# ФИЗИКА

## ЛИТЕРАТУРА


1. Трофимова Т.И. **Курс физики.**
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М., Милковская Л.Б. **Курс физики**.
3. Астахов А.В. Курс физики. Том 1. *Механика. Кинетическая теория материи.*
4. Астахов А.В., Широков Ю.М. Курс физики. Том 2. *Электромагнитное поле.*
5. Астахов А.В., Широков Ю.М. Курс физики. Том 3. *Квантовая физика.*
6. Грабовский Р.И. **Курс физики**.
7. Васильев А.Э. **Курс общей физики**. *Молекулярная физика и термодинамика.*

# *Предмет физики. Связь физики с другими науками*

Мир, окружающий нас, материален: он состоит из вечно существующей непрерывно движущейся материи.

**Материей** в широком смысле слова называется все, что реально существует в природе (Вселенной) и может быть обнаружено человеком посредством органов чувств или с помощью специальных приборов.

Конкретные **виды материи** разнообразны. К ним относится *элементарные частицы* (*электроны, протоны, нейтроны и др.*), совокупность небольшого числа этих частиц (*атомы, молекулы, ионы*), *физические тела* (совокупности множества элементарный частиц) и *физические поля* (*гравитационные, электромагнитные и др.*), посредством которых взаимодействуют различные материальные частицы.

Неотъемлемым ***свойством материи является движением***, под которым следует понимать все изменения и превращение материи, все процессы, протекающие в природе.

# *Предмет физики. Связь физики с другими науками*

Разнообразные формы движения материи исследуются различными науками, в том числе и ***физикой***.

***Физика изучает наиболее простую и вместе с тем наиболее общую форму движения материи***: *механическую, атомно-молекулярные, гравитационные, электромагнитные, внутриатомные и внутриядерные процессы.*

Эти разновидности ***физической*** формы движения являются наиболее общими потому, что они содержатся во всех более сложных формах движения материи, изучаемых другими науками.

Таким образом, можно сказать, ***предметом исследования физики являются общие закономерности явлений природы***.

# Предмет физики. Связь физики с другими науками

***Физика*** позволяет создавать приборы и вырабатывать методы исследования, необходимые для успешного развития всех естественных и прикладных наук. (***Например***: *микроскоп в развитии биологии, спектральный анализ – в химии, рентгеновский анализ – в медицине* и т. п.)

Почти все науки имеют сейчас специальные ***физические*** разделы: ***астрофизика*** – в астрономии, ***биофизика*** – в биологии, ***физическая химия*** – в химии, ***электрофизика*** – в электротехнике и т. д.

Поэтому можно утверждать, что ***физика является фундаментом, на котором строятся все естественные и прикладные науки***.

Следует подчеркнуть, что связь физики с другими науками ***взаимна***: развиваясь с помощью физики, эти науки обогащают физику своими достижениями и ставят перед нею новые задачи, разрешая которые физика развивается и совершенствуется сама.

# Физические основы механики

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

*Механическое движение* — это изменение взаимного расположения тел или их частей в пространстве с течением времени.

Развитие механики как науки начинается с III в. до н. э., когда древнегреческий ученый Архимед (287—212 до н. э.) сформулировал закон равновесия рычага и законы равновесия плавающих тел. Основные законы механики установлены итальянским физиком и астрономом Г. Галилеем (1564—1642) и окончательно сформулированы английским ученым И. Ньютоном (1643-1727).

Механика Галилея — Ньютона называется *классической механикой*. В ней изучаются законы движения макроскопических тел, скорости которых малы по сравнению со скоростью света в вакууме.

Законы движения макроскопических тел со скоростями, сравнимыми со скоростью света в вакууме, изучаются *релятивистской механикой*, основанной на специальной теории относительности, сформулированной А. Эйнштейном (1879—1955).

Для описания движения микроскопических тел (отдельные атомы и элементарные частицы) законы классической механики неприменимы — они заменяются законами *квантовой механики*.

Классическая механика делится на три раздела.

1) *Кинематика* изучает движение тел, не рассматривая причины, которые это движение обусловливают.

