Ф И З И К А

л е к ц и я 1

ИГЭС 1 курс бакалавры 2019/20

НОВОСЕЛОВА О.В.

ФИЗИКА

1.Трофимова Т.И. Курс физики. [Текст]: учебное пособие для инженерно-технических специальностей высших учебных заведений/ Т. И. Трофимова. – 21-е изlд. стер. – Москва: Академия, 2015. – 549 с.

2. Волькенштейн В.С. Сборник задач по общему курсу физики [Текст]: для студентов технических вузов/ В. С. Волькенштейн. Изд. 3-е, испр. и доп. – Санкт-Петербург: Книжный мир, 2013. – 327 с.

3. Дмитриева Е.И. Физика для инженерных специальностей [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Дмитриева Е.И.— Электрон. текстовые данные.— Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2012.— 142 с.

4.Трофимова Т.И. Курс физики: учебное пособие для инженерно-технических специальностей вузов - М.: Academia, 2006, 2007 и 2008.

5. Зисман Г. А. Тодес О.М. Курс общей физики: [учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по техническим, естественнонаучным и педагогическим направлениям и специальностям]: В 3-х т. / Г. А. Зисман, О. М. Тодес - Санкт-Петербург [и др.]: Лань, 2007-.

6. Грабовский Р. И. Курс физик]: учебное пособие / Р. И. Грабовский - Санкт-Петербург [и др.]: Лань, 2012.

7. .Савельев И. В. Курс общей физики [Текст]: учеб.пособие для вузов: в 3 т. / И. В. Савельев. – Изд. 10-е, стер. – СПб. [и др.] : Лань, 2008 – 432 с.

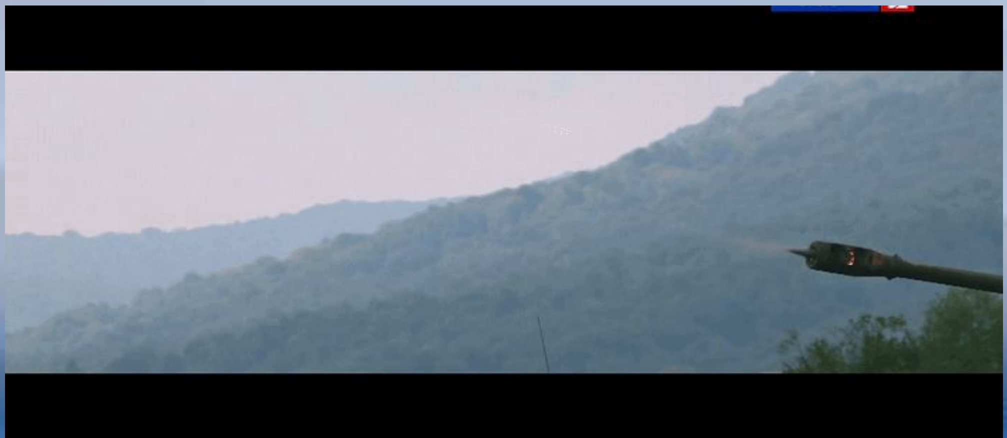
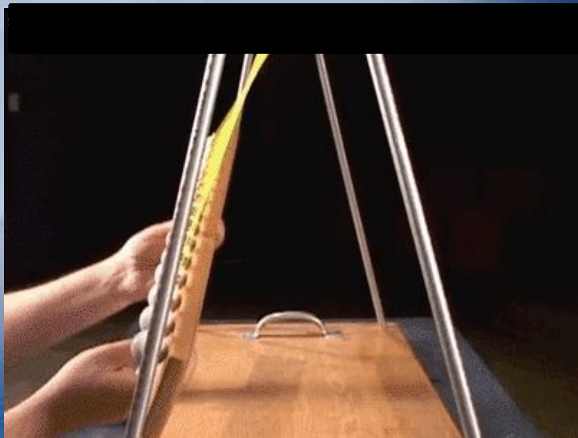
ФИЗИКА

1. Механика – кинематика, динамика
2. Электричество – электростатика, магнитостатика, электромагнетизм
3. Колебания и волны
4. Оптика – Волновая (интерференция, дифракция), квантовая
5. Атомная физика
6. Молекулярная физика и термодинамика, явления переноса


Физические
МЕХАНИК

Механика

– часть физики, которая изучает закономерности механического движения и причины, вызывающие или изменяющие это движение.

МЕХАНИКА

1. Классическая (неквантовая) механика

ньютоновская (нерелятивистская) механика
v«c
Тела любых размеров, области движения большие (>> 10^{-10} м), движение планет, электронов в электронно-лучевой трубке

релятивистская механика
v≈c
Тела любых размеров, движение электронов в ускорителе

2. Квантовая (нерелятивистская) механика
v«c, области движения малые(порядка 10^{-10} м), движение электронов в атоме.

Классическая (неквантовая) механика подразделяется на ньютоновскую (нерелятивистскую) механику и релятивистскую механику. В основе **ньютоновской механики** лежат законы Ньютона. Эта механика справедлива лишь для макроскопических тел, движущихся со скоростями, малыми по сравнению со скоростью света.

Релятивистской называется **механика,** учитывающая требования специальной теории относительности (СТО). Она справедлива и при скоростях, сравнимых со скоростью света. Заметим, что согласно СТО скорости тел не могут быть больше скорости света в вакууме

Механику подразделяют на кинематику, статику и динамику

- ***Кинематика*** описывает движение тел, не интересуясь причинами, обусловившими это движение;
- ***динамика*** изучает движение тел в связи с теми причинами (взаимодействиями между телами), которые обусловливают тот или иной характер движения.
- ***статика*** рассматривает условия равновесия тел; Законы статики являются частным случаем законов динамики. По этой причине в курсах физики статика обычно отдельно не изучается.

Кинематика

– раздел механики, в котором изучается механическое движение материальной точки (тела)

без рассмотрения причин, по которым это движение

***т*.**

Динамика

исследует законы движения и причины,

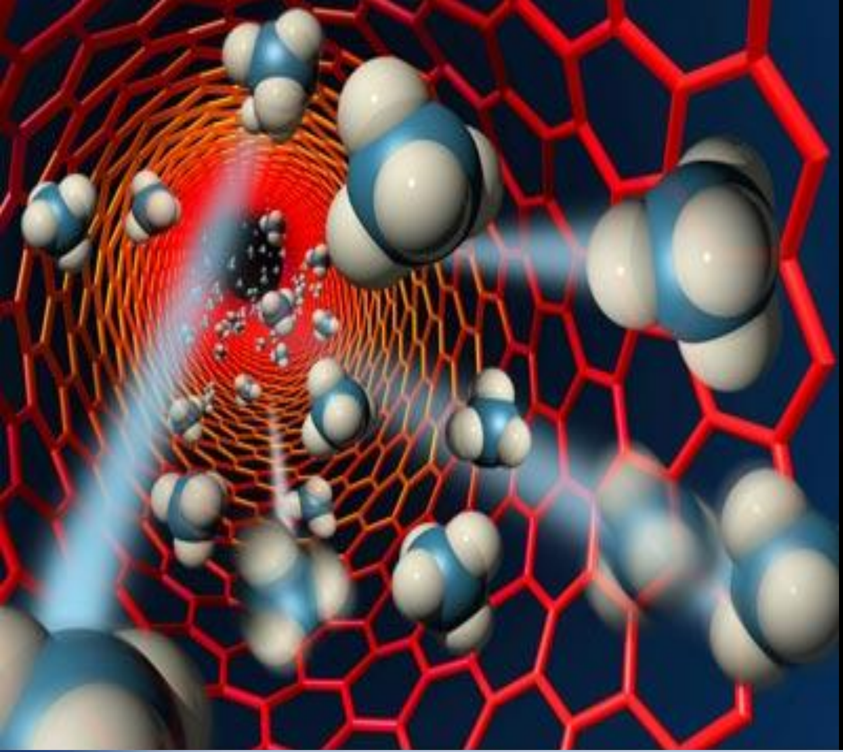
<u>вызывающие движение тел</u>,

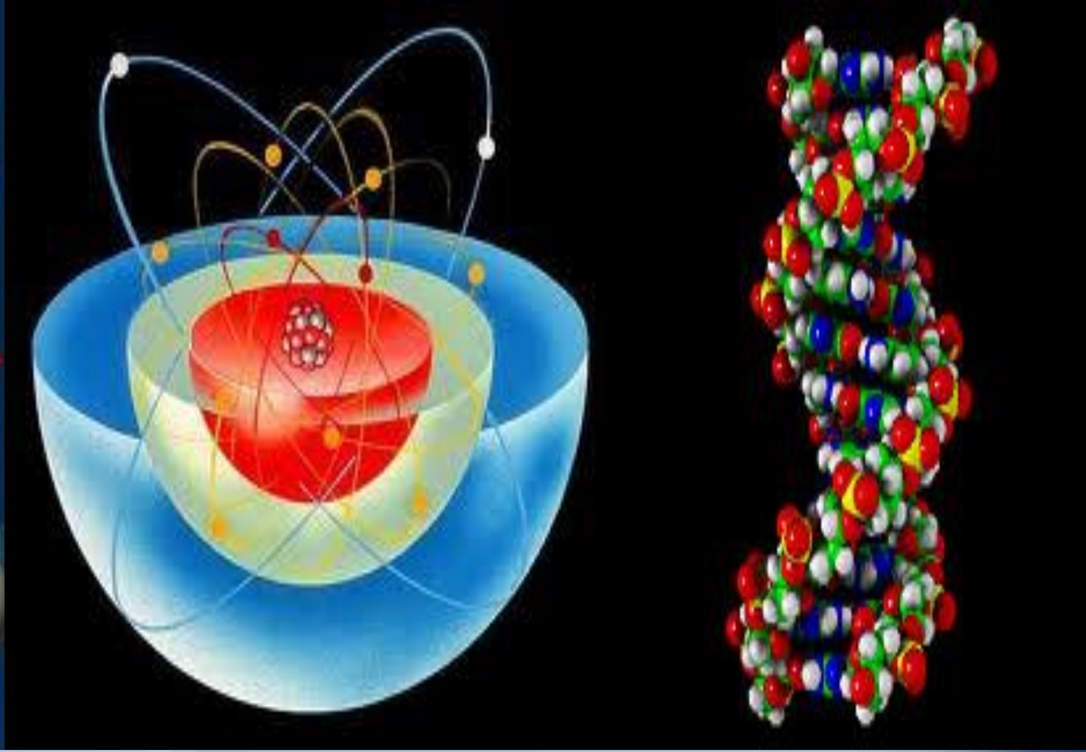
т.е. изучает движение материальных тел

под действием приложенных к ним сил.

В статике

исследуют условия равновесия тел или систем тел.





Изучение сложных явлений невозможно без введения упрощающих предположений, которые называют модельными.

Модель в физике

- упрощенная версия физической системы (или процесса), сохраняющая ее главные черты. Границы применимости физической теории определяются пределами применимости

В механике используют две модели:

материальная точка

и абсолютно твердое

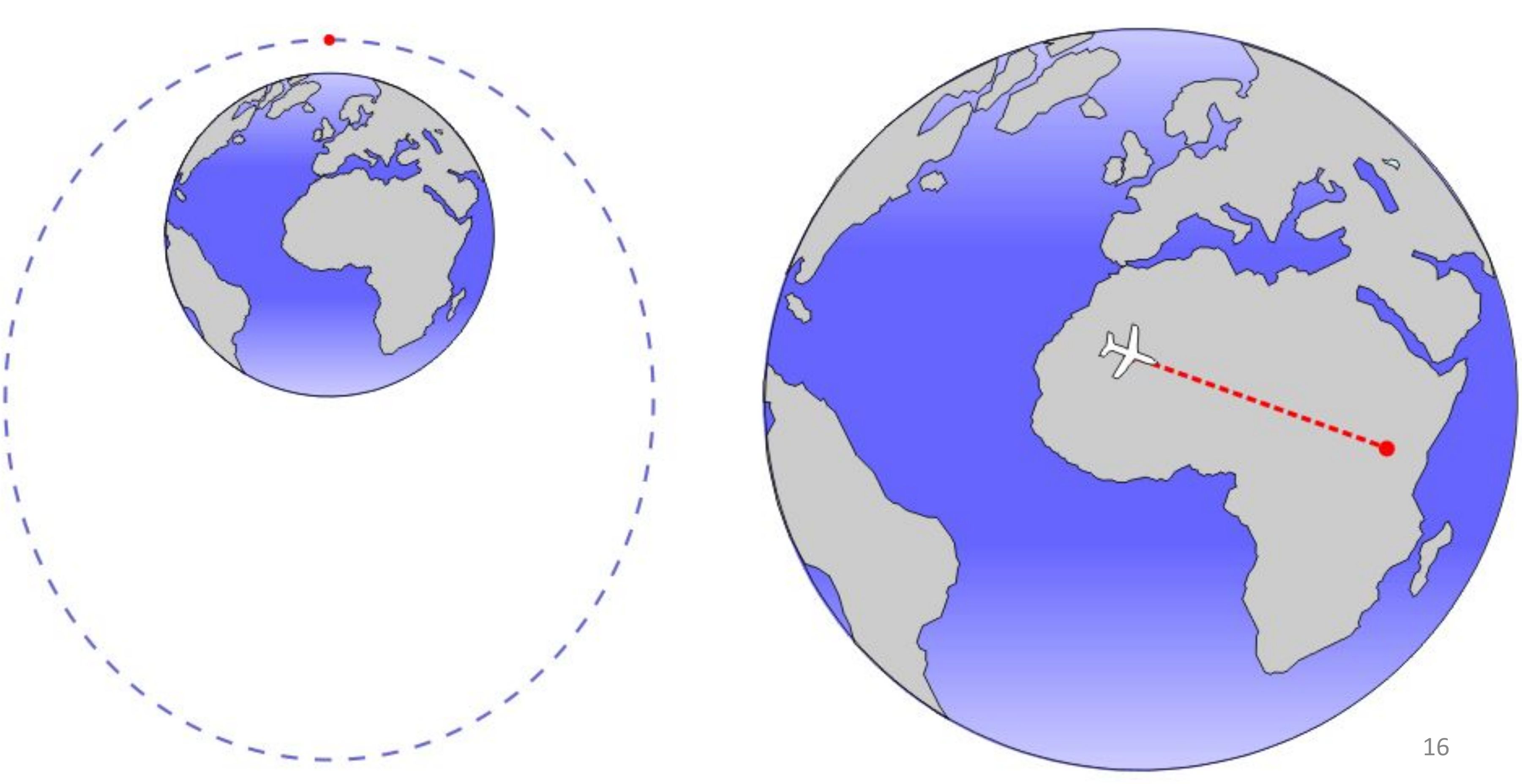
Материальная точка

- это тело , обладающее массой , размерами и формой которого можно пренебречь в условиях данной задачи.

Тело считается материальной точкой, если :

- расстояние, которое проходит тело > > размеров тела;
- расстояние от тела до других тел > > размеров тела.

