Сегодня: *

Поток ЭТО

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.

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

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 ($n = \sqrt{\varepsilon\mu}$). 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

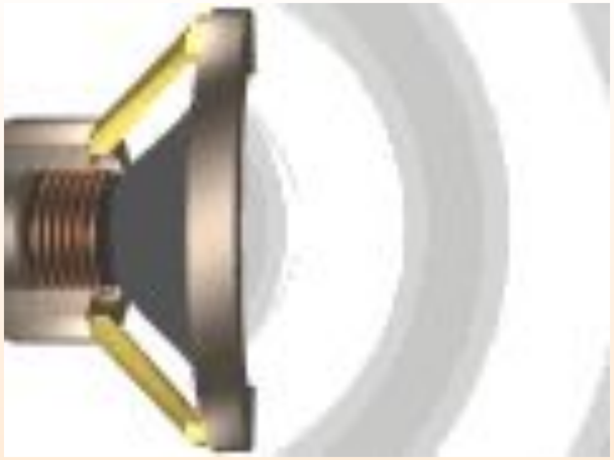
1.4 Основное уравнение динамики гармон. колебаний

1.5 Энергия гармонических колебаний

1.6 Гармонический осциллятор

Примеры колебательных процессов

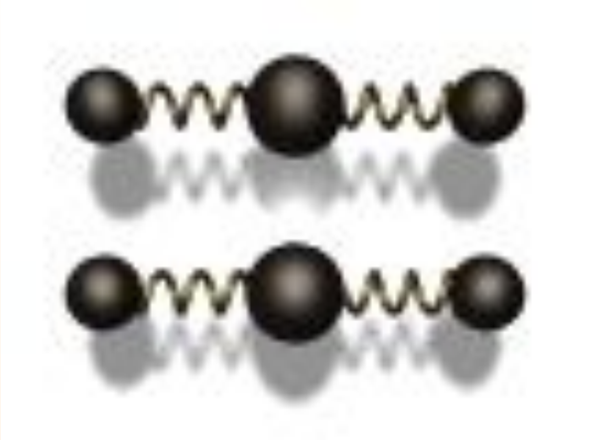
Круговая волна на поверхности жидкости, возбуждаемая точечным источником (гармонически колеблющимся шариком).



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.

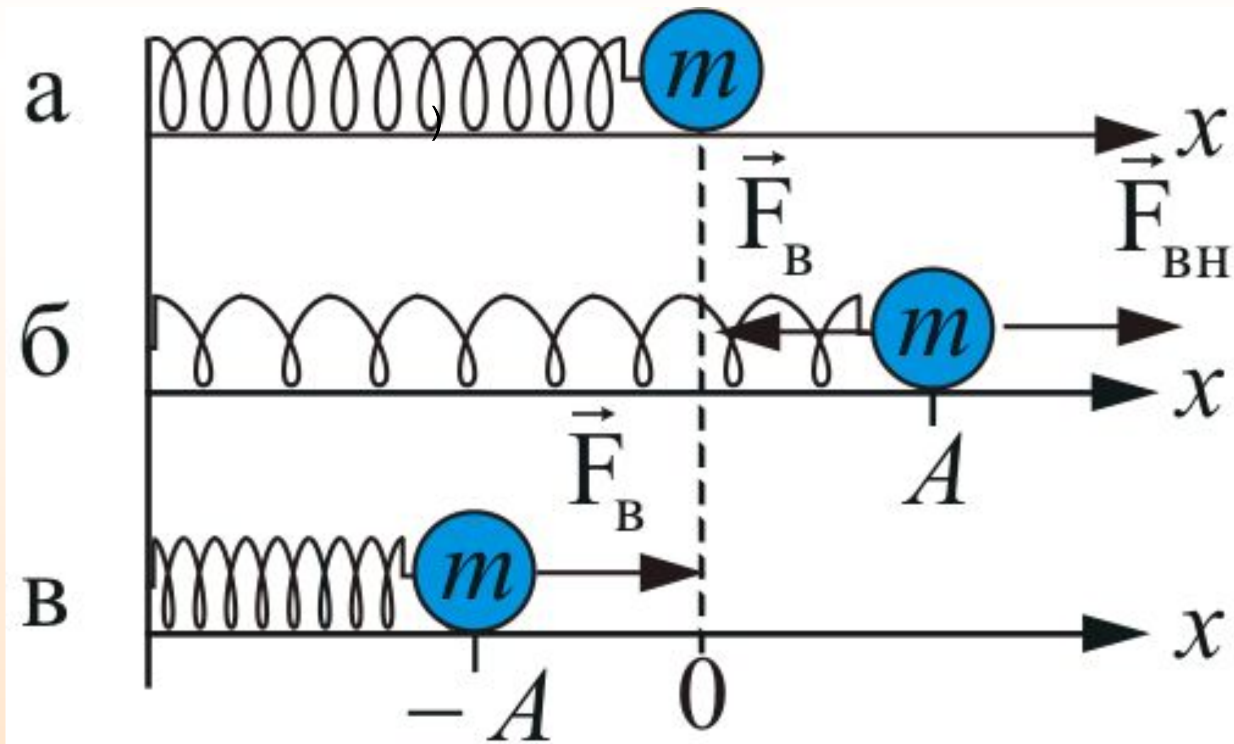
Для колебаний характерно превращение одного вида энергии в другую – кинетической в потенциальную, магнитной в электрическую и т.д.

