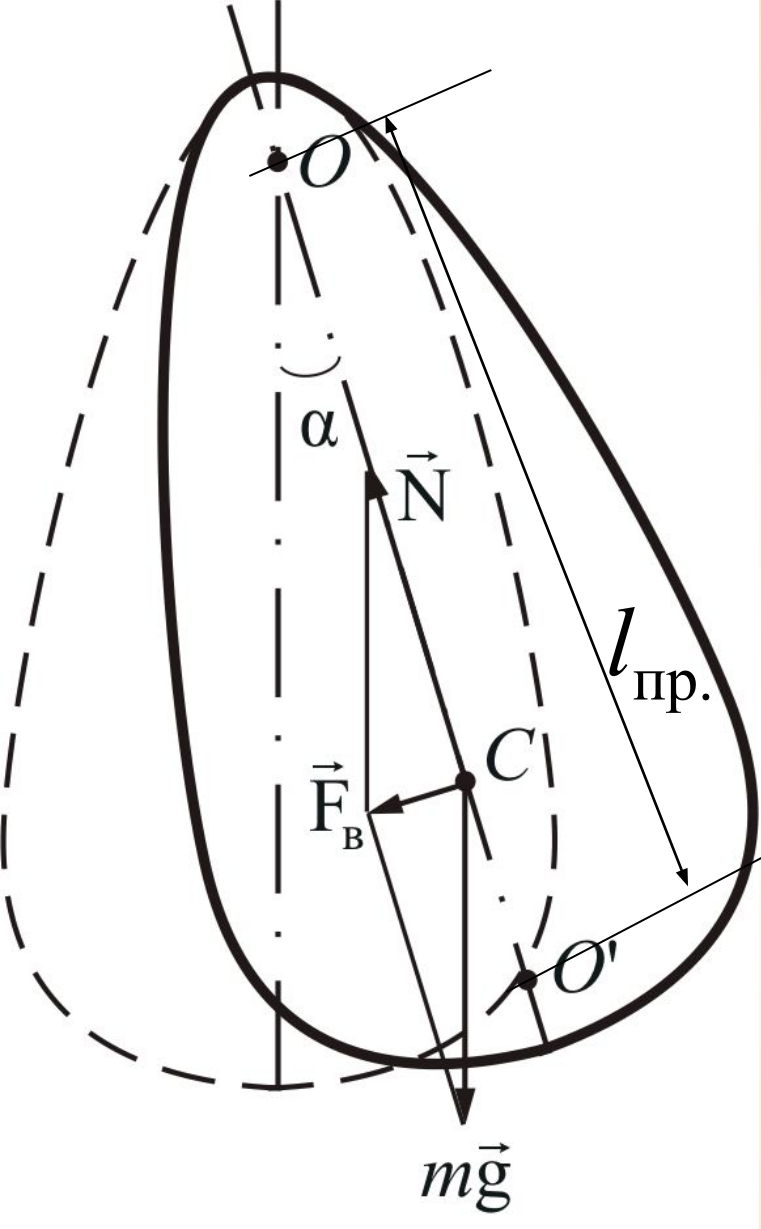
$$\omega^2 = \frac{mgl}{J};$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mgl}};$$

$$l_{\text{пр.}} = \frac{J}{ml};$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l_{\text{пр.}}}{g}}.$$

$l_{\text{пр.}}$  – *приведенная* длина физического маятника – это длина такого математического маятника, период колебания которого совпадает с периодом колебаний данного физического маятника.



- Точка  $O'$  называется **центром качаний**

- Применяя теорему Штейнера, получим:

$$l_{\text{пр.}} = \frac{J}{ml} = \frac{J_C + ml^2}{ml} = \frac{J_C}{ml} + l > l$$

$l_{\text{пр.}}$  всегда больше  $l$ .

Точки  $O$  и  $O'$  всегда будут лежать по обе стороны от точки  $C$ .

- Точка подвеса  $O$  маятника и центр качаний  $O'$  обладают *свойством взаимозаменяемости*
- На этом свойстве основано определение ускорения силы тяжести  $g$  с помощью так называемого *оборотного маятника*. Это такой маятник, у которого имеются две точки подвеса и два груза, которые могут перемещаться вдоль оси маятника.
- Все приведенные соотношения для математического и физического маятников справедливы для малых углов отклонения (меньше  $15^\circ$ ), когда  $x = l\alpha$  мало отличается от длины хорды  $l \sin \alpha$  (меньше чем на 1%).

Лекция закончена.

Благодарю за внимание.