Например:
движение спутника вокруг Земли; трансконтинентальный полет

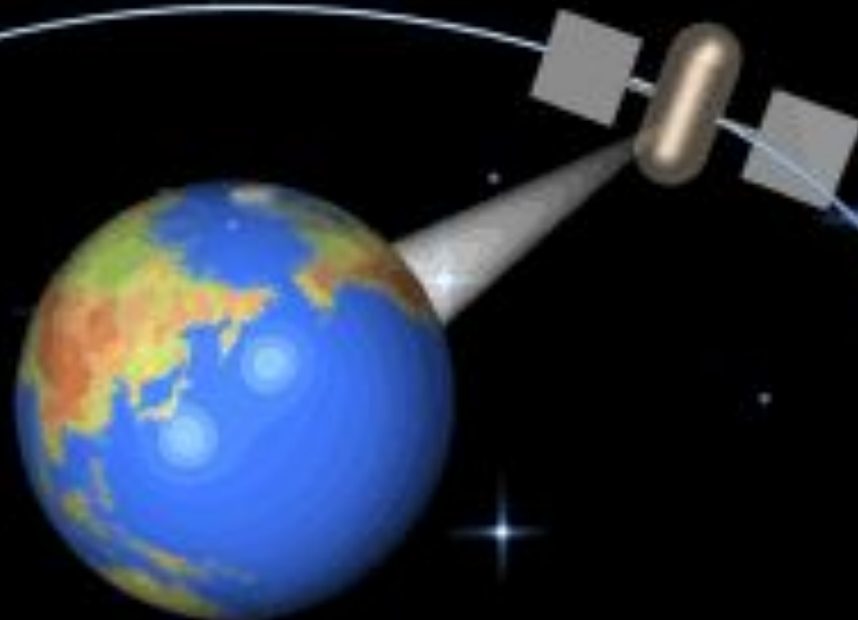


Абсолютно твердое тело

- тело деформациями которого можно в условиях данной задачи пренебречь.

Абсолютно твердым называется тело, конфигурация которого не меняется при любых воздействиях на него.

КИНЕМАТИ
КА



МАТЕРИАЛЬН
ОЙ

ТОЧК
И

Основные понятия кинематики

Кинематикой называют раздел механики, в котором движение тел рассматривается без выяснения причин, его вызывающих.

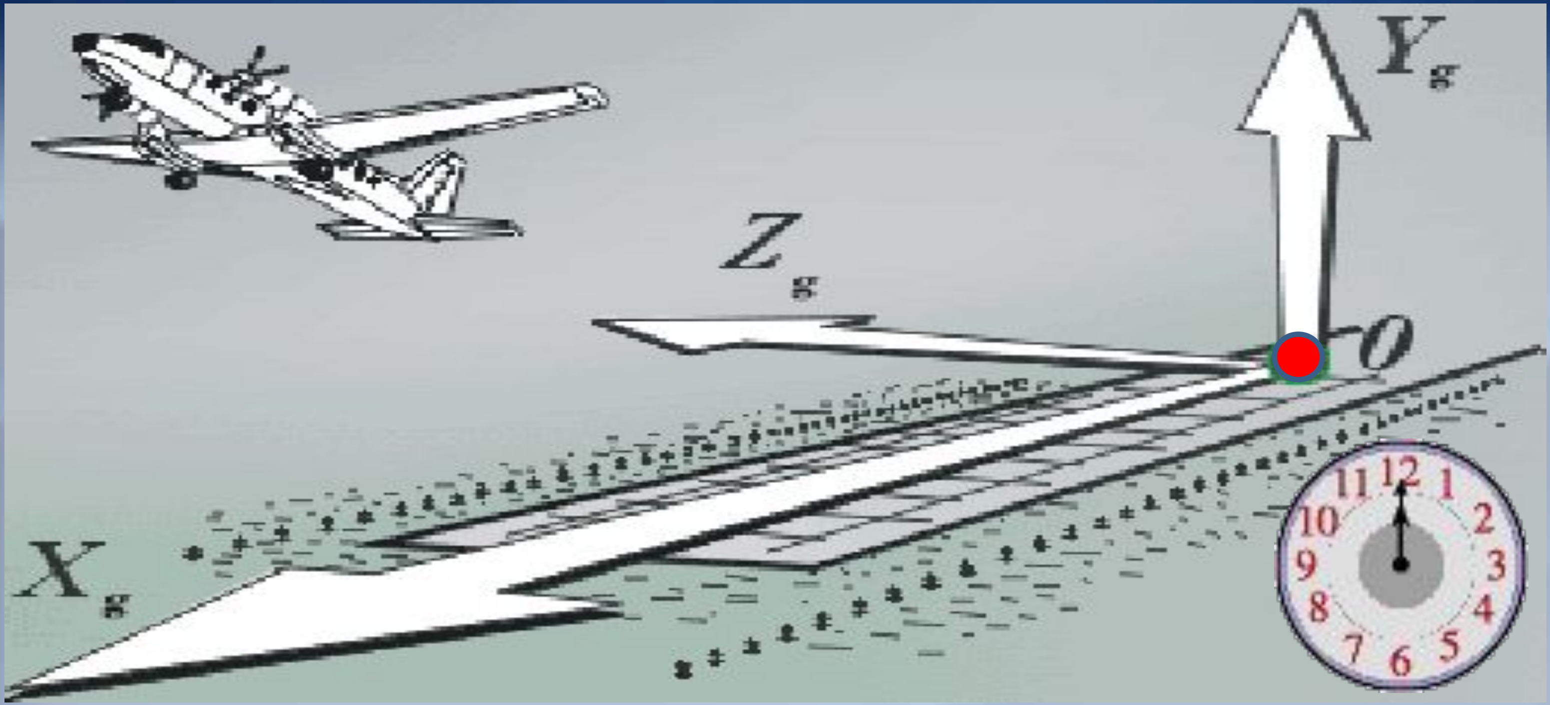
Механическим движением тела называют изменение его положения в пространстве относительно других тел с течением времени.

Тело, размерами которого в данных условиях можно пренебречь, называется ***материальной точкой***.

Механическое движение ***относительно***. Движение одного и того же тела относительно разных тел оказывается различным.

Для описания движения тела нужно указать, по отношению к какому телу рассматривается движение. Это тело называют ***телом отсчета***.

Система координат, связанная с телом отсчета, и часы для отсчета времени образуют ***систему отсчета***, позволяющую определять положение движущегося тела в любой момент времени.



Система отсчета

состоит из тела отсчета, связанной с ней системой координат и часов, неподвижных относительно тела отсчета

Для того, чтобы выбрать систему отсчета нужно:

1. Выбрать объект, относительно которого будет рассматриваться движение, т.е. выбрать тело отсчета;

2. Выбрать систему координат, начало которой должно совпадать с одной из точек тела отсчета;

3. Выбрать начало отсчета времени.

Тело отсчета

- произвольно выбранное тело, относительно которого определяется положение других (движущихся тел).

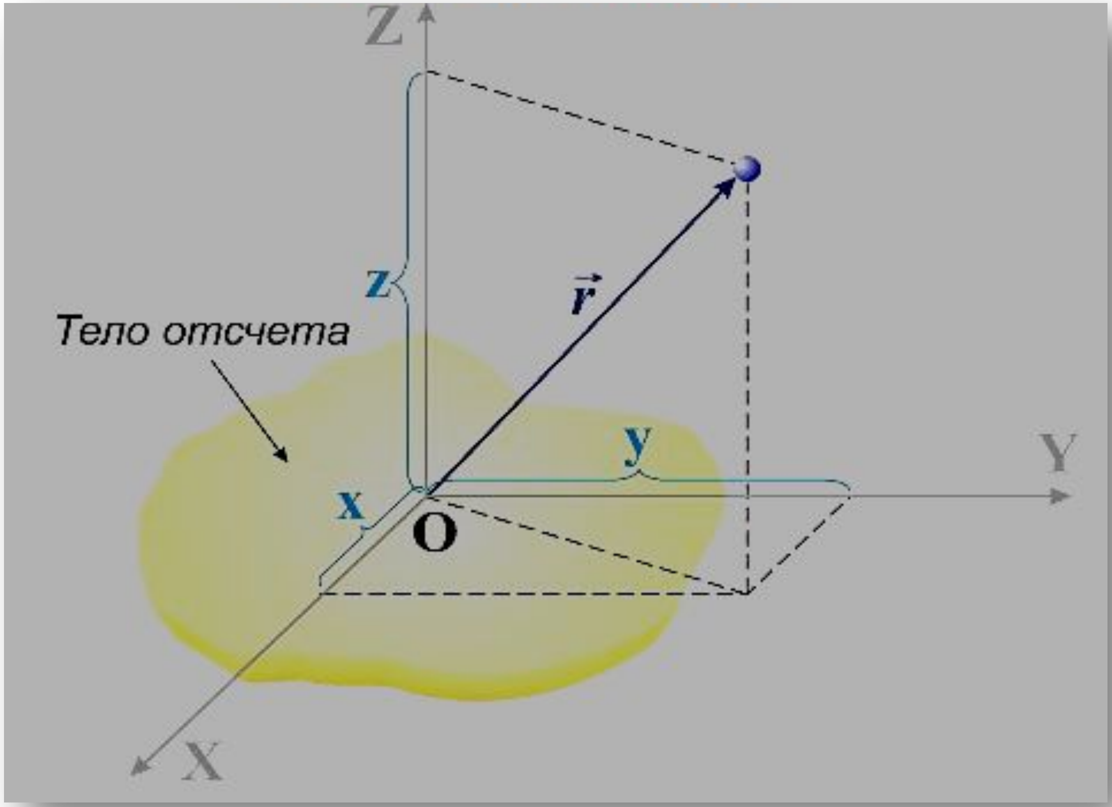
-- В разных системах отсчета траектории движения одного и того же тела различны.

- Положение любого движущегося тела определяется по отношению к телу отсчета.

Поэтому механическое движение **всегда относительно.**

Система отсчета

Чаще всего в физике используют декартову систему координат



<u>Определение положения точки в пространстве</u>

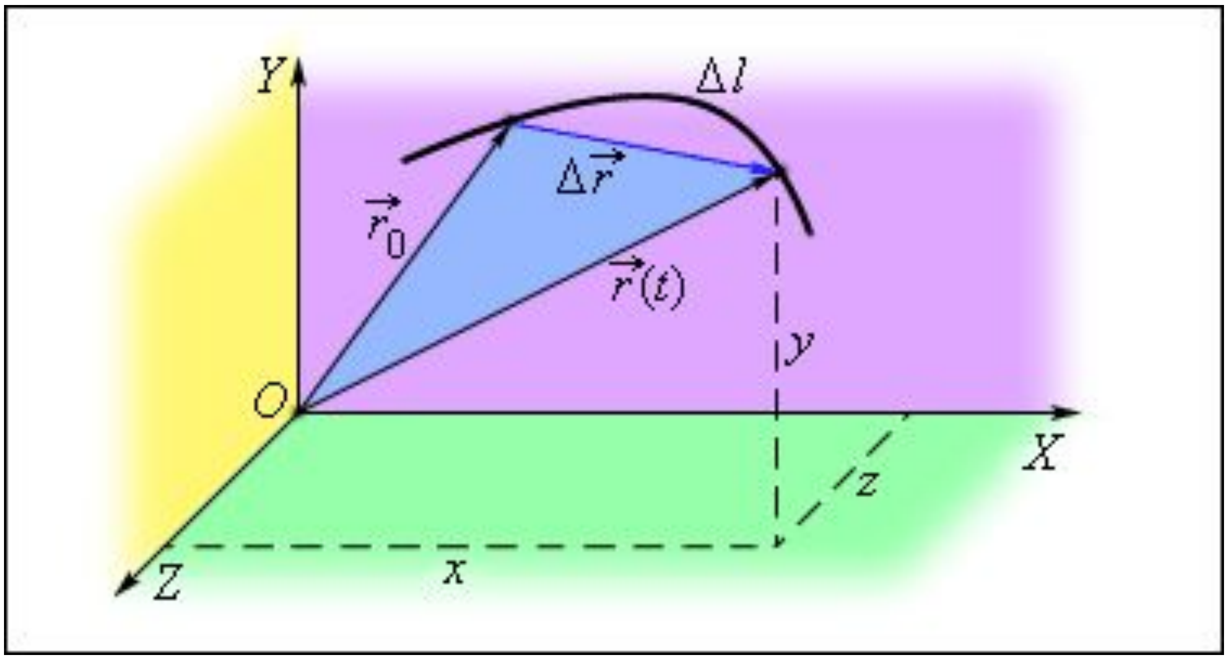
- Положение материальной точки в пространстве в любой момент времени (***закон движения***) можно определять, применяя :

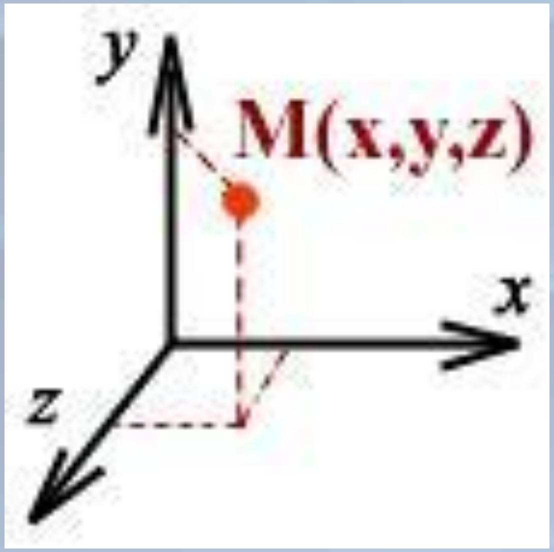
1. ***Координатный способ*** **(**с помощью зависимости координат от времени)

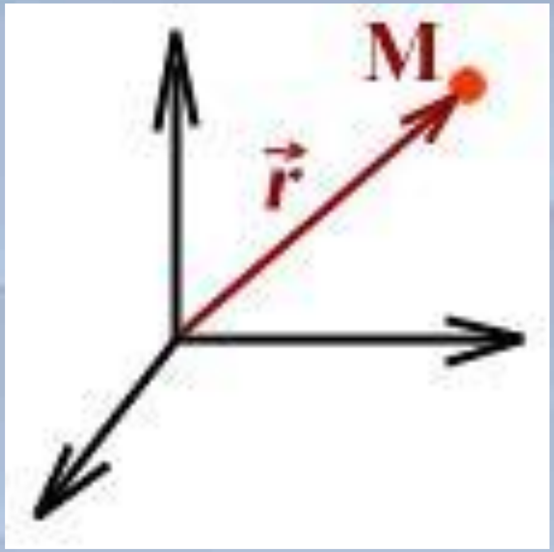
$$x = x(t), y = y(t), z = z(t)$$

2. В*екторный способ* (при помощи зависимости от времени радиус-вектора проведенного из начала координат до данной точки)

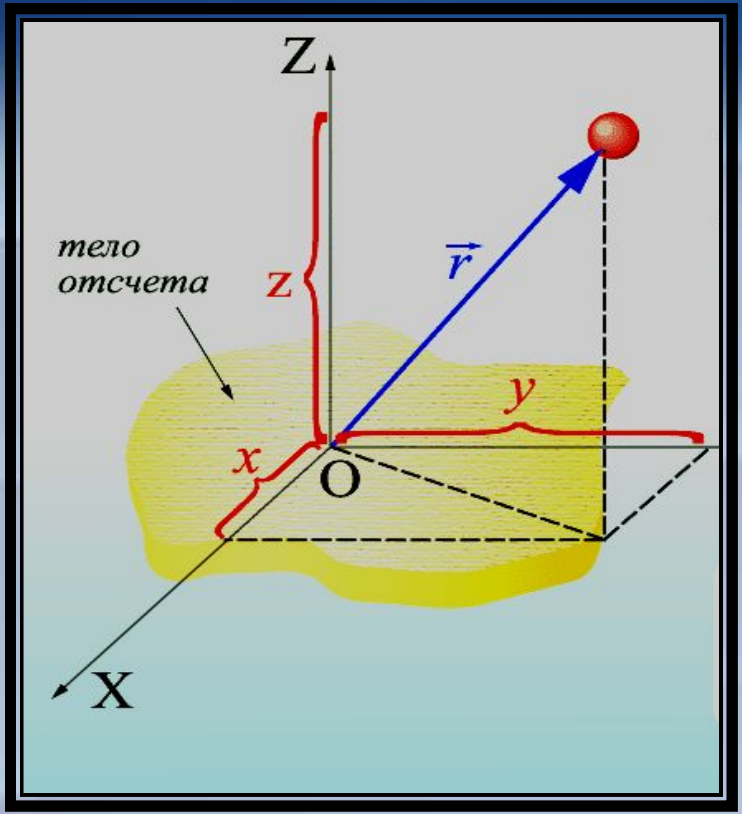
$$\vec{r} = \vec{r}(t)$$







Положение материальной точки в данной системе отсчета определяется или ее координатами или радиусом – вектором.