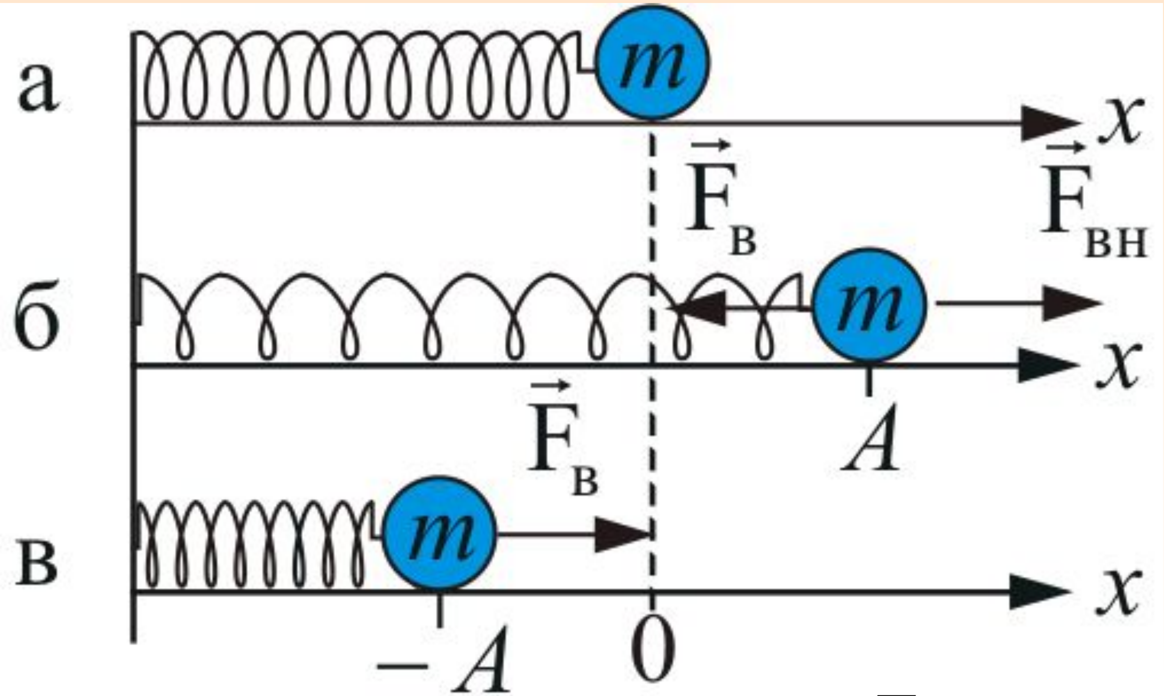
Колебательным движением (или просто колебанием) называются процессы, ***повторяющиеся во времени.***

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; $F_{вн}$ – внешняя растягивающая сила; $F_в$ – возвращающая сила; A – амплитуда колебаний.

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

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

Постоянная *k* называется *жесткостью пружины*.

$F_{вн} = +kx$

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.***
- Саму 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:

$$\boxed{f(t) = f(t + nT)}$$

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

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

1.2 Параметры гармонических колебаний

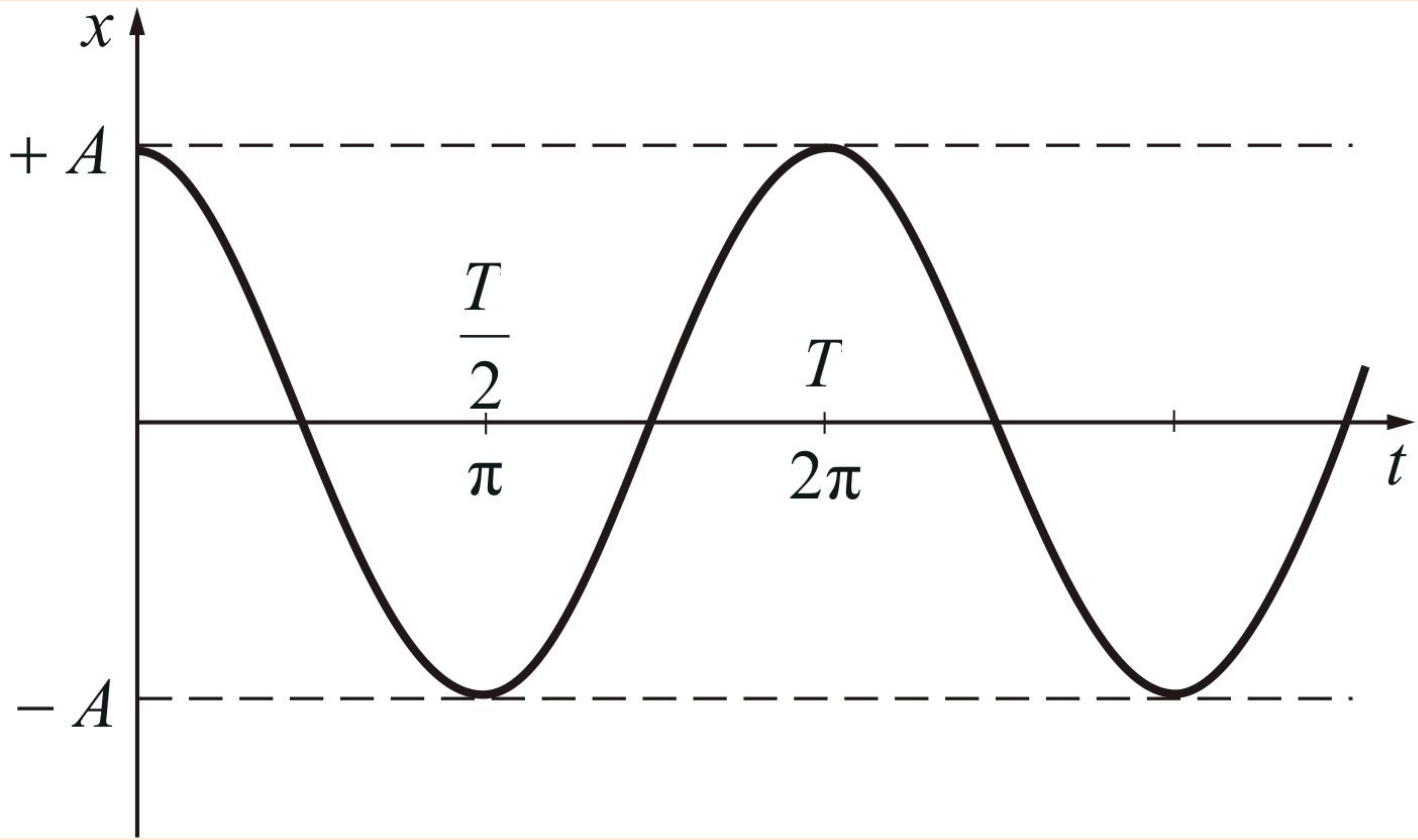
- *Расстояние груза от положения равновесия до точки, в которой находится груз, называют* ***смещением*** ***x***.