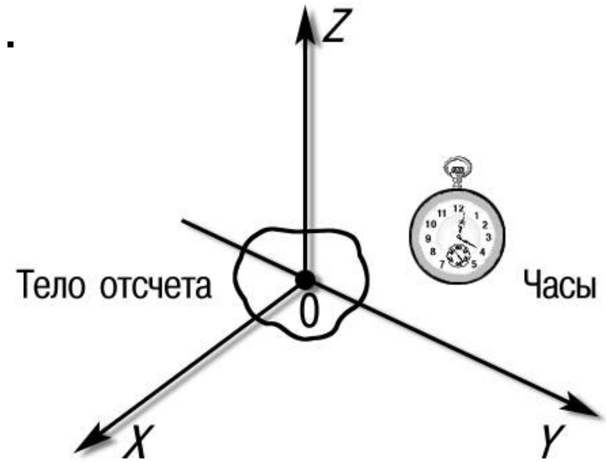
2) *Динамика* изучает законы движения тел и причины, которые вызывают или изменяют это движение.

3) *Статика* изучает законы равновесия системы тел. Если известны законы движения тел, то применяя их можно установить и законы равновесия. Поэтому законы статики отдельно от законов динамики физика не рассматривает.

# Кинематика твердого тела

## Система отсчета. Механические модели

Любое тело движется или находится в покое относительно другого тела, которое называют телом отсчета.




В дальнейшем состояние тела будем рассматривать относительно *системы отсчета*, которая состоит из тела отсчета, системы координат, жестко связанной с ним, и прибора для определения времени (часы), неподвижного относительно тела отсчета.

Механика для описания движения тел в зависимости от условий конкретных задач использует разные физические модели.

Простейшей моделью является *материальная точка* — тело, обладающее массой, размерами которого в данной задаче можно пренебречь.

Понятие материальной точки — абстрактное, но его введение облегчает решение практических задач.

# Кинематика твердого тела

## Система отсчета. Механические модели

Произвольное макроскопическое тело или систему тел можно мысленно разбить на малые взаимодействующие между собой части, каждая из которых рассматривается как материальная точка.

Тогда изучение движения произвольной системы тел сводится к изучению системы материальных точек.

Под воздействием тел друг на друга тела могут деформироваться, т. е. изменять свою форму и размеры. Поэтому в механике вводится еще одна модель — *абсолютно твердое тело*.

Абсолютно твердым называется тело, которое ни при каких условиях не деформируется и расстояние между двумя любыми точками (или точнее между двумя частицами) этого тела остается неизменным.

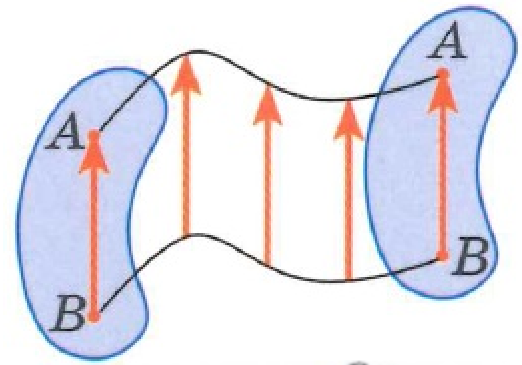
Однако, в природе не существует абсолютно недеформируемых тел. Модель абсолютно твердого тела используется, когда деформацией можно пренебречь в условиях данной задачи.

# Кинематика твердого тела

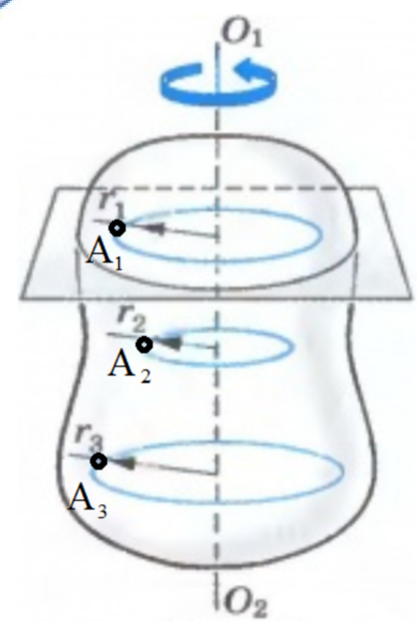
## Траектория. Перемещение. Кинематические законы движения.