Радиусом – вектором $\vec{r}$

точки называется вектор, проведенный из начала координат в данную точку.

Основная задача механики: зная состояние системы (координаты и скорости) в некоторый начальный момент времени t_0, а также законы, управляющие движением, определить состояние системы во все последующие моменты времени t.

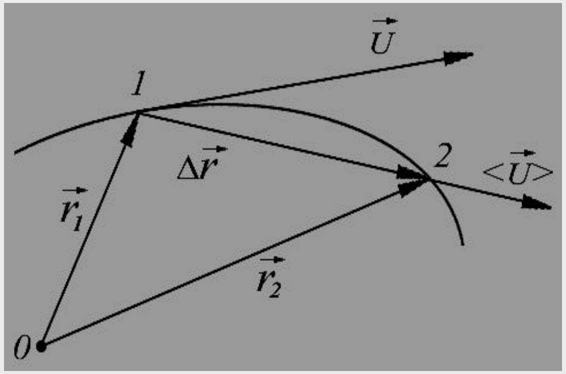
- Для этого используются уравнения движения − уравнения, позволяющие определить положение материальной точки (системы) в пространстве в любой момент времени по известным начальным условиям. С математической точки зрения это означает, что уравнения движения - это уравнения второго порядка).

Для описания движения необходимо задать:

а) начало отсчета радиус - вектора $\vec{r}$;

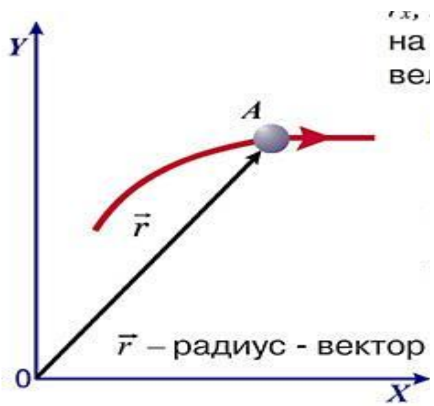
б) начало отсчета времени t;

в) закон движения точки $\vec{r}$ (t).



Закон движения

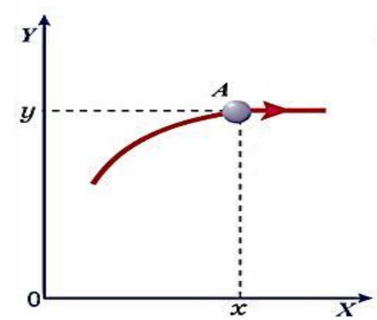
- уравнение в координатной или векторной форме, показывающее зависимость радиус-вектора от времени.



$$\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{\upsilon}_0 t + \frac{\vec{a}t^2}{2}$$

$$X = X_0 + \upsilon_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$$

$$Y = Y_0 + \upsilon_{0y} t + \frac{a_y t^2}{2}$$



<u>Кинематические характеристики движения</u>

- Перемещение, траектория, пройденный путь, скорость , ускорение.

Перемещение, траектория

Перемещаясь с течением времени из одной точки в другую в выбранной системе отсчета, тело (материальная точка) описывает некоторую линию, которую называют ***траекторией движения тела***.

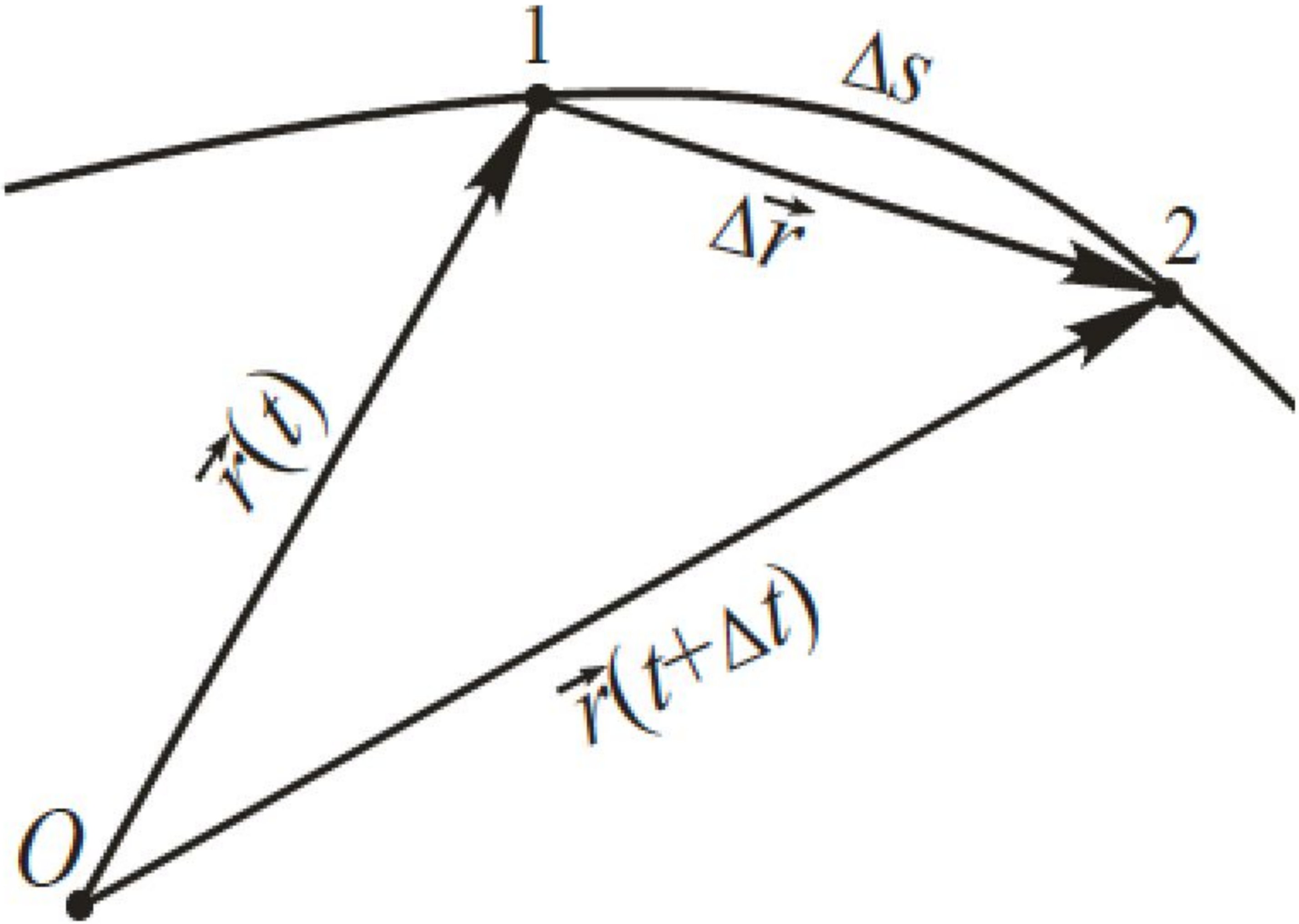
Перемещением тела $\Delta\vec{r} = \vec{r} - \vec{r_0}$ называют направленный отрезок прямой, соединяющий начальное положение тела с его последующим положением.

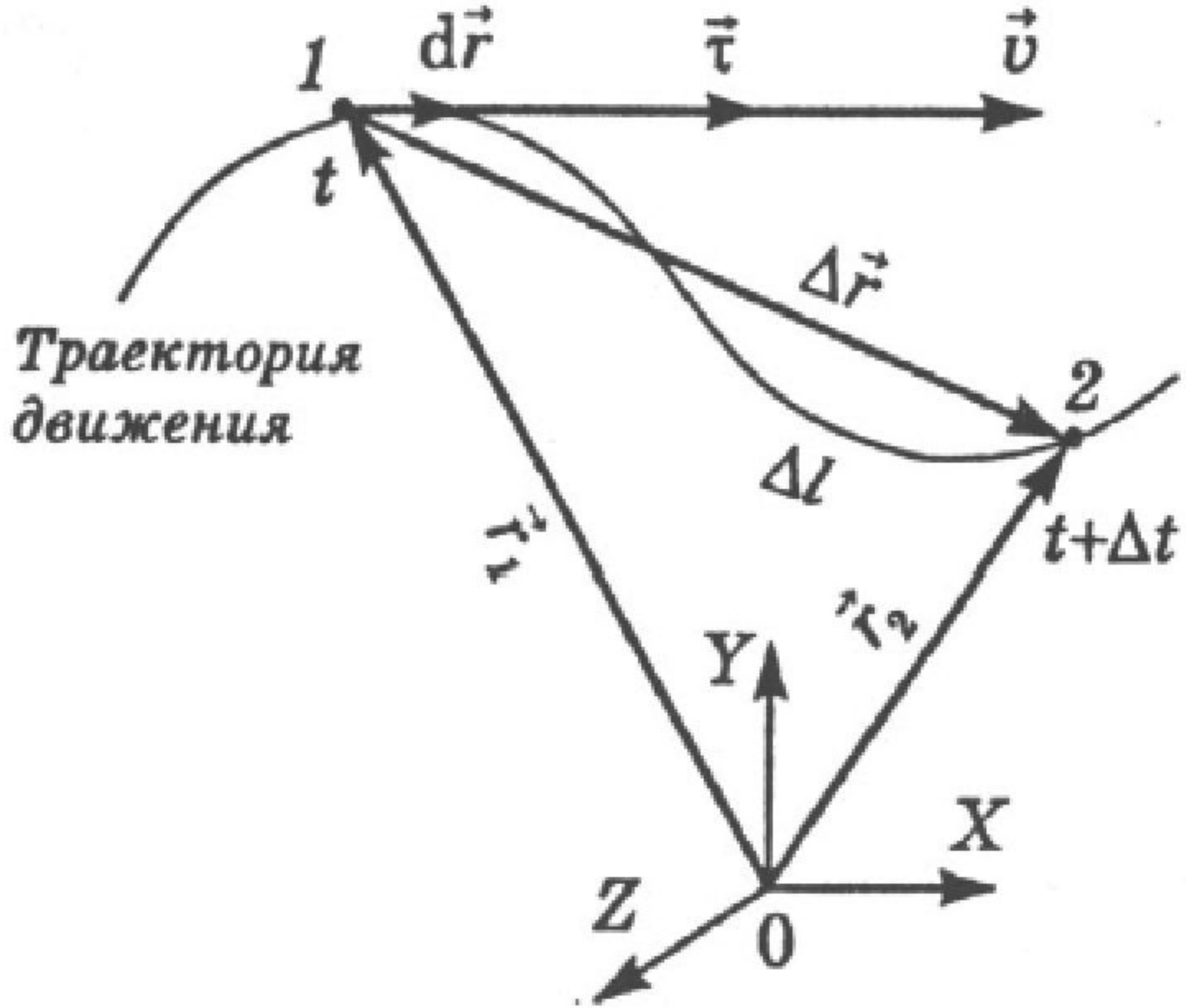
Перемещение - векторная величина.

Пройденный путь l равен длине дуги траектории, пройденной телом за некоторое время t.

Путь – скалярная величина.

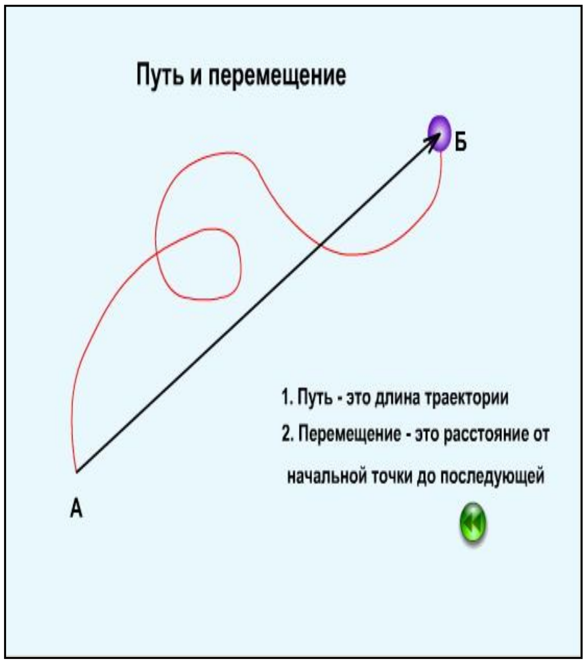
Если движение тела рассматривать в течение достаточно короткого промежутка времени $(\Delta t \to 0)$, то вектор перемещения окажется направленным по касательной к траектории в данной точке, а его длина будет равна пройденному пути.


1
Δs
$\Delta\vec{r}$
2
$\vec{r}(t)$
$\vec{r}(t+\Delta t)$
O


1
$d\vec{r}$
$\vec{\tau}$
$\vec{v}$
t
$\Delta\vec{r}$
Траектория
движения
2
Δl
$\vec{r}_1$
$t+\Delta t$
$\vec{r}_2$
Y
X
Z
0

Путь и перемещение

Путь − неотрицательная, неубывающая функция времени. Может случиться так, что перемещение равно нулю, а путь достигает значительной величины.



Скорость

- Для характеристики движения вводится понятие ***скорости. Различают среднюю и мгновенную скорость .***

Вектор средней скорости: $$\vec{v}_{\text{ср}} = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}$$

В физике наибольший интерес представляет не средняя, а ***мгновенная скорость***, которая определяется как предел, к которому стремится вектор средней скорости на бесконечно малом промежутке времени Δt:

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\overrightarrow{\Delta r}}{\Delta t}$$

В математике такой предел называют ***производной*** и обозначают $\frac{dr}{dt}$ или $\vec{r}'(t)$.

Мгновенная скорость определяется первой производной радиуса-вектора движущейся точки по времени: $\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{r}'$

В декартовых координатах, **радиус-вектор** зависит от времени:

$$\vec{r} = \vec{r}(t) = x(t)\vec{e}_x + y(t)\vec{e}_y + z(t)\vec{e}_z$$

$$\vec{v}(t) = v_x(t)\vec{e}_x + v_y(t)\vec{e}_y + v_z(t)\vec{e}_z$$

где v_x, v_y, v_z — компоненты скорости, т. е. проекции вектора $\vec{v}$ на координатные оси.

$$v_x = \dot{x} = \frac{dx}{dt}, v_y = \dot{y} = \frac{dy}{dt}, v_z = \dot{z} = \frac{dz}{dt}$$

компоненты скорости равны производным соответствующих координат по времени

Средняя и мгновенная скорости

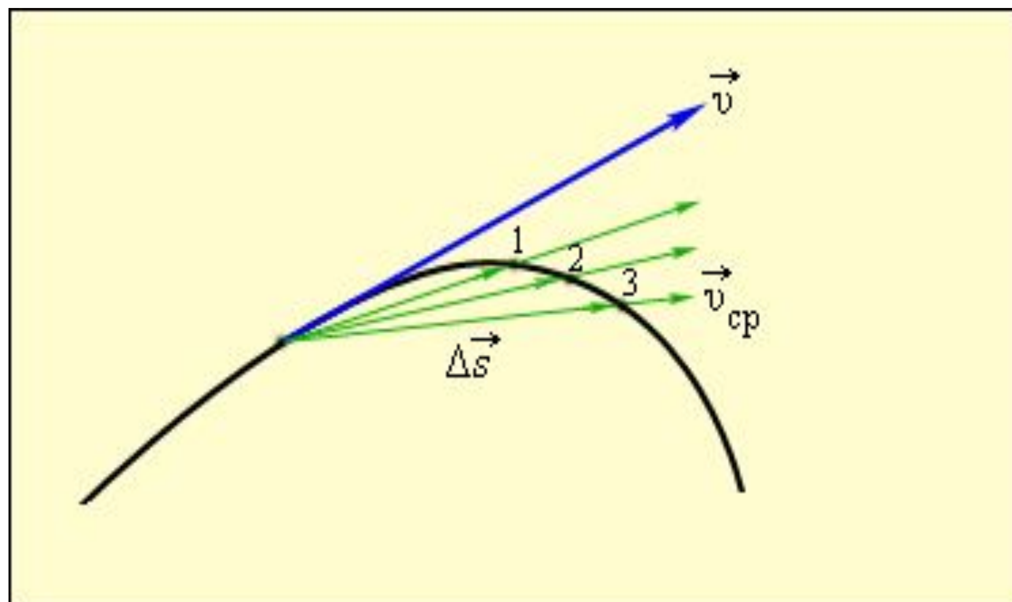
- Различие между средней и мгновенной скоростями показано на рисунке.