- *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 $t = 0, \quad \varphi = \varphi_0$, поэтому φ_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*



x
+ A
− A
T
2
T
π
2π
t

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* ν** определяется, как число полных колебаний в 1 секунду. Частоту, измеряют в герцах (Гц):
- 1 Гц = 1 кол/с= с$^{-1}$

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

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

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

- ω – ***циклическая (круговая) частота*** – число полных колебаний за 2π секунд.

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

- Фаза φ *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:

$$\upsilon_x = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = \omega A\cos(\omega t + \varphi_0)$$

$$a_x = \frac{\mathrm{d}\upsilon_x}{\mathrm{d}t} = -\omega^2 A\sin(\omega t + \varphi_0)$$

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

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

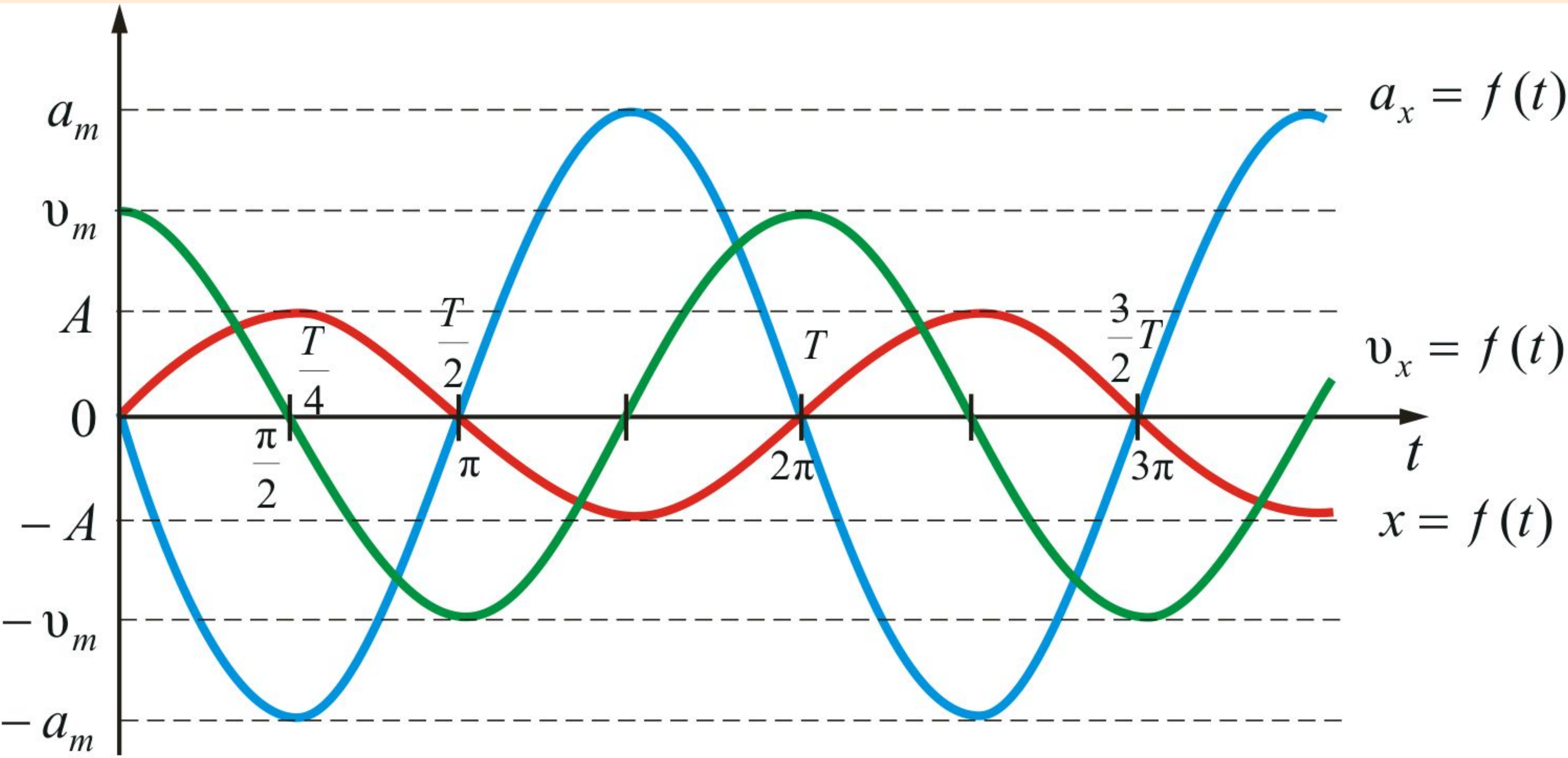
1.3 Графики смещения скорости и ускорения