Любое движение твердого ела можно представить как комбинацию *поступательного* и *вращательного* движений.

*Поступательное движение* — это движение, при котором любая прямая, жестко связанная с движущимся телом, остается параллельной своему первоначальному положению.




*Вращательное движение* — это движение, при котором все точки тела движутся по окружностям, центры которых лежат на одной прямой, называемой осью вращения.

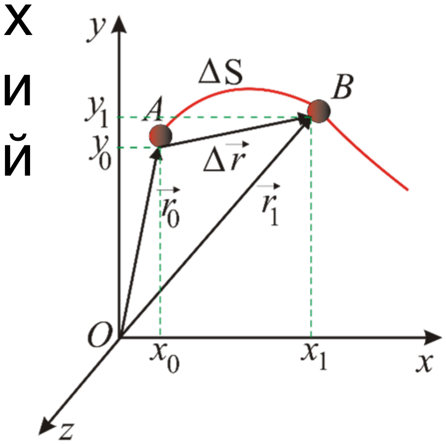


# Кинематика твердого тела

## Траектория. Перемещение. Кинематические законы движения.

Рассмотрим движение материальной точки относительно системы отсчета (тело отсчета находится в начале декартовой прямоугольной системы координат- ***декартовой*** *обычно называют прямоугольную систему координат с одинаковыми масштабами по осям*).

Геометрическое место последовательных положений материальной точки при ее движении представляет собой *траекторию* материальной точки.



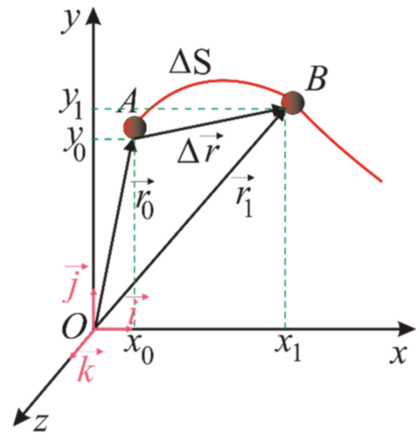

В зависимости от формы траектории движение может быть *прямолинейным* или *криволинейным*.

В декартовой системе координат положение точки А в данный момент времени по отношению к этой системе характеризуется тремя координатами $x_0$, $y_0$ и $z_0$ или радиусом-вектором $\vec{r}_0$, проведенным из начала $O$ системы координат в данную точку.

# Кинематика твердого тела

## Траектория. Перемещение. Кинематические законы движения.

Число независимых координат, полностью определяющих положение точки в пространстве, называется *числом степеней свободы*.




Если $\vec{i}$, $\vec{j}$ и $\vec{k}$ — *единичные векторы* (*орты*) осей прямоугольной декартовой системы координат, то

$$\vec{r} = x \cdot \vec{i} + y \cdot \vec{j} + z \cdot \vec{k}.$$

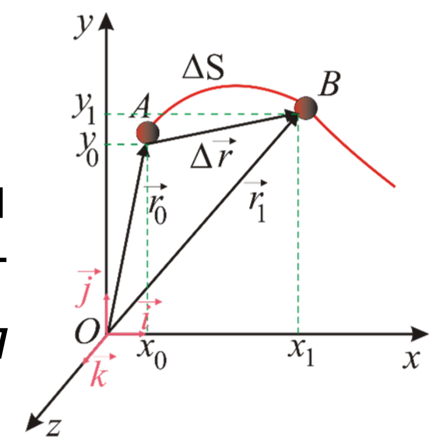
Векторы $x \cdot \vec{i}$, $y \cdot \vec{j}$ и $z \cdot \vec{k}$ - это составляющие (компоненты) радиуса-вектора $\vec{r}$ вдоль соответствующих осей координат.