$\Delta\vec{r}_1$, $\Delta\vec{r}_2$, $\Delta\vec{r}_3$ – перемещения за время $\Delta t_1 < \Delta t_2 < \Delta t_3$ соответственно. При $t \to 0$ $\overrightarrow{v_{\text{ср}}} \to \vec{v}$

Мгновенная скорость тела в любой точке криволинейной траектории направлена ***по касательной к траектории*** в этой точке.

Модуль мгновенной скорости материальной точки равен первой производной ее пути s (l) по времени:

$$v = \frac{ds}{dt}.$$



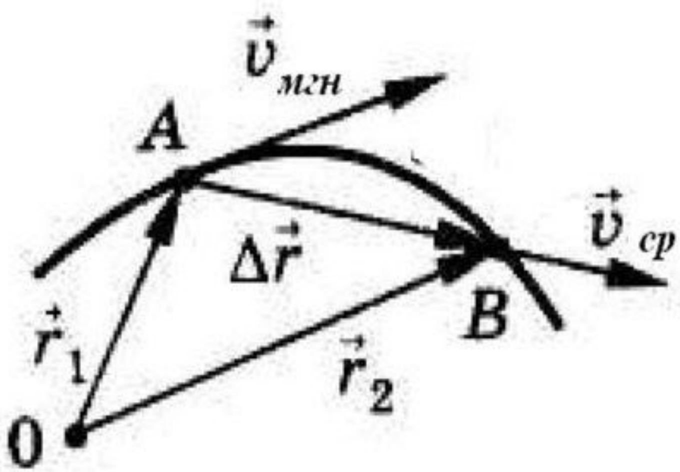
$$\vec{v}_{\text{ср}} = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}.$$

Вектор средней скорости направлен вдоль хорды, стягивающей соответствующий участок траектории движения материальной точки, т.е. направление вектора средней скорости совпадает с направлением перемещения материальной точки.

- Если промежуток времени неограниченно уменьшить, то средняя скорость стремится к предельному значению, которое называется мгновенной скоростью

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt}$$

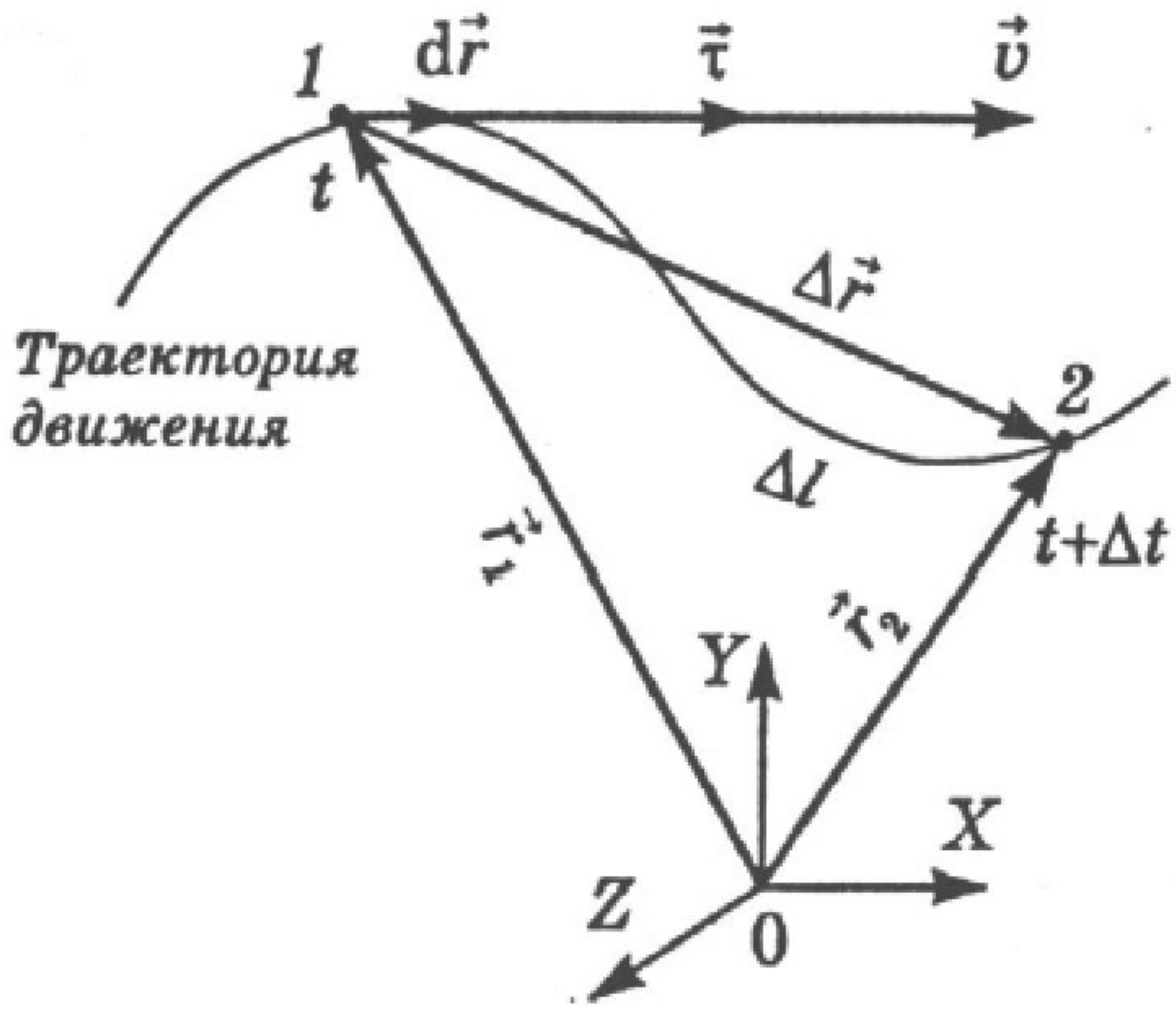
Мгновенная скорость



- ***Мгновенной линейной скоростью*** называется предел отношения перемещения к промежутку времени, за который это перемещение произошло, при стремлении к нулю промежутка времени

$$\vec{v}_{\text{мгн}} = \lim_{\Delta t \to o} \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\,\vec{r}}{d\,t}$$

- Мгновенная скорость направлена по касательной к траектории.


1
dr⃗
τ⃗
v⃗
t
Δr⃗
Траектория
движения
2
Δl
r⃗1
t+Δt
r⃗2
Y
X
Z
0

<u>*Ускорение*</u>

Скорость частицы $\vec{v}$ может изменяться со временем, как по величине, так и по направлению***. Ускорение* *характеризует быстроту изменения скорости*.**

- Как и быстрота изменения любой функции времени, ускорение определяется производной вектора скорости $\vec{\boldsymbol{v}}$ по времени t, то есть второй производной радиус-вектора $\vec{r}$:
- $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \dot{\vec{v}} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = \ddot{\vec{r}}$.

Запишем скорость в виде

$$\vec{v} = v \cdot \vec{\tau}$$

- Продифференцируем вектор скорости, записанный в данном представлении, и получим

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d(v \cdot \vec{\tau})}{dt} = v\frac{d\vec{\tau}}{dt} + \vec{\tau}\frac{dv}{dt}$$

$$\vec{a} = \vec{a}_n + \vec{a}_\tau.$$

Где $\vec{a} = \vec{\tau}\frac{dv}{dt}$ - это тангенциальное ускорение, которое характеризует быстроту изменения скорости по модулю .

$\vec{a}_n = \vec{n}\frac{v^2}{R}$ -нормальное ускорение ,характеризует быстроту изменения скорости по направлению

Изменение вектора скорости по величине и направлению

- При движении тела по криволинейной траектории его скорость $\vec{v}$ изменяется по модулю и направлению.

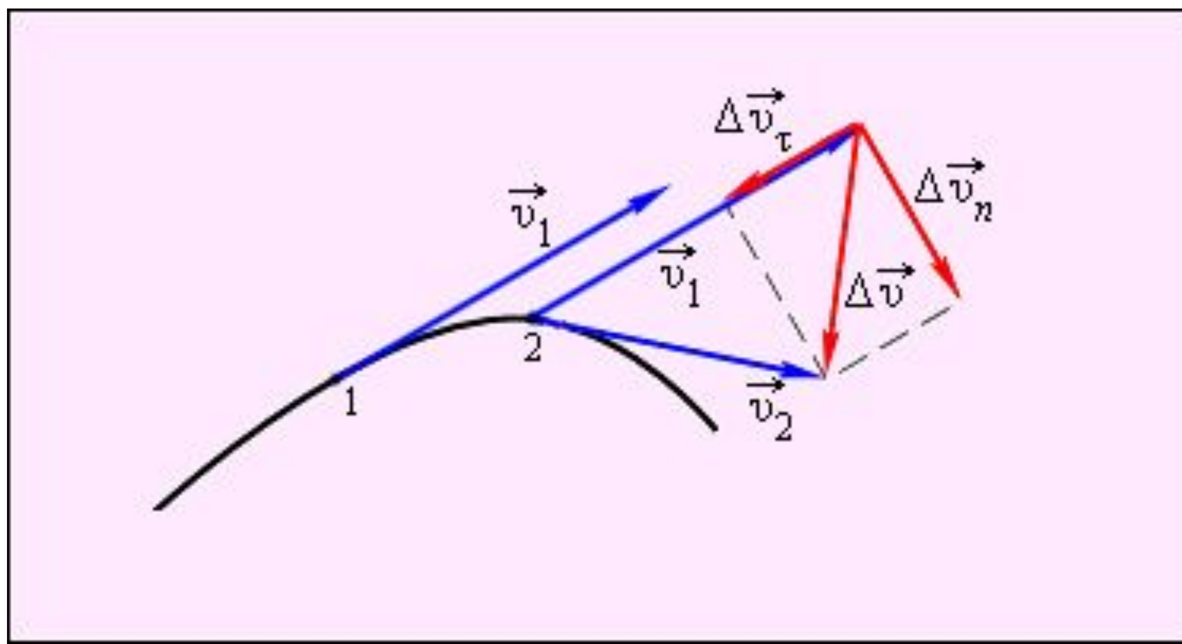
Изменение вектора скорости $\vec{v}$ за некоторый малый промежуток времени Δt можно задать с помощью вектора $\Delta\vec{v}$.

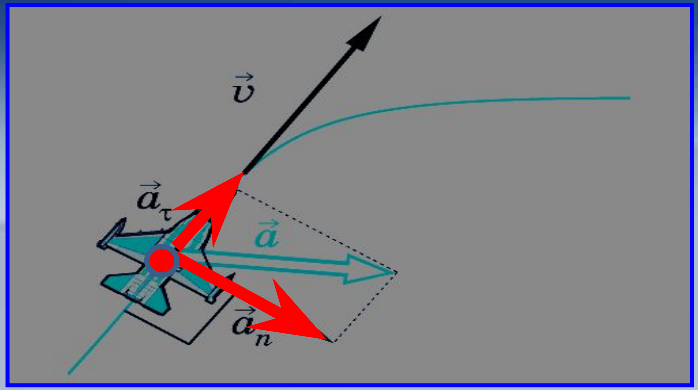
Вектор изменения скорости $\vec{v}$ за малое время Δt можно разложить на две составляющие (по модулю и по направлению):

$\vec{v_\tau}$ направленную вдоль вектора $\vec{v}$ (***касательная составляющая***),

$\vec{v_n}$ направленную перпендикулярно вектору $\vec{v}$ (***нормальная составляющая***).

$$\Delta\vec{v} = \Delta\vec{v}_\tau + \Delta\vec{v}_n$$





Удобно и целесообразно вектор $\vec{a}$ разложить на два составляющих вектора: на тангенциальное ускорение $\vec{a_\tau}$ (характеризующее изменение скорости по модулю)

и нормальное ускорение $\vec{a_n}$ (характеризующее изменение скорости по направлению).

Мгновенным ускорением $\overrightarrow{\boldsymbol{a}}$ тела называют предел отношения малого изменения скорости $\Delta\vec{v}$ к малому промежутку времени $\boldsymbol{\Delta t}$, в течение которого происходило изменение скорости:

$$\vec{\boldsymbol{a}} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\overrightarrow{\Delta \boldsymbol{v}}}{\Delta \boldsymbol{t}} = \frac{\boldsymbol{d}\vec{\boldsymbol{v}}}{\boldsymbol{dt}} = \overrightarrow{\boldsymbol{v}'}$$

Направление вектора ускорения $\vec{\boldsymbol{a}}$ в случае криволинейного движения не совпадает с направлением вектора скорости $\vec{\boldsymbol{v}}$.

Составляющие вектора ускорения $\vec{\boldsymbol{a}}$ называют ***касательным (тангенциальным)*** $\overrightarrow{\boldsymbol{a}_\tau}$ и ***нормальным*** $\overrightarrow{\boldsymbol{a}_n}$ ускорениями.

Касательное (тангенциальное) ускорение указывает, насколько быстро изменяется скорость тела по модулю:

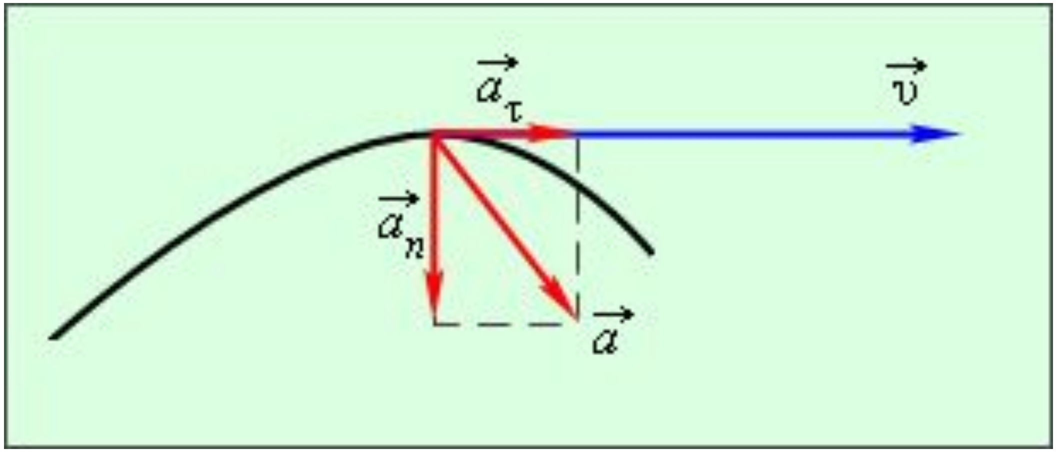
$$\boldsymbol{a}_\tau = \frac{\boldsymbol{dv}}{\boldsymbol{dt}}$$

Вектор направлен по касательной к траектории.