Уравнения колебаний запишем в следующем виде:

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

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.*


a_m
υ_m
A
0
$-A$
$-\upsilon_m$
$-a_m$
$a_x = f(t)$
$\upsilon_x = f(t)$
$x = f(t)$
t
$\frac{T}{4}$
$\frac{T}{2}$
T
$\frac{3}{2}T$
$\frac{\pi}{2}$
π
2π
3π

Найдем разность фаз Δφ между фазами смещения x и скорости υ_x.

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

$$\Delta\varphi = \varphi_x - \varphi_\upsilon = \pi/2$$

то есть скорость опережает смещение на π/2.

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

$$\varphi_\upsilon - \varphi_a = -\pi/2$$

Тогда ускорение опережает смещение на π, 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

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

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

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

где k – коэффициент квазиупругой силы

Сравнивая (1) и (2) видим, что $\omega^2 = \frac{k}{m}$ $a_x = \frac{d^2x}{dt^2}$

Получим основное уравнение динамики гармонических колебаний, вызываемых упругими силами:

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

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

Решение этого уравнения всегда будет выражение вида

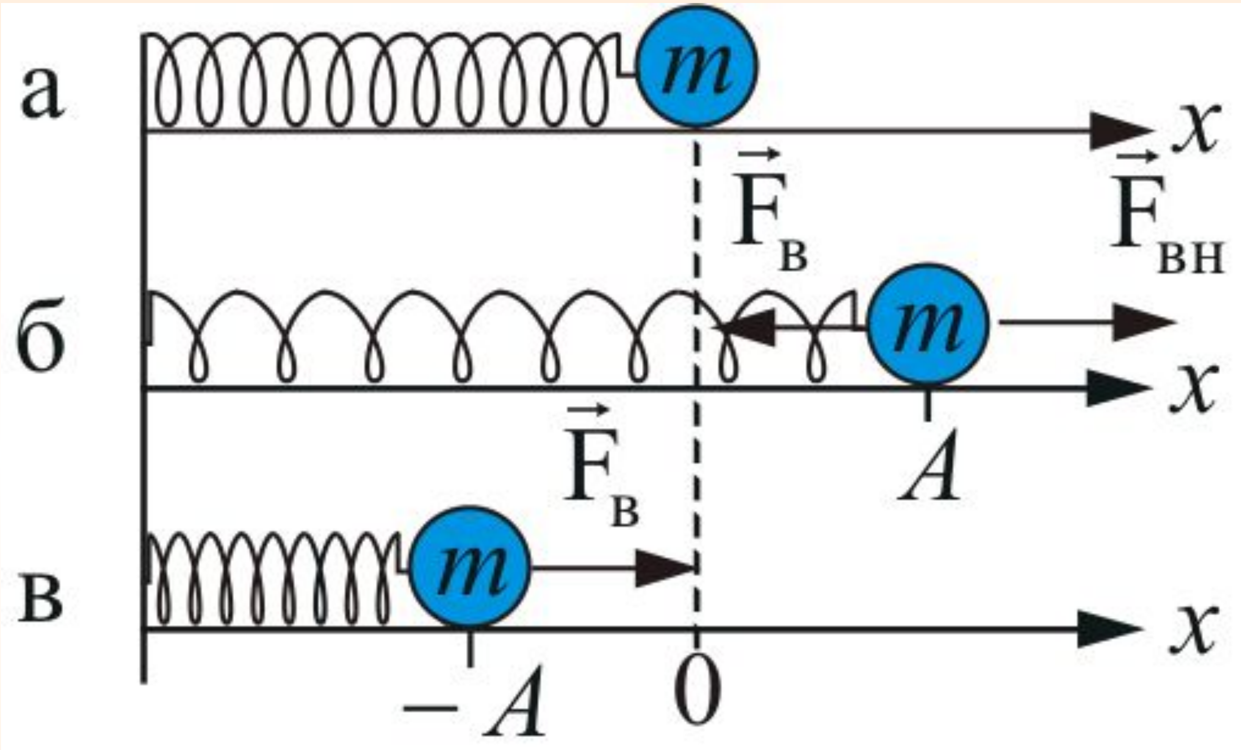
$$x = A\sin(\omega t + \varphi)$$

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

$\omega^2 = \frac{k}{m}$ тогда $\frac{2\pi}{T} = \sqrt{\frac{k}{m}}$ 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*

$$F_x = -kx \qquad \mathrm{d}U = -F\mathrm{d}x = kx\mathrm{d}x$$, отсюда $$U = k\int_0^x x\mathrm{d}x$$ или