Нормальное ускорение характеризует быстроту изменения скорости по направлению (направлено к центру кривизны траектории):

$$\boldsymbol{a}_n = \frac{\boldsymbol{v}^2}{\boldsymbol{r}}$$

Полное ускорение при криволинейном движении – геометрическая сумма тангенциальной и нормальной составляющих: $\vec{a} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n$



Модуль полного ускорения равен:

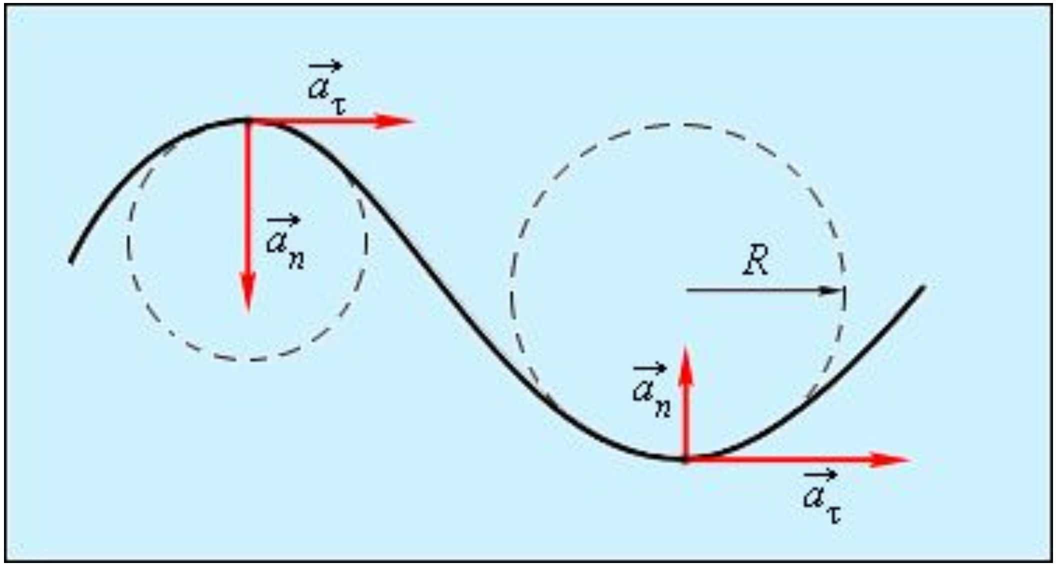
$$a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2}.$$

Криволинейное движение можно представить как движение по дугам окружностей.

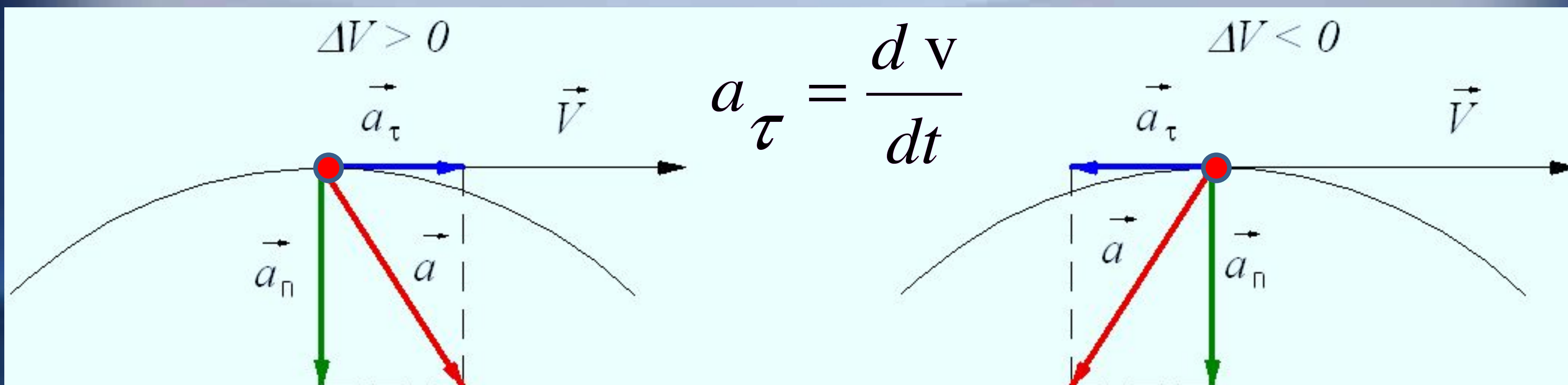
Нормальное ускорение зависит от модуля скорости ***v*** и от радиуса ***R*** окружности, по дуге которой тело движется в данный момент:

$$a_n = \frac{v^2}{R}.$$

Вектор $\vec{a}_n$ всегда направлен к центру окружности.



Направление вектора тангенциального ускорения совпадает с направлением линейной скорости или противоположно ему.



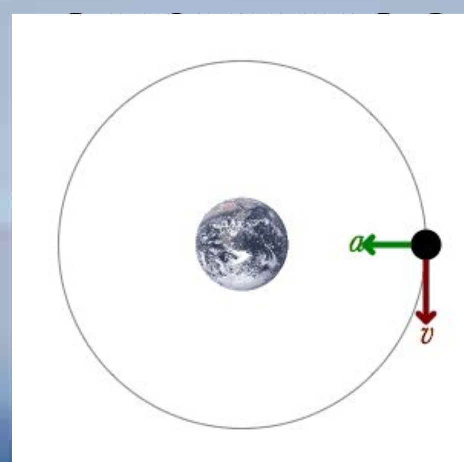
$$a_\tau = \frac{d\,\mathrm{v}}{dt}$$

Вектор $\overrightarrow{a_\tau}$, как и вектор скорости, направлен по касательной к траектории.

В случае движения по окружности нормальное ускорение называется [центростремительным]().

При движении по окружности с постоянной скоростью нормальное ускорение постоянно по модулю и направлено к центру окружности.

$$a_ц = \frac{v^2}{R}$$

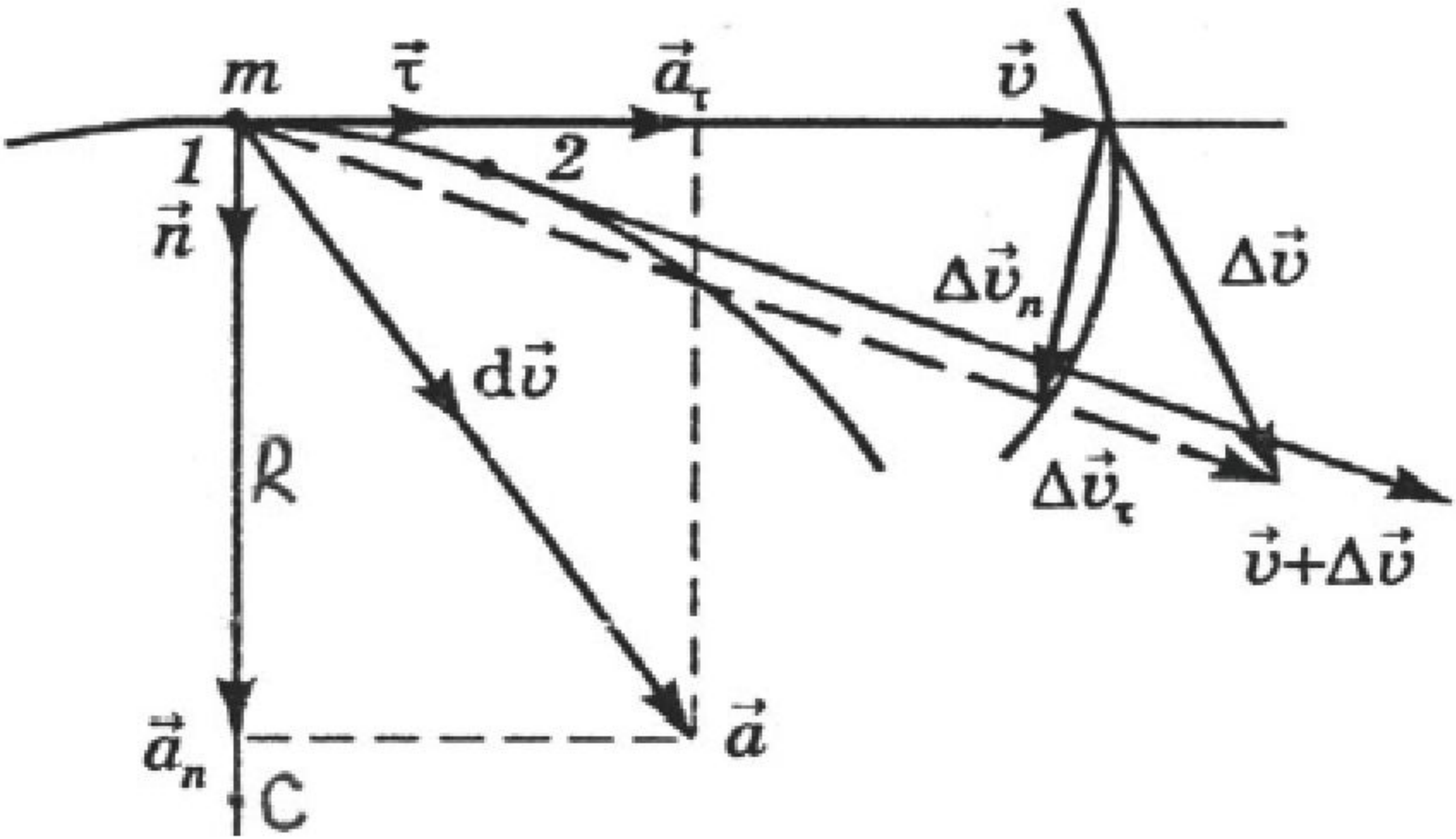


$$a_ц = \frac{4\pi^2 R}{T^2}$$

Полное ускорение $\vec{a} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n$

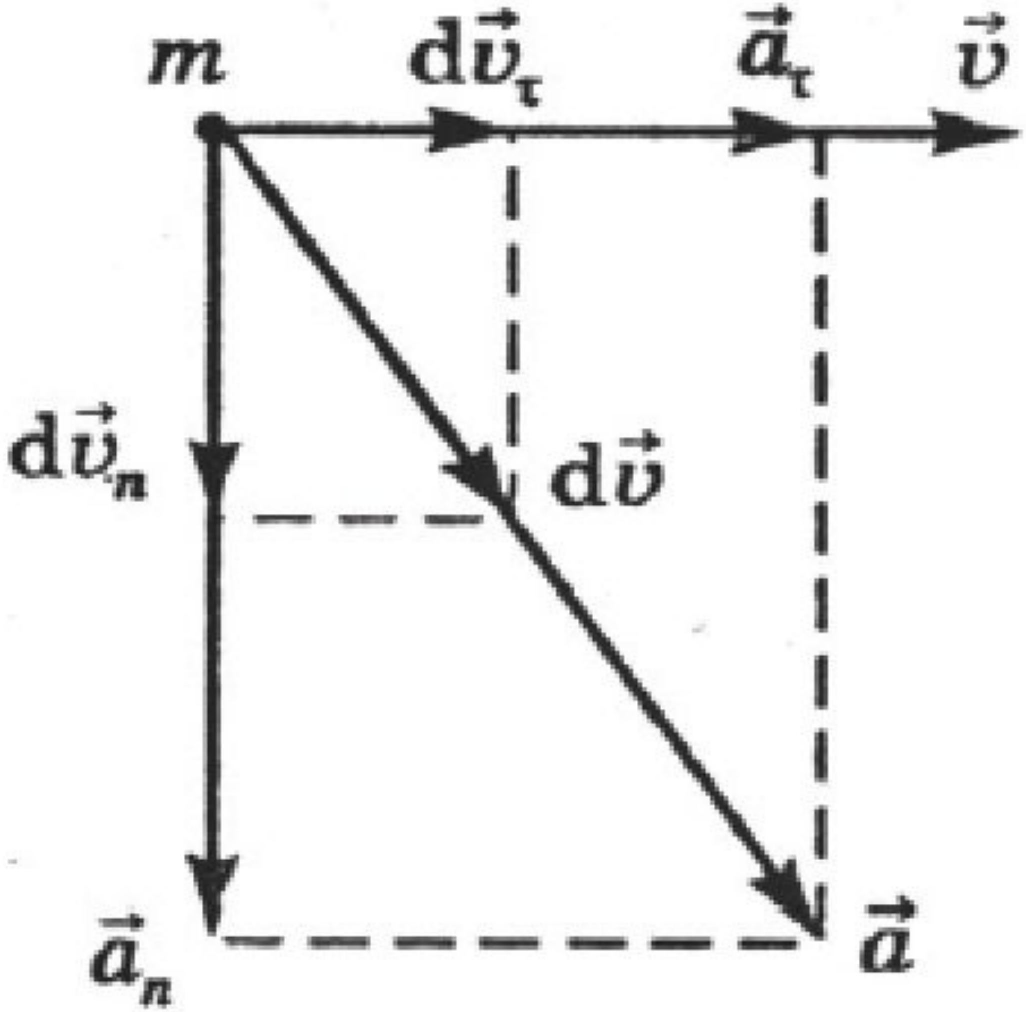
определяется по правилу параллелограмма. Модуль

- $$a = \sqrt{a_n^2 + a_\tau^2} = \sqrt{\left(\frac{dv}{dt}\right)^2 + \left(\frac{v^2}{R}\right)^2}$$

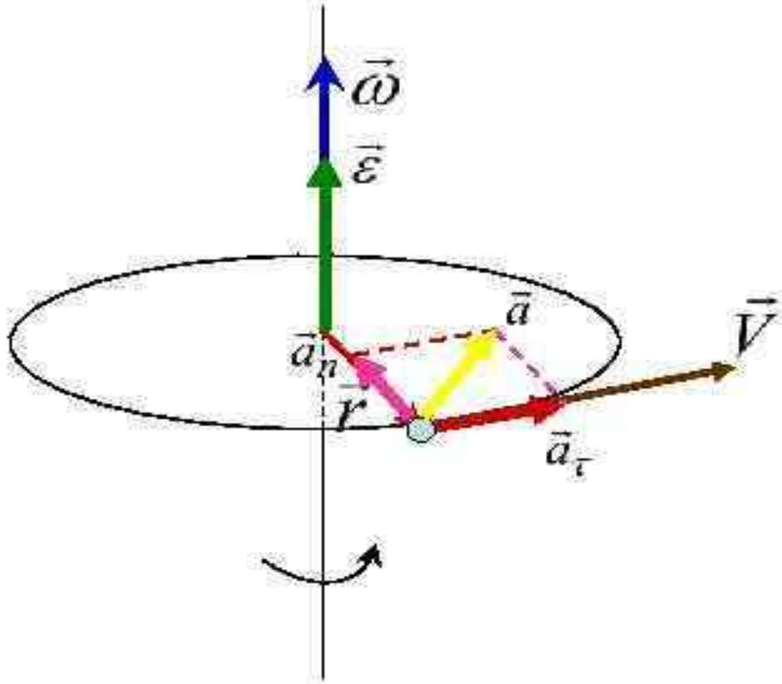


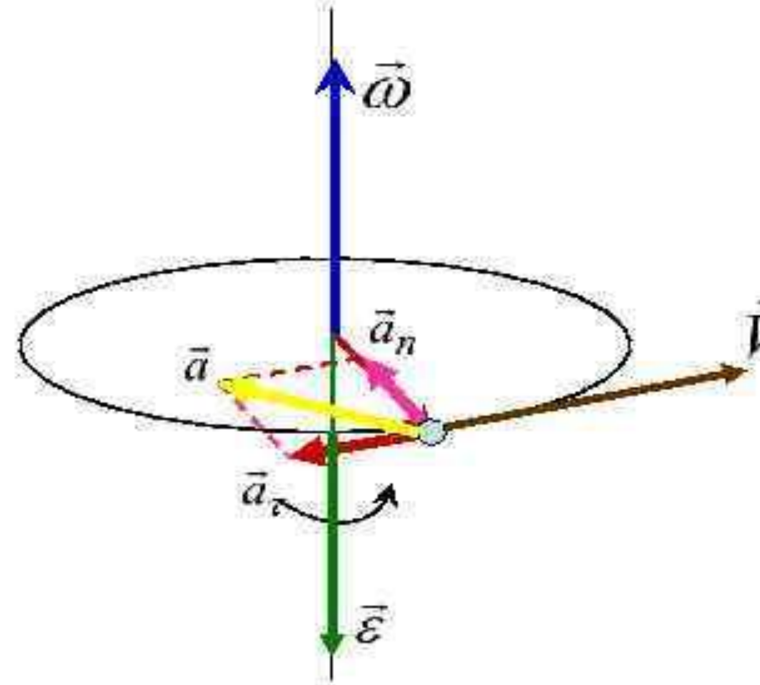
m
$\vec{\tau}$
$\vec{a}_\tau$
$\vec{v}$
1
2
$\vec{n}$
$\Delta\vec{v}_n$
$\Delta\vec{v}$
$d\vec{v}$
R
$\Delta\vec{v}_\tau$
$\vec{v}+\Delta\vec{v}$
$\vec{a}$
$\vec{a}_n$
C

a



б


$\vec{\omega}$
$\vec{\varepsilon}$
$\vec{a}$
$\vec{V}$
$\vec{a}_n$
$\vec{r}$
$\vec{a}_\tau$


$\vec{\omega}$
$\vec{V}$
$\vec{a}_n$
$\vec{a}$
$\vec{a}_\tau$
$\vec{\varepsilon}$

Простейшие виды движения

$\overline{a} = \overline{a}_\tau + \overline{a}_n$

1) Равномерное прямолинейное движение

$\overline{a}_n = 0 \quad \overline{a}_\tau = 0 \quad \overline{a} = 0$

2) Равнопеременное прямолинейное движение

$\overline{a}_n = 0 \quad \overline{a}_\tau \neq 0 \quad \overline{a} = \overline{a}_\tau$

3) Равномерное криволинейное движение

$\overline{a}_n \neq 0 \quad \overline{a}_\tau = 0 \quad \overline{a} = \overline{a}_n$

4) Равонопеременное криволинейное

$\overline{a}_n \neq 0 \quad \overline{a}_\tau \neq 0 \quad \overline{a} \neq 0$

$\overline{a} = \overline{a}_\tau + \overline{a}_n$

КИНЕМАТИКА ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА

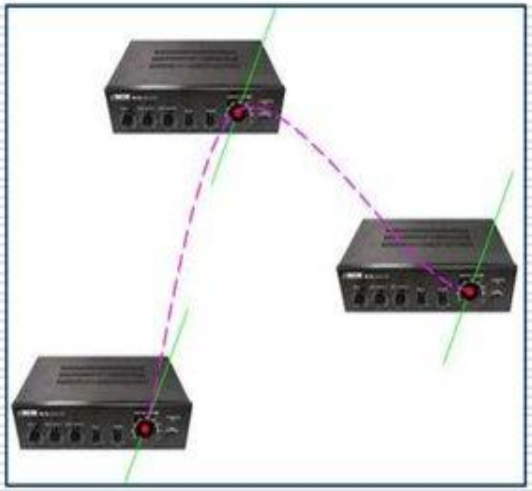
Движение твердого тела отличается от движения материальной точки. Обычно выделяют два <u>простых</u> вида движения тела:

- **Поступательное** - это движение, при котором любая прямая, проведенная в теле, перемещается параллельно самой себе так, что все точки тела описывают одинаковые траектории.
- **Вращательное** - это движение, при котором все точки тела двигаются по окружностям разных радиусов, центры которых лежат на одной прямой, называемой осью вращения.

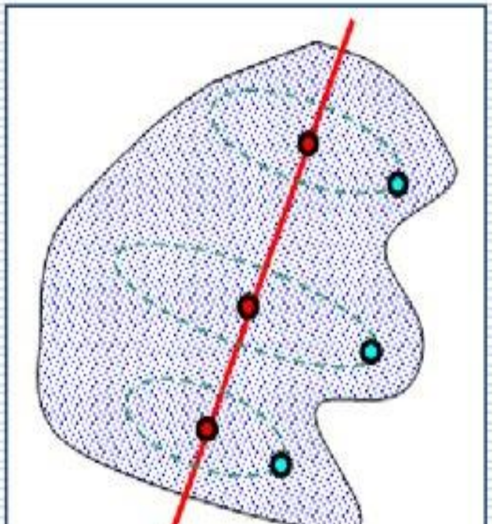
Сложное движение твердого тела – это совокупность поступательного и вращательного движений.

Абсолютно твердым называется тело, конфигурация которого не меняется при любых воздействиях на него.

Поступательное и вращательное движение твердого тела

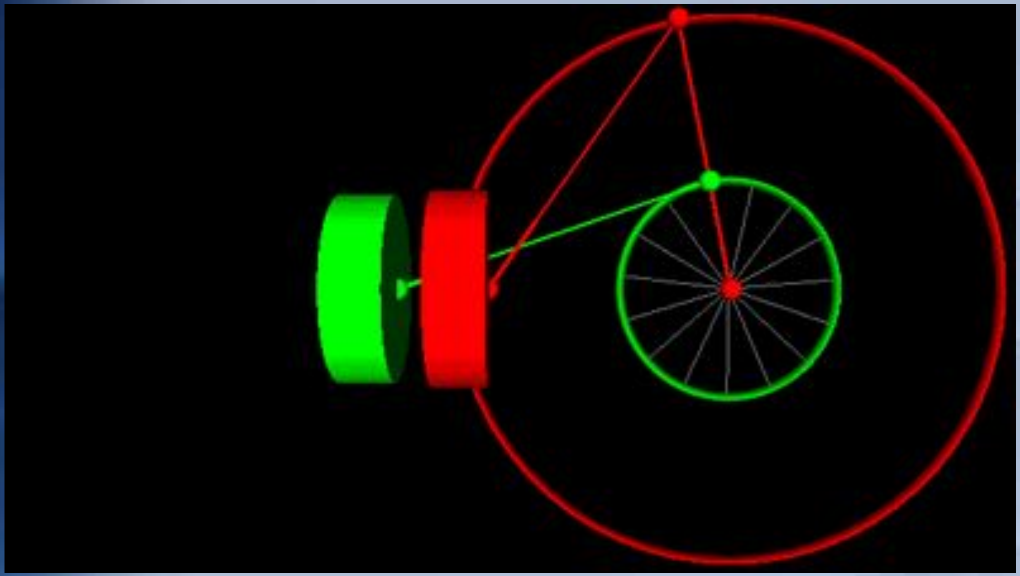


- ***Поступательное движение*** – это движение, при котором любая прямая, связанная с телом, остается параллельна самой себе.
  - Все точки тела при поступательном движении **описывают одинаковые траектории**, сдвинутые относительно друг друга, а также имеют одинаковые скорости и ускорения.
  - Поэтому при изучении поступательного движения твердого тела **достаточно изучить** движение какой-либо одной его точки, т. е. задача сводится к изучению кинематики точки.
  - В качестве такой точки чаще всего выбирают **центр масс тела**.

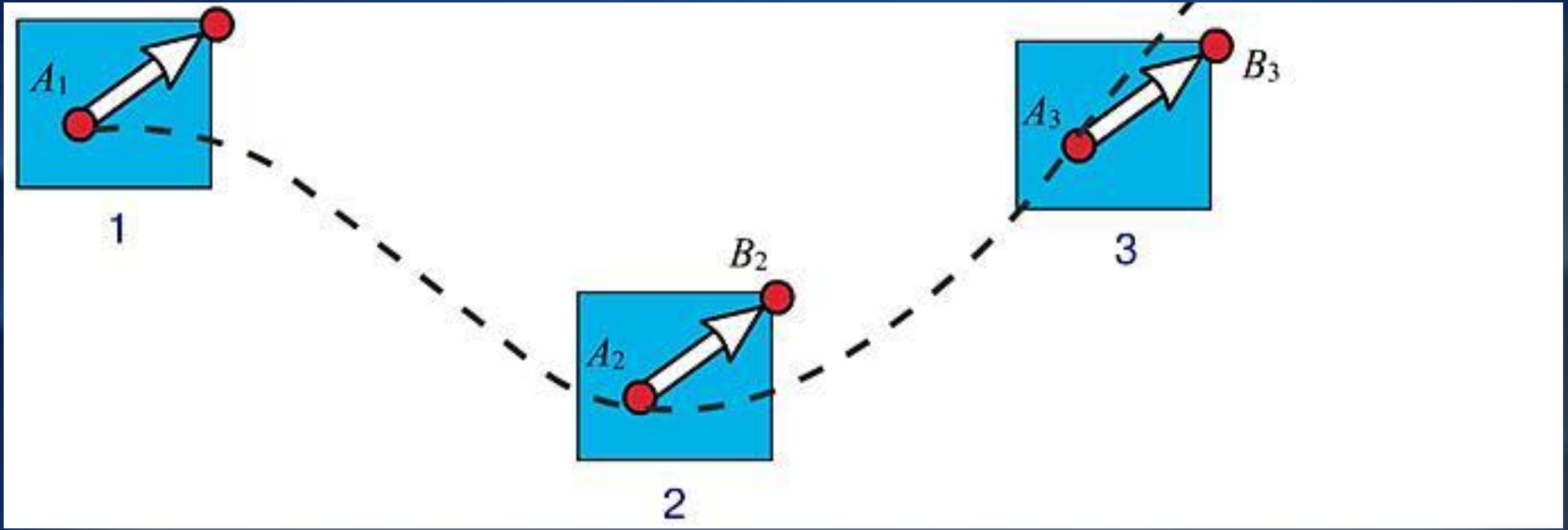


- ***Вращательное движение*** – это движение, при котором все точки тела **движутся по окружностям**, центры которых лежат на одной прямой, называемой **осью вращения**.
  - Ось вращения может находиться вне тела.
  - Вращательное движение является ***плоским движением***, при котором траектории всех точек лежат в параллельных плоскостях.
- **Для описания вращения твердого тела** вводят величины, относящиеся ко всему телу в целом, а не к отдельным его точкам: 1) **угол поворота** φ; 2) **угловая скорость** ω; 3) **угловое ускорение** ε.

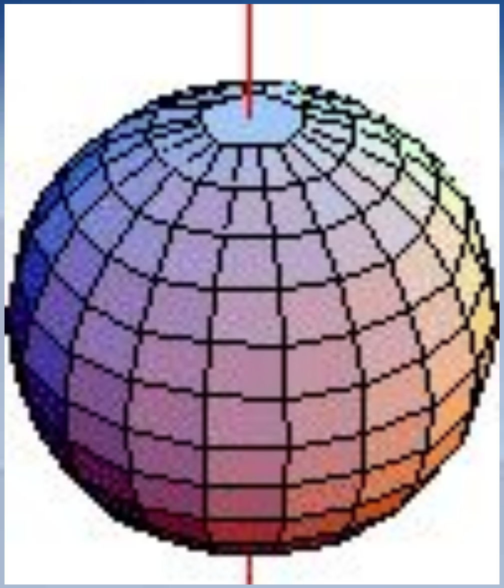
Движение абсолютно твердого тела



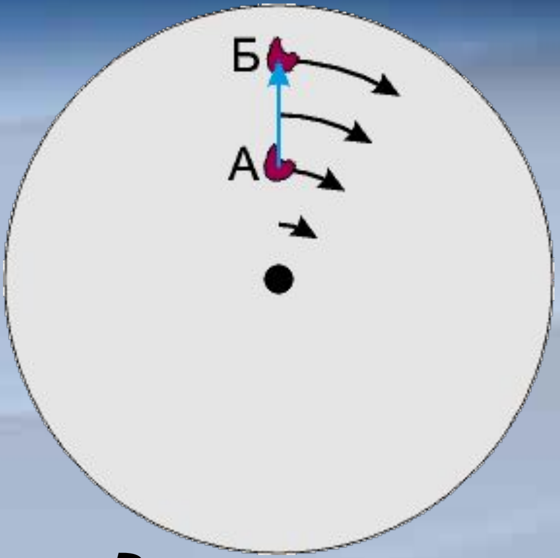
Плоское движение абсолютно твердого тела можно представить как совокупность поступательног о



Поступательным движением называется такое движение,
при котором траектории всех точек тела одинаковы, или при котором любой отрезок, проведенный в теле перемещается параллельно самому



Вращательным движением называется такое движение,
при котором траектории всех точек тела – это окружности, а центры этих окружностей лежат на одной прямой называемой осью



При вращательном движении, в отличие от поступательного, скорости разных точек тела неодинаковы.

Поэтому скорость какой-либо точки вращающегося тела не может служить характеристикой движения всего тела.

Кинематические характеристики вращательного движения

- 1. Угол поворота $\boldsymbol{\varphi}$
- 2. Угловая скорость $\boldsymbol{\omega}$
- 3. Угловое ускорение $\boldsymbol{\beta}$, $\boldsymbol{\varepsilon}$

Угол поворота

- ***Угол поворота (угловое перемещение)*** – это угол $\Delta\varphi$, на которое за время Δt повернулась точка тела находящаяся на расстоянии R от оси вращения.

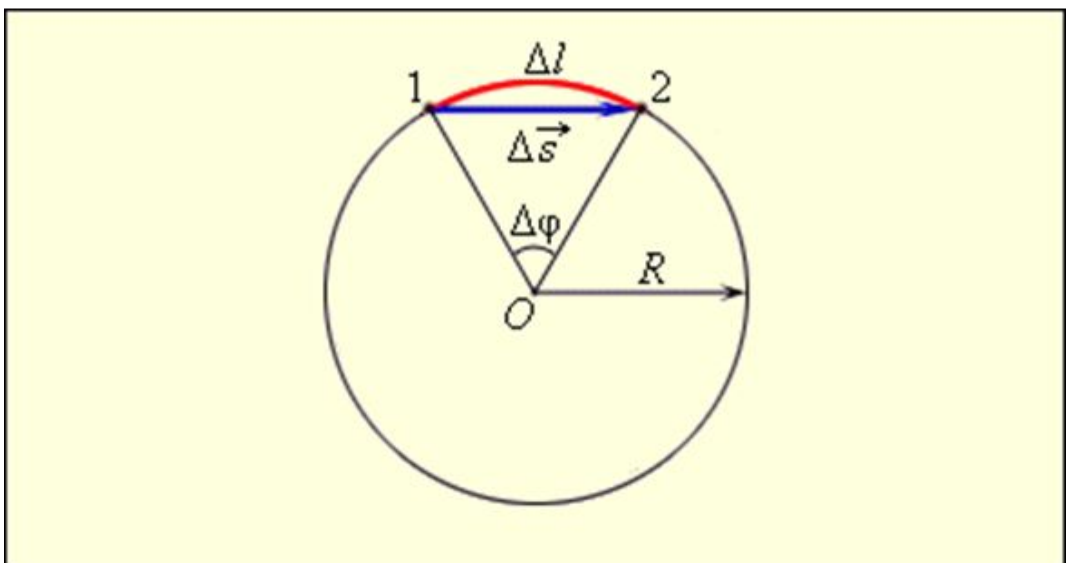
Угол поворота – это ***осевой (аксиальный) вектор***, направление которого определяется правилом правого винта (буравчика).

Угол поворота измеряется в **радианах**.

Длина дуги Δl связана с углом поворота $\Delta\varphi$ соотношением:

$\Delta l = R\,\Delta\varphi$ – в элементарных, но конечных величинах.

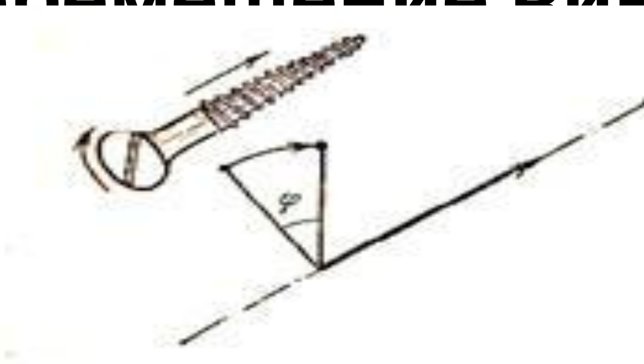
$dl = R d\varphi$ – в бесконечно малых величинах.