- **Потенциальная энергия**

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

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

- ***Кинетическая энергия***

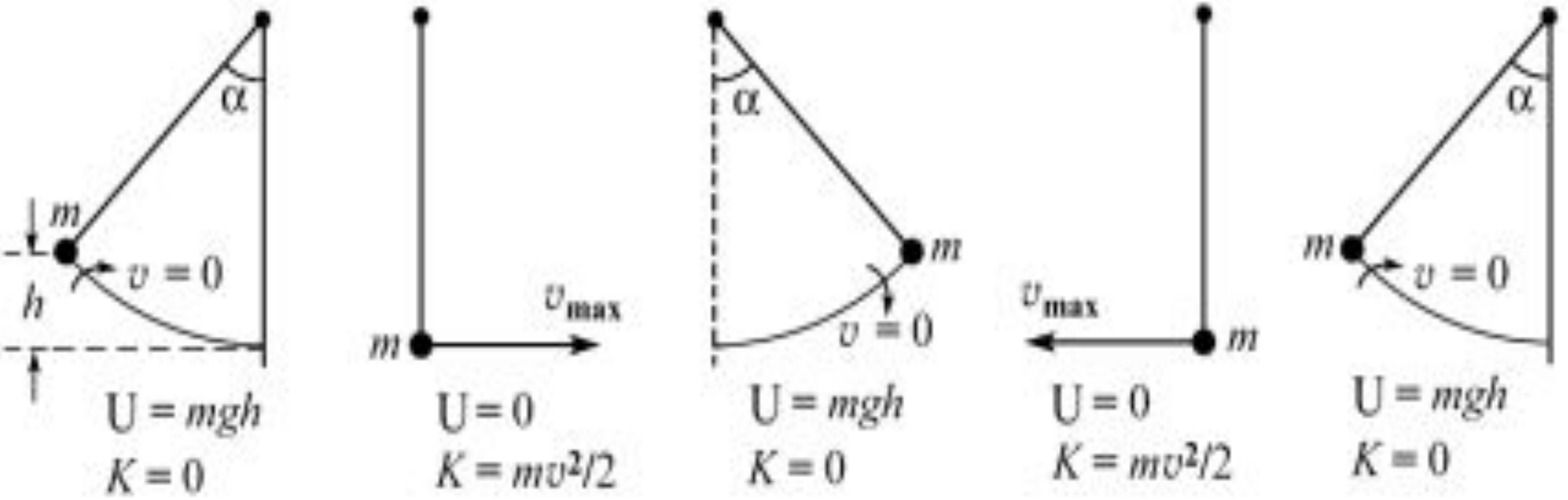
$$K = \frac{m\upsilon^2}{2} = \frac{1}{2}m\omega^2A^2\cos^2(\omega t + \varphi_0)$$

- ***Полная энергия:***

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

Полная механическая энергия гармонически колеблющегося тела пропорциональна квадрату амплитуды колебания.

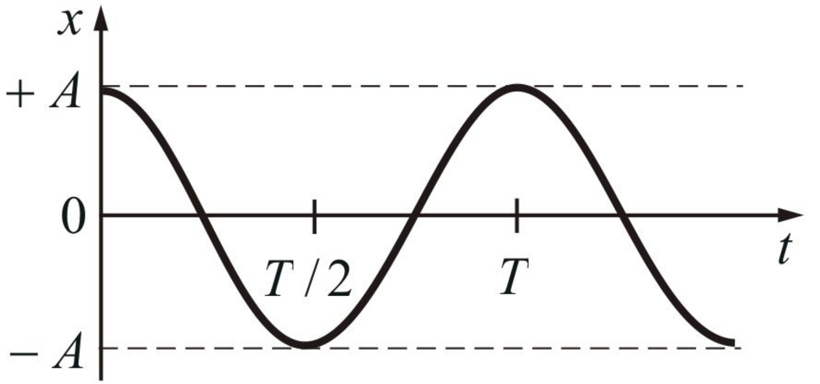
Колебания груза под действием сил тяжести
(квазиупругих сил).



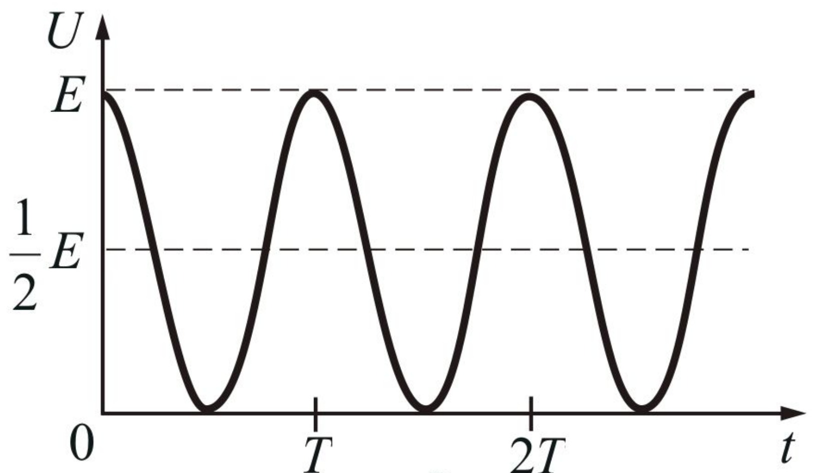
Максимум потенциальной энергии: $$U_{\max} = mgh = \frac{1}{2}kA^2$$

Максимум кинетической энергии: $$K_{\max} = \frac{m\upsilon^2}{2} = \frac{1}{2}kA^2$$

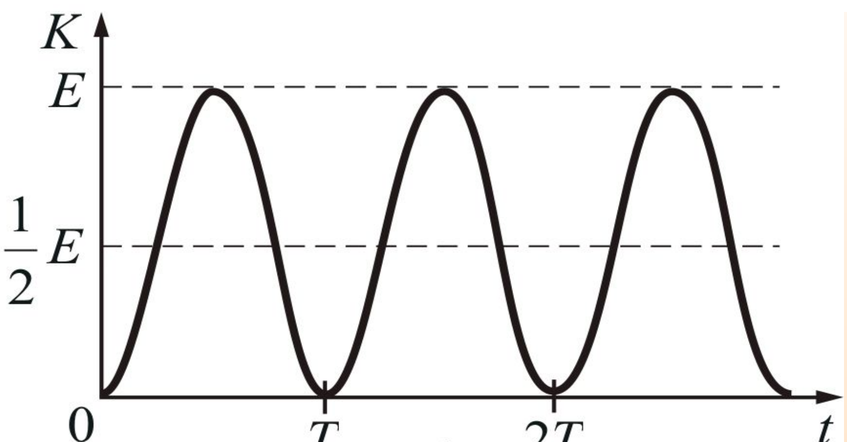
когда $K = \max$, $U = 0$ (и наоборот).