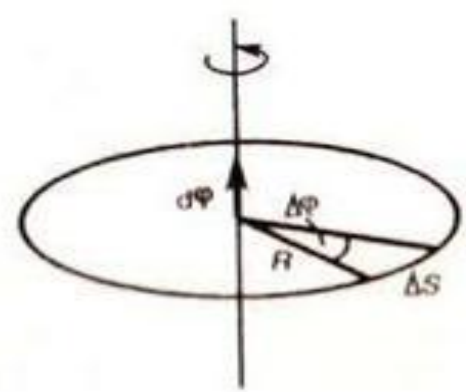


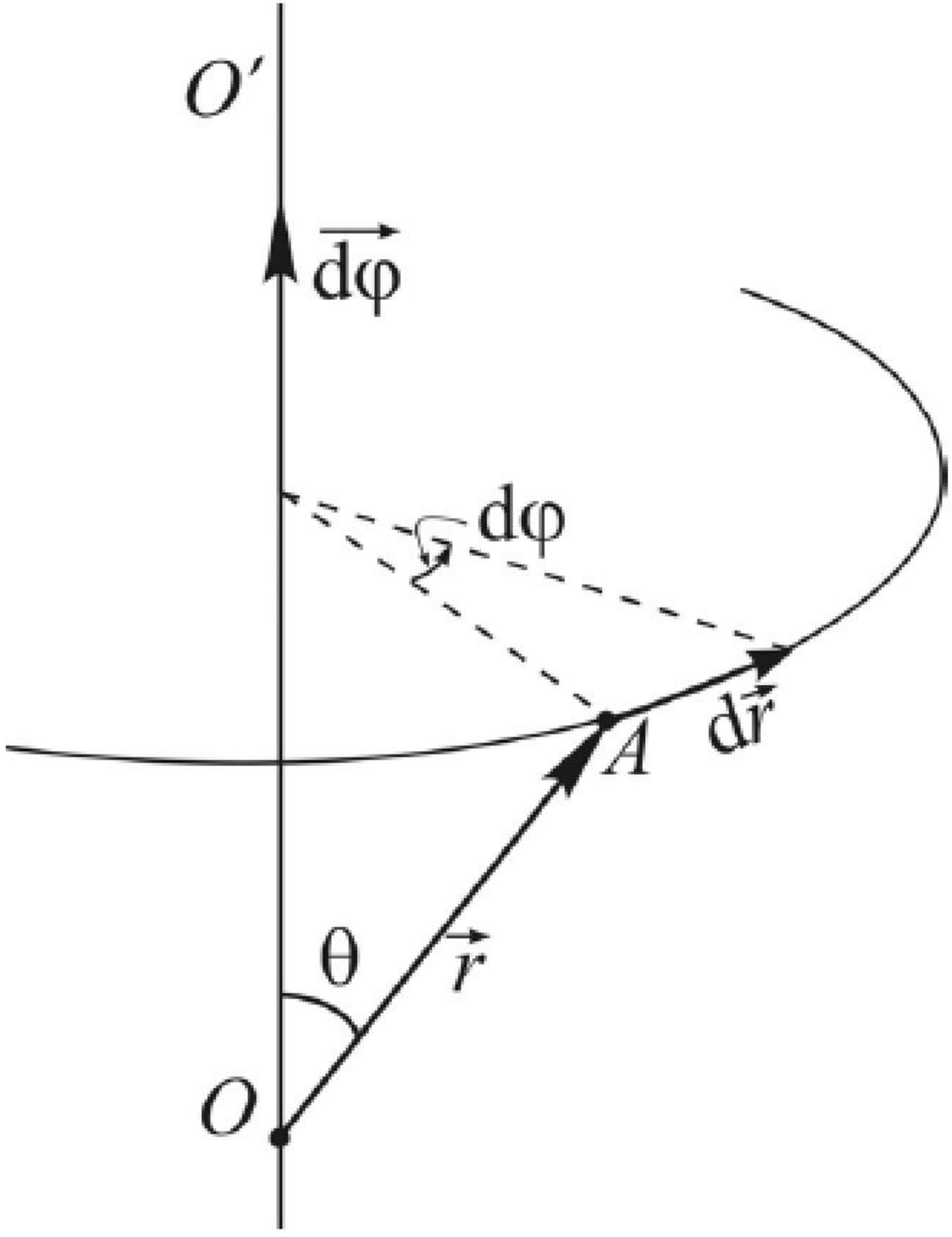
Угловое перемещение

Это ***вектор*** **, модуль которого равен бесконечно малому углу поворота** $d\varphi$ **твердого тела при его вращении, а направление вектора определяется по правилу правого винта: если правый винт вращать в плоскости вращения тела по направлению его вращения, то перемещение винта пок**

на **ора** $d\varphi$







O′
$\overrightarrow{d\varphi}$
dφ
$d\vec{r}$
A
θ
$\vec{r}$
O

$d\vec{\varphi}$ – угловое перемещение. За величину вектора $d\vec{\varphi}$ принимают значение угла, на который повернется частица вокруг оси OZ за время dt, выраженное в радианах.

Направление вектора $d\vec{\varphi}$ задают таким образом, чтобы оно совпадало с осью вращения и определялось в соответствии с правилом правого винта.

Угловая скорость

- **Угловой скоростью** $\vec{\omega}$ называется вектор, численно равный первой производной угла поворота тела по времени и направленный вдоль оси вращения по правилу правого винта:

$$\overline{\omega} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \overline{\varphi}}{\Delta t} = \frac{d\overline{\varphi}}{dt}.$$

Единица измерения угловой скорости **радиан в секунду (рад/с)**.

Вектор $\boldsymbol{\omega}$ определяет направление и быстроту вращения.

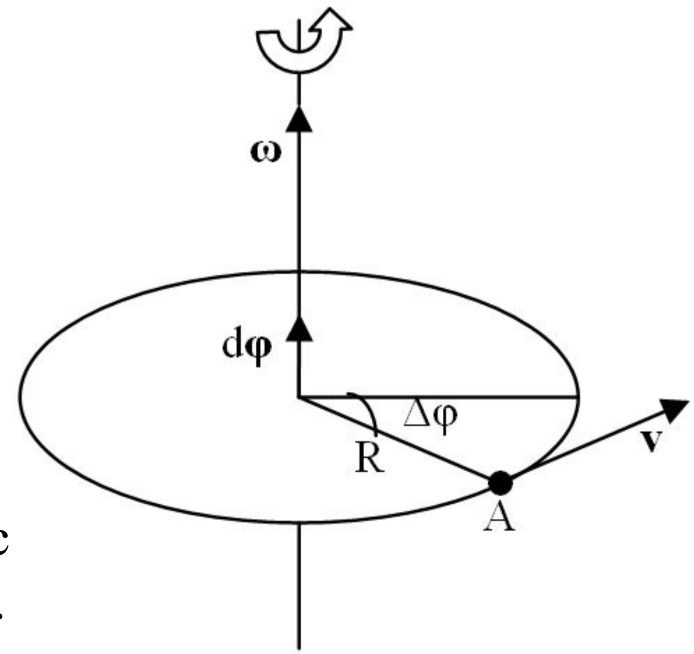
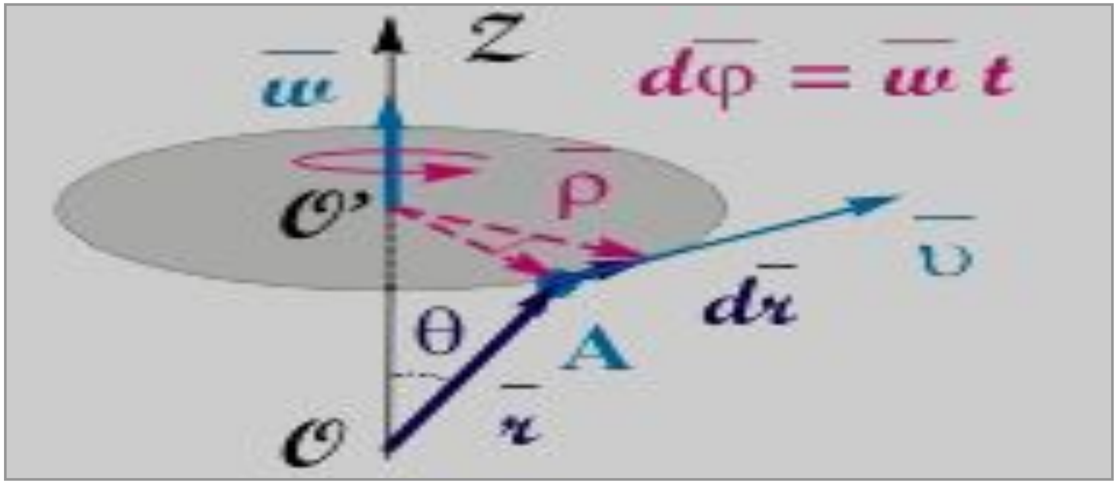


Рис. 1.6

Угловая скорость может быть связана с линейной скоростью ***v*** произвольной точки ***A***. Пусть за время ***Δt*** точка проходит по дуге окружности длину пути ***Δs (Δl)*** . Тогда линейная скорость точки будет равна:

$$v = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{R\Delta\varphi}{\Delta t} = R\lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = R \cdot \omega.$$

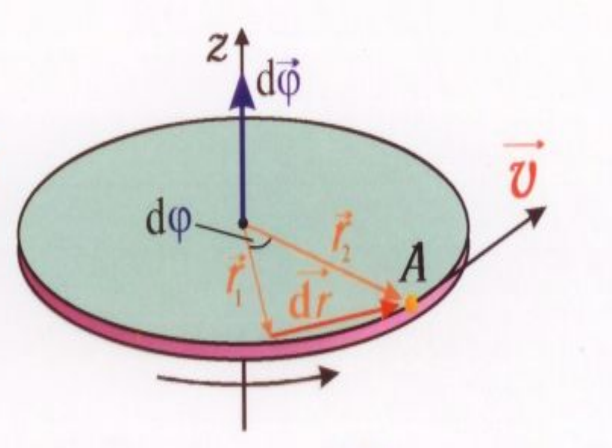


$\vec{\omega}$ — угловая скорость, величина, равная производной от вектора углового перемещения по времени:

$$\vec{\omega} = d\vec{\varphi} \ / \ dt$$

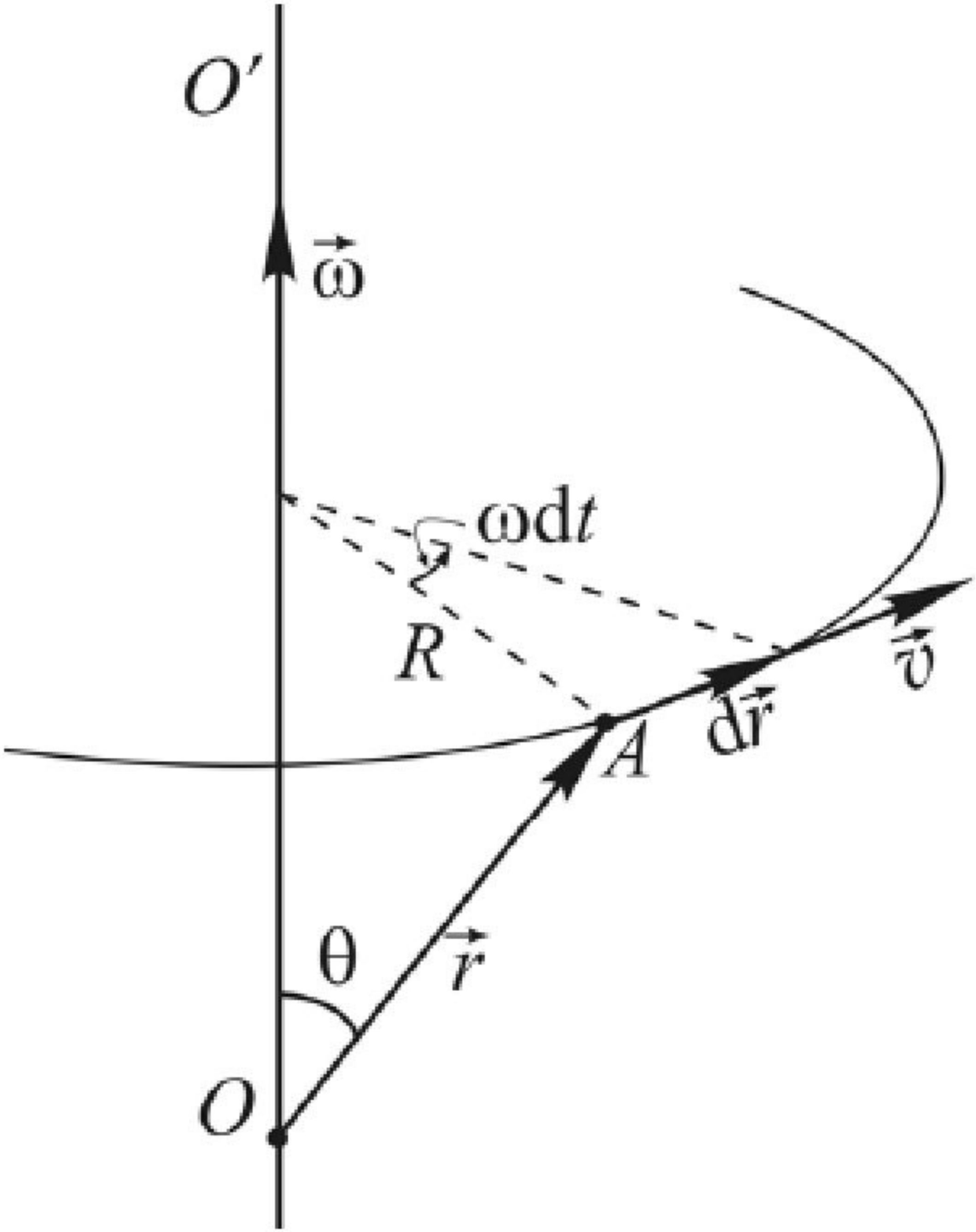
Направление вектора совпадает с осью вращения и определяется по правилу правого винта.

$$\vec{\omega} = d\vec{\varphi} \;/\; dt$$



Угловая скорость $\vec{\omega}$–

1. **векторная физическая величина, характеризующая быстроту изменения угла поворота радиус – вектора**
2. **равна производной угла поворота по времени**
3. **показывает, на какой угол поворачивается тело за 1 секунду.**



O'
$\vec{\omega}$
ωdt
R
$\vec{v}$
$d\vec{r}$
A
θ
$\vec{r}$
O

Характеристики равномерного вращения

Если ***ω = const***, то вращение называется ***равномерным***.

Равномерное вращение можно характеризовать ***периодом вращения T*** – временем, за которое точка тела совершает один полный оборот, т.е. поворачивается на угол **2π**:

$$T = \frac{2\pi}{\omega}.$$

Число полных оборотов, совершаемых телом при равномерном движении по окружности, в единицу времени называется ***частотой вращения***:

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

Угловое ускорение $(\vec{\varepsilon})$ $(\vec{\beta})$

Для характеристики неравномерного вращения тела вводится понятие углового ускорения.

Угловым ускорением называется векторная величина, равная первой производной угловой скорости по времени:

$$\vec{\varepsilon} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \vec{\omega}}{\Delta t} = \frac{d\vec{\omega}}{dt} \qquad [\varepsilon] = [\text{рад/с}^2]$$

При вращении тела вокруг неподвижной оси вектор углового ускорения направлен вдоль оси вращения:

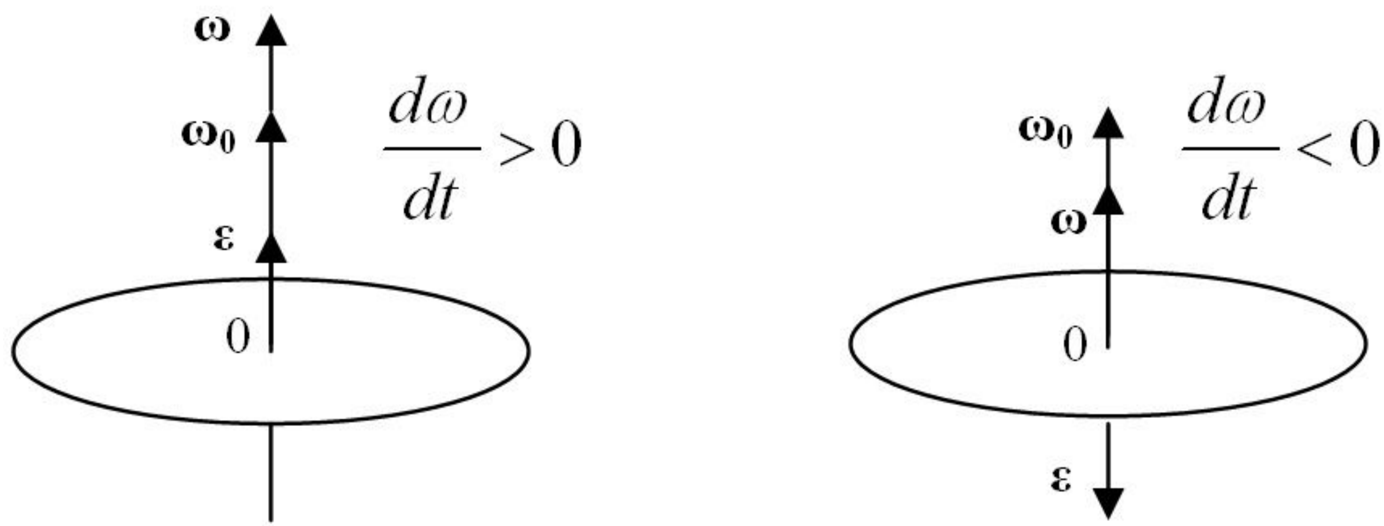


Рис. 1.7

Вектор $\vec{\varepsilon}$

направлен вдоль оси вращения.

Если модуль $\vec{\varepsilon}$ ***возрастает,***

то вектора $\vec{\varepsilon}$ ***и*** $\vec{\omega}$

совпадают по направлению,

если модуль вектора уменьшается

– то вектора $\vec{\varepsilon}$ ***и*** $\vec{\omega}$ ***направлены***

в противоположные стороны

Связь между линейными и угловыми характеристиками

Выразим тангенциальную и нормальную составляющие ускорения точки *A* вращающегося тела через угловую скорость и угловое ускорение:

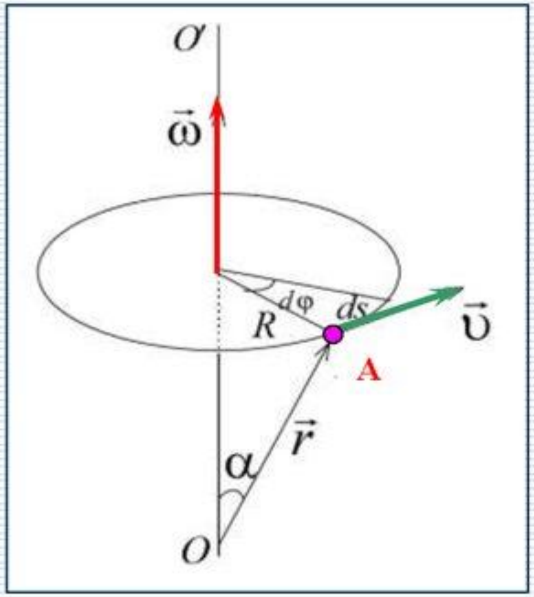
$$a_\tau = \frac{dv}{dt} = \frac{d(\omega R)}{dt} = R\frac{d\omega}{dt} = R \cdot \varepsilon;$$

$$a_n = \frac{v^2}{R} = \frac{\omega^2 R^2}{R} = \omega^2 R\,.$$

Связь между линейными (длина пути ***s (l)***, пройденного точкой по окружности радиуса ***R***, линейная скорость ***v***, тангенциальное ускорение a_τ, нормальное ускорение a_n) и **угловыми характеристиками** (угол поворота ***φ***, угловая скорость ***ω***, угловое ускорение ***ε (β***) **выражается следующими формулами**:

$$s = R\varphi,\ v = \omega R,\ a_\tau = R\varepsilon,\ a_n = \omega^2 R.$$

Связь между линейными и угловыми характеристиками движения в векторном виде



- **Используем правило векторного умножения.**
  - Учитывая, что ***r*** – модуль радиуса-вектора точки, тогда радиус окружности:
  - модуль скорости точки:
  - вектор скорости:
- Полное ускорение:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{\upsilon}}{dt} = \frac{d\vec{\omega}}{dt} \times \vec{r} + \vec{\omega} \times \frac{d\vec{r}}{dt} \Rightarrow \vec{a} = \vec{\varepsilon} \times \vec{r} + \vec{\omega} \times \vec{\upsilon}$$

Первое слагаемое в этом выражении является тангенциальным ускорением, а второе – нормальным ускорением.

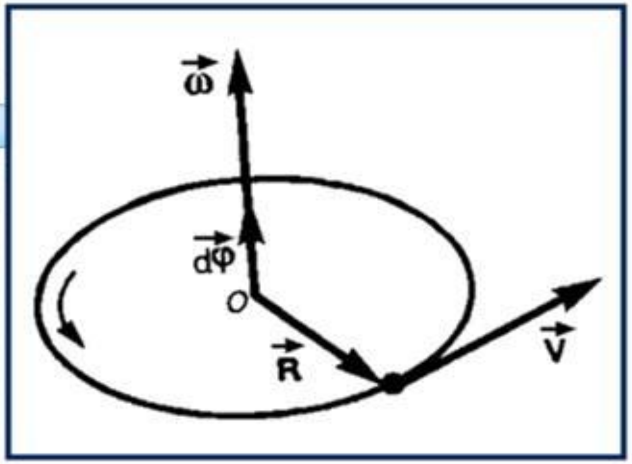
Тангенциальное ускорение точки:

$$\vec{a}_\tau = \vec{\varepsilon} \times \vec{r}$$

Нормальное ускорение точки:

$$\vec{a}_n = \vec{\omega} \times \vec{\upsilon}$$

Кинематика вращательного движения



$$\upsilon = \lim \frac{\Delta s}{\Delta t} = \lim \frac{R \cdot \Delta\varphi}{\Delta t} = R \cdot \lim \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \omega R$$

$$\vec{\upsilon} = \left[\vec{\omega}, \vec{R}\right] \qquad |\,\vec{\upsilon}\,| = \omega R \sin\alpha$$

При равномерном вращении

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt} = const \qquad \varphi = \omega t$$

При равноускоренном вращательном движении:

$$a_n = \frac{\upsilon^2}{R} = \frac{\omega^2 R^2}{R} = \omega^2 R$$

$$\varepsilon = const$$

$$a_\tau = \frac{d\upsilon}{dt} = \frac{d(\omega R)}{dt} = R\frac{d\omega}{dt} = R\varepsilon$$

$$\omega = \omega_0 + \varepsilon t$$

$$\varphi = \omega_0 t + \frac{\varepsilon t^2}{2}$$

$$s = \int_{t_1}^{t_2} \upsilon dt = \int_{t_1}^{t_2} \omega R dt = R\int_{t_1}^{t_2} \frac{d\varphi}{dt} dt = R\varphi$$

Кинематика вращательного движения

$$<\vec{\omega}> = \frac{\Delta\vec{\varphi}}{\Delta t} \qquad <\vec{\beta}> = \frac{\Delta\vec{\omega}}{\Delta t}$$

$$a_n = \frac{v^2}{R} = \frac{\omega^2 R^2}{R} = \omega^2 \cdot R \qquad v = R\omega$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi n \qquad a_\tau = \beta R$$

По аналогии с уравнениями поступательного движения можно записать уравнения для вращательного движения

(смотри слайд 31,32 : перемещение - это вектор Δr, l , s - это путь)

$$s = v_0 t + \frac{a_\tau t^2}{2}$$

$$\varphi = \omega_0 t + \frac{\varepsilon t^2}{2}$$

$$v = v_0 + a_\tau t$$

$$\omega = \omega_0 + \varepsilon t$$

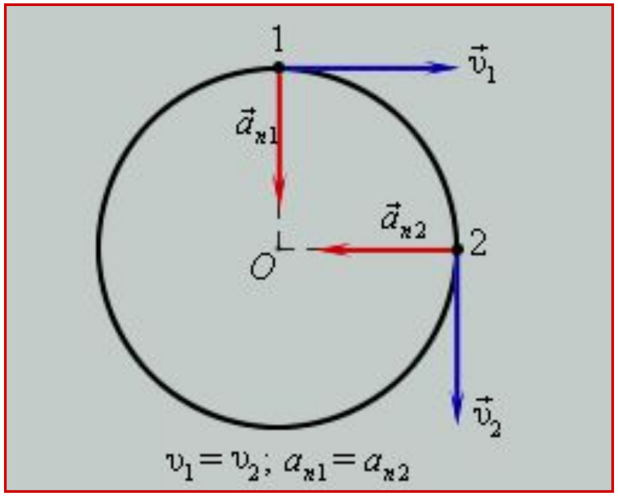
Прямолинейное движение		Вращательное движение	
Перемещение	Δs	Угол поворота	$\Delta\varphi$
Линейная скорость	$v = \frac{ds}{dt}$	Угловая скорость	$\omega = \frac{d\varphi}{dt}$
Линейное ускорение	$a = \frac{dv}{d}t$	Угловое ускорение	$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt}$
	$a = \frac{d^2 s}{dt^2}$		$\varepsilon = \frac{d^2\varphi}{dt^2}$

Характеристики вращательного движения

При ***равномерном движении*** со скоростью ***V*** по окружности радиуса ***R нормальное ускорение*** (центростремительное) постоянно по модулю:

$$a_n = \frac{v^2}{R} = \omega^2 R$$

но изменяется по направлению, оставаясь все время направленным к центру окружности. Скорость материальной точки при этом все время направлена по касательной к окружности.



$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi n$$

$$v = \frac{2\pi R}{T} = \omega R$$

Кинематические уравнения поступательного и вращательного движений

Поступательное	Вращательное
Равномерное	
$s = v \cdot t$	$\varphi = \omega \cdot t$
$v = const$	$\omega = const$
$a = 0$	$\varepsilon = 0$
Равнопеременное	
$s = v_0 t \pm \frac{at^2}{2}$	$\varphi = \omega_0 t \pm \frac{\varepsilon \cdot t^2}{2}$
$v = v_0 \pm a \cdot t$	$\omega = \omega_0 \pm \varepsilon \cdot t$
$a = const$	$\varepsilon = const$
Неравномерное	
$s = f(t)$	$\varphi = f(t)$
$v = \frac{ds}{dt}$	$\omega = \frac{d\varphi}{dt}$
$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2 s}{dt^2}$	$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\varphi}{dt^2}$

Угловое ускорение – обозначение α, $\boldsymbol{\beta}$, $\vec{\varepsilon}$

<table>
<tr>
<td>Величина, характеризующая быстроту изменения скорости движения</td>
<td>$\Delta\vec{\upsilon} = \vec{\upsilon}_2 - \vec{\upsilon}_1;\ d\vec{\upsilon}$
Ускорение движения $\overline{a} = \dfrac{d\vec{\upsilon}}{dt}$
$\Delta\vec{\upsilon} = \Delta\vec{\upsilon}_\tau + \Delta\vec{\upsilon}_n;\ d\vec{\upsilon} = d\vec{\upsilon}_\tau + d\vec{\upsilon}_n$</td>
<td rowspan="3">Ускорение движения $\overline{a}$
$\overline{a} = \lim\limits_{\Delta t \to 0} \dfrac{\Delta\vec{\upsilon}}{\Delta t} = \dfrac{d\vec{\upsilon}}{dt};\ \overline{a} = \dfrac{d^2\overline{r}}{dt^2}$
$\overline{a} = \overline{i}\dfrac{d\upsilon_x}{dt} + \overline{j}\dfrac{d\upsilon_y}{dt} + \overline{k}\dfrac{d\upsilon_z}{dt} =$
$= \overline{i}\dfrac{d^2x}{dt^2} + \overline{j}\dfrac{d^2y}{dt^2} + \overline{k}\dfrac{d^2z}{dt^2}$
$a_x = \dfrac{d\upsilon_x}{dt} = \dfrac{d^2x}{dt^2};\ a_y = \dfrac{d\upsilon_y}{dt} = \dfrac{d^2y}{dt^2};$
$a_z = \dfrac{d\upsilon_z}{dt} = \dfrac{d^2z}{dt^2}$
$\overline{a} = \overline{i}a_x + \overline{j}a_y + \overline{k}a_z;$
$a^2 = a_x^2 + a_y^2 + a_z^2$</td>
<td>-</td>
</tr>
<tr>
<td>Величина, характеризующая быстроту изменения модуля скорости движения</td>
<td>Тангенциальное (касательное) ускорение $\overline{a}_\tau$
$\Delta\upsilon_\tau = \Delta\upsilon;\ d\upsilon_\tau = d\upsilon;\ d\vec{\upsilon}_\tau = \overline{\tau}d\vec{\upsilon}$
$\overline{a}_\tau = \lim\limits_{\Delta t \to 0} \dfrac{\Delta\vec{\upsilon}_\tau}{\Delta t} = \overline{\tau}\dfrac{d\upsilon}{dt};\ a_\tau = \dfrac{d\upsilon}{dt}$</td>
<td>Угловое ускорение $\overline{\alpha}$
$\overline{\alpha} = \lim\limits_{\Delta t \to \infty} \dfrac{\Delta\overline{\omega}}{\Delta t} = \dfrac{d\overline{\omega}}{dt} = \overline{k}\dfrac{d\omega}{dt}$
$\alpha = \dfrac{d\omega}{dt};\ \vec{\alpha} = \overline{k}\alpha$</td>
</tr>
<tr>
<td>Величина, характеризующая быстроту изменения направления скорости движения</td>
<td>Нормальное ускорение $\overline{a}_n$
$\Delta\vec{\upsilon}_n;\ d\vec{\upsilon}_n;\ d\vec{\upsilon}_n = \overline{n}d\upsilon_n$
$\overline{a}_n = \lim\limits_{\Delta t \to 0} \dfrac{\Delta\vec{\upsilon}_n}{\Delta t} = \dfrac{d\vec{\upsilon}_n}{dt} = \overline{n}\dfrac{d\upsilon_n}{dt}$
$a_n = \dfrac{\upsilon^2}{R};\ \overline{a}_n = \dfrac{\upsilon^2}{R}\overline{n}$</td>
<td rowspan="2">-</td>
</tr>
<tr>
<td rowspan="2"></td>
<td colspan="2">Связи между $\overline{a}$, $\overline{a}_\tau$, $\overline{a}_n$: $\overline{a} = \overline{a}_\tau + \overline{a}_n;\ a^2 = a_\tau^2 + a_n^2;$</td>
</tr>
<tr>
<td colspan="3">Связи $\overline{a}_\tau$, $\overline{a}_n$ с угловыми величинами:
$a_\tau = \alpha R;\ \overline{a}_\tau = \overline{\alpha} \times \overline{R};\ a_n = \omega^2 R;\ \overline{a}_n = -\omega^2\overline{R} = \omega^2 R\overline{n} = \overline{\omega} \times \vec{\upsilon}$</td>
</tr>
</table>