а



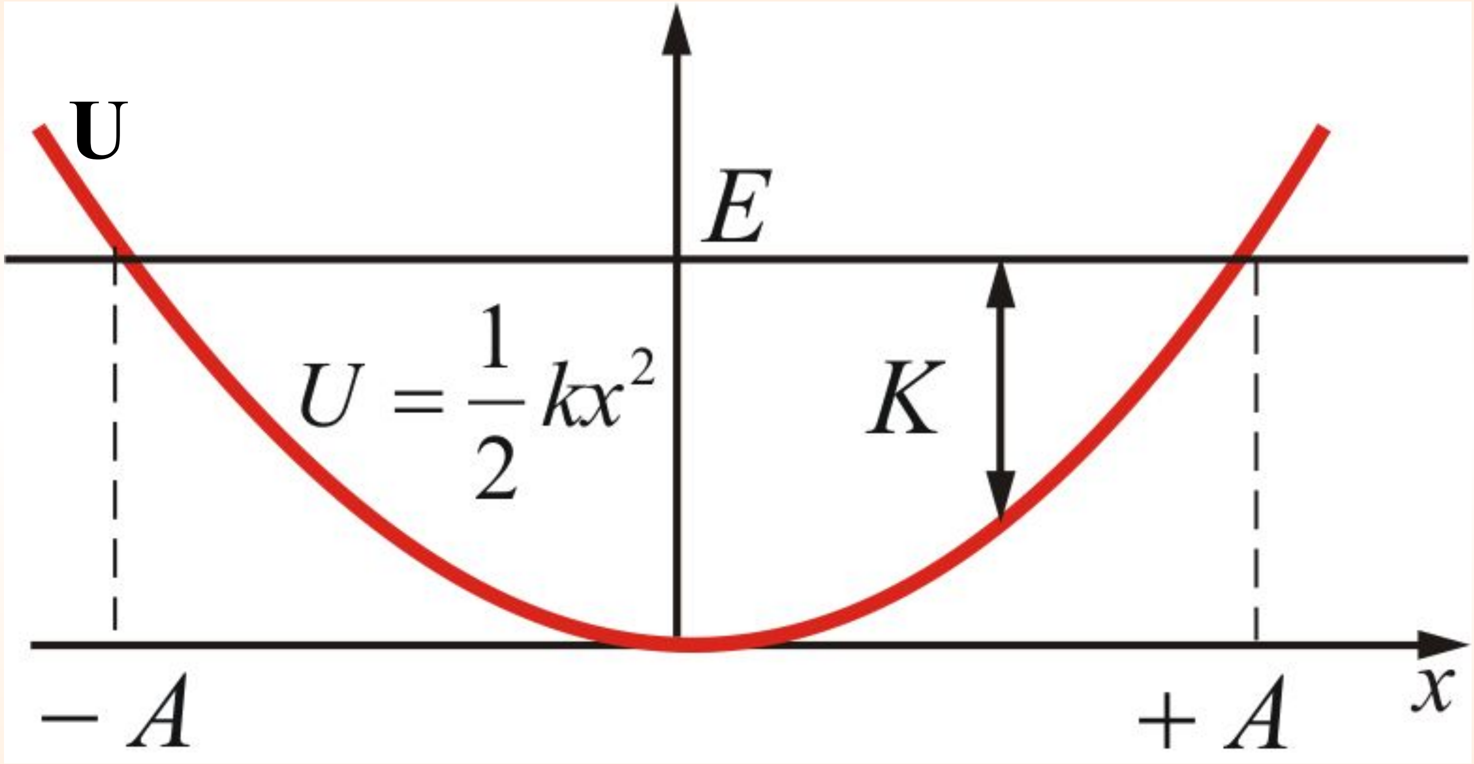
в



б

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

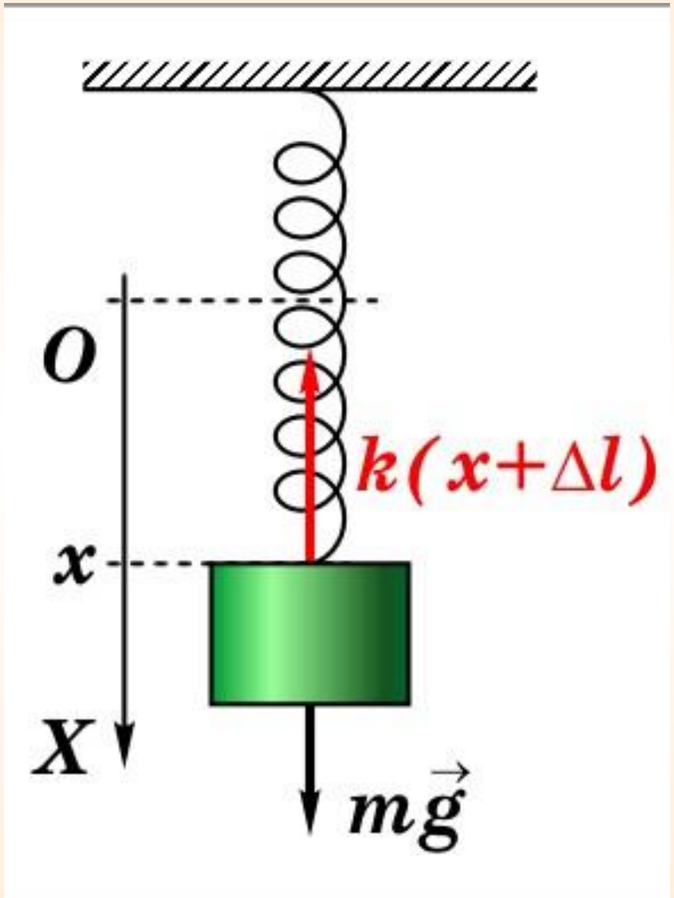
На рисунке приведена зависимость потенциальной энергии U в зависимости от отклонения от положения равновесия



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

$$K = E - U$$

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***:

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

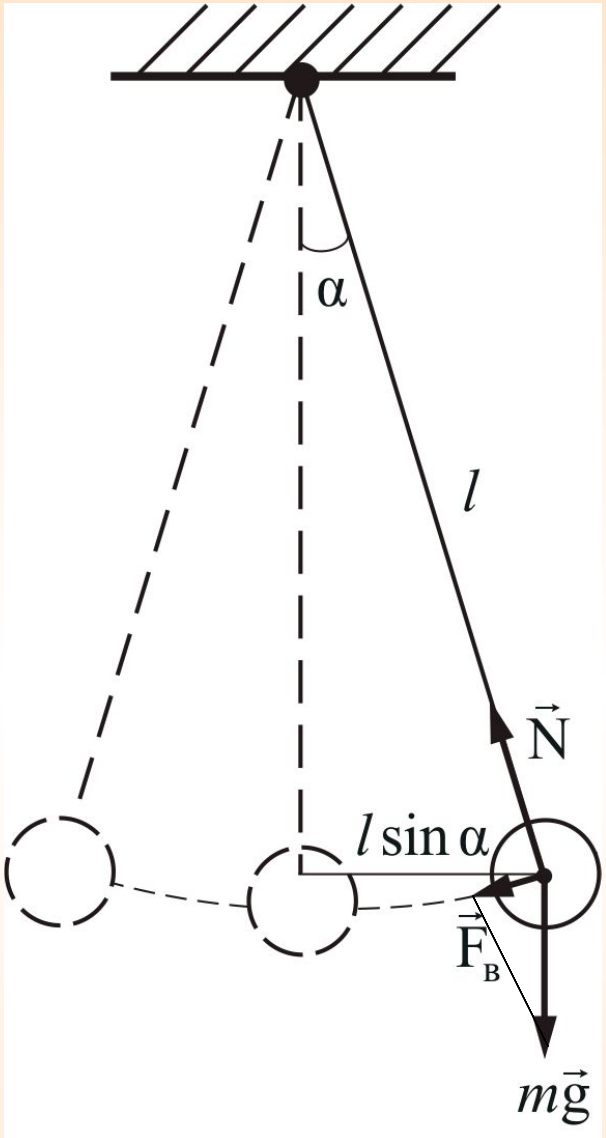
Решение этого уравнения:

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

циклическая частота **ω** 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 $\varepsilon = \dfrac{d^2\alpha}{dt^2}$

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

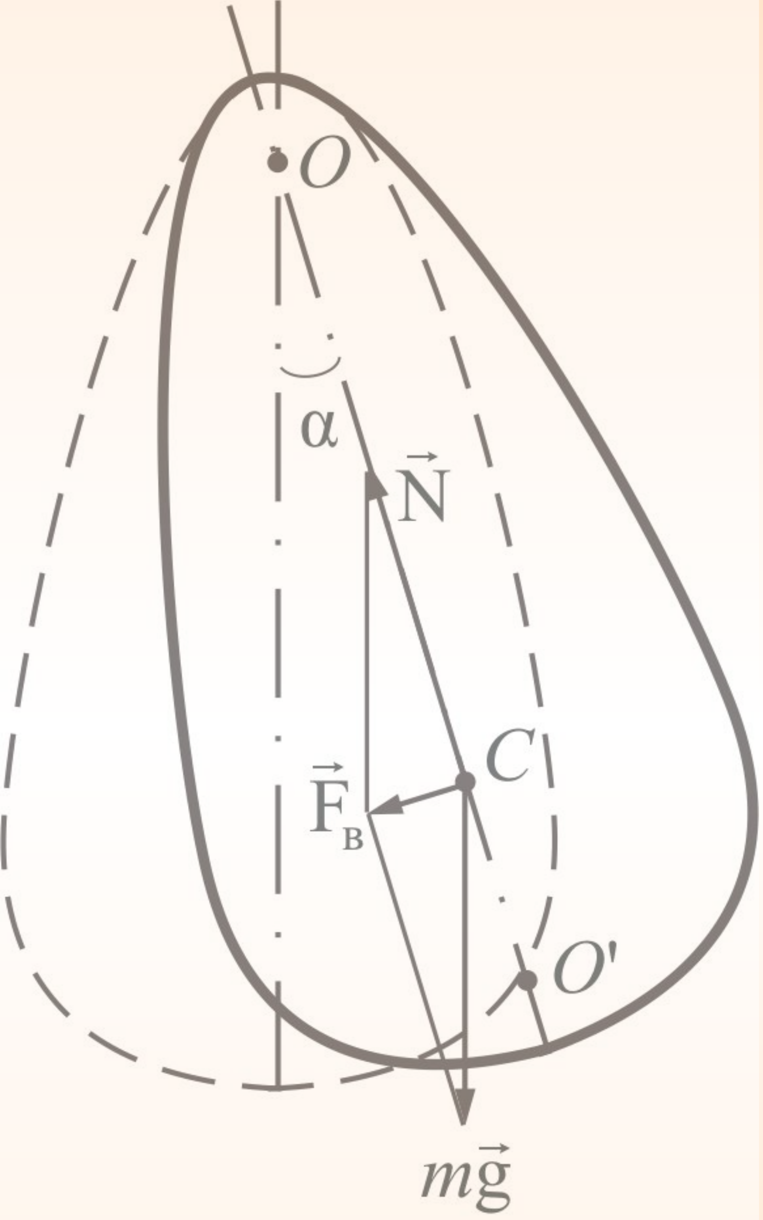
$\sin\alpha \approx \alpha.$ Обозначим : $\frac{g}{l} = \omega^2$

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

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

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

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 О, не совпадающую с центром масс С*

Вращающий момент маятника:

$$M = -mgl\sin\alpha$$

l – расстояние между точкой подвеса и центром инерции маятника *О-С*.

Обозначим:

J – момент инерции маятника относит. точки подвеса *О*.

$\varepsilon = \dfrac{d^2\alpha}{dt^2}$ – угловое ускорение, тогда $J\dfrac{d^2\alpha}{dt^2} = -mgl\sin\alpha$

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

Уравнение динамики движения маятника

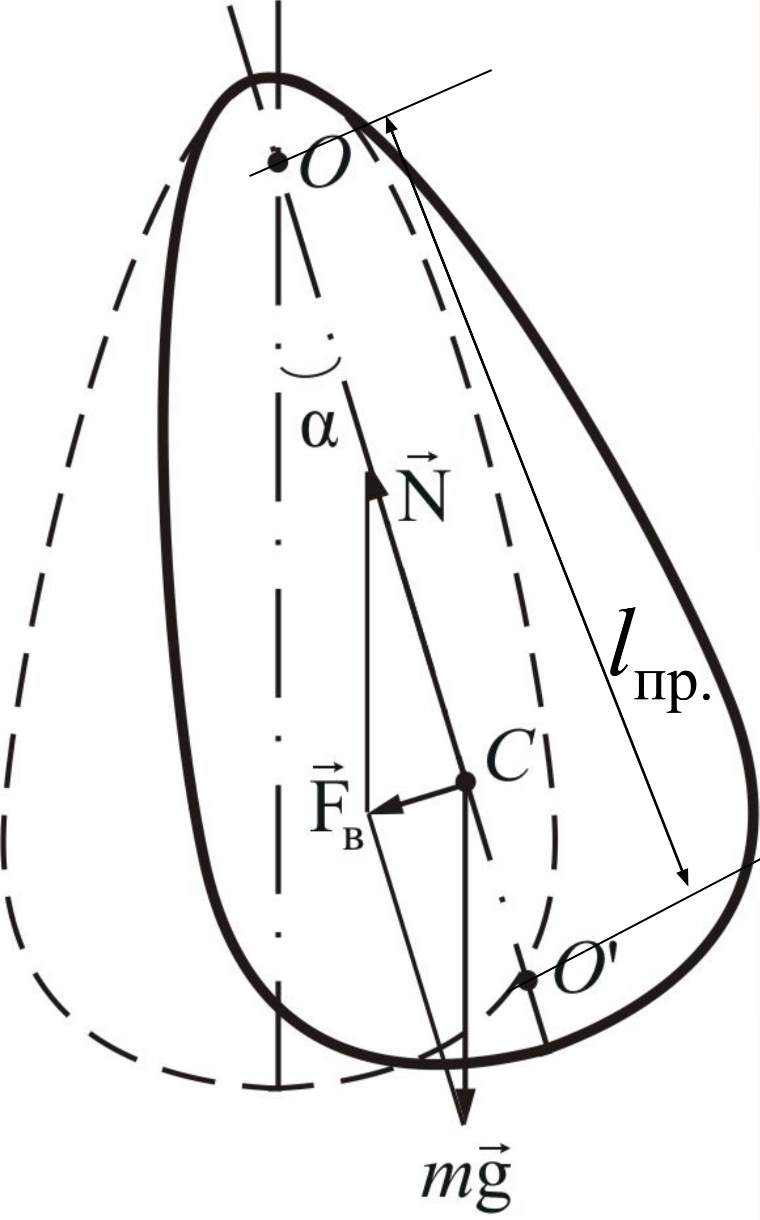
$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} + \omega^2\alpha = 0$$

$$\alpha = \alpha_m \cos(\omega t + \varphi_0)$$

здесь :

$\boxed{\omega^2 = \dfrac{mgl}{J};}$ $\quad T = 2\pi\sqrt{\dfrac{J}{mgl}};$ $\quad l_{\text{пр.}} = \dfrac{J}{ml};$ $\quad \boxed{T = 2\pi\sqrt{\dfrac{l_{\text{пр.}}}{g}}.}$

$l_{\text{пр.}}$ – ***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:

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

$l_{пр.}$ 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°), когда $x = l\alpha$ мало отличается от длины хорды $l \sin\alpha$ (меньше чем на 1%).

Лекция закончена.

Благодарю за внимание.