При движении материальной точки из положения $A$ в положение $B$ ее координаты $x$, $y$, $z$ и радиус-вектор $\vec{r}$ изменяются с течением времени $t$.

Поэтому для записи закона движения материальной точки необходимо указать либо вид функциональной зависимости трех ее координат от времени:

$$x = x(t), \quad y = y(t) \quad \text{и} \quad z = z(t),$$

либо зависимость от времени радиуса-вектора этой точки $\vec{r} = \vec{r}(t)$.




Три скалярных уравнения или эквивалентное им одно векторное уравнение называют *кинематическими уравнениями движения материальной точки*.

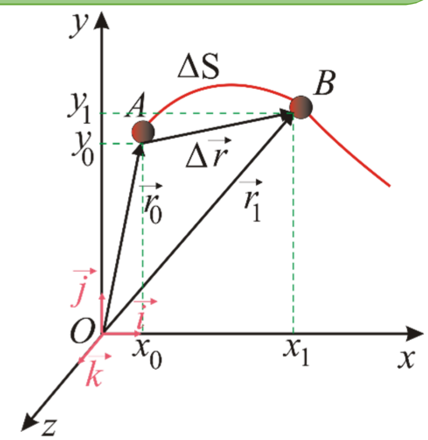
Исключая неизвестное $t$ в скалярных уравнениях, получим уравнение траектории движения материальной точки.

При рассмотрении движения, отсчет времени начнем с момента, когда материальная точка находилась в положении $A$.

Длина участка траектории $AB$, пройденного материальной точкой с момента начала отсчета времени, называется *длиной пути* $\Delta S$ и является скалярной функцией времени: $\Delta S = \Delta S(t)$.

# Кинематика твердого тела

## Траектория. Перемещение. Кинематические законы движения.



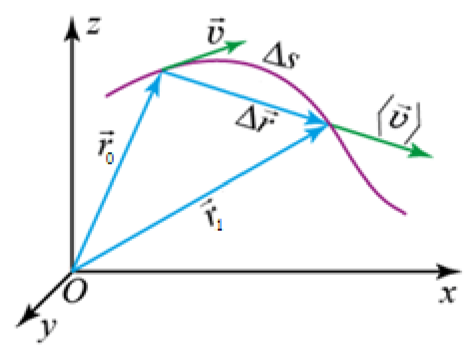

Вектор $\Delta\vec{r} = \vec{r}_1 - \vec{r}_0$, проведенный из начального положения движущейся точки в положение ее в данный момент времени (приращение радиуса-вектора точки за рассматриваемый промежуток времени), называется *перемещением*.

При прямолинейном движении вектор перемещения совпадает с соответствующим участком траектории и модуль перемещения $|\Delta\vec{r}|$ равен пройденному пути $\Delta S$.

# Кинематика твердого тела
## Средняя и мгновенная скорости

Для характеристики движения материальной точки вводится векторная величина — *скорость*, которая характеризует как *быстроту* движения, так и его *направление* в данный момент времени.

*Вектором средней скорости* $\langle\vec{v}\rangle$ называется отношение приращения радиуса-вектора точки $\Delta\vec{r}$ к промежутку времени этого приращения $\Delta t$:




$$\langle\vec{v}\rangle = \vec{v}_{cp} = \frac{\vec{r}_1 - \vec{r}_0}{t_1 - t_0} = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}, \qquad [v]_{СИ} = \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

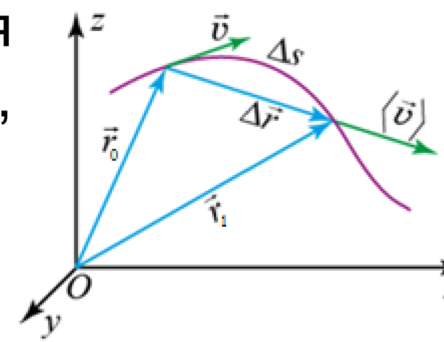
Направление вектора средней скорости совпадает с направлением $\Delta\vec{r}$.

Заметим, что для разных интервалов времени $\Delta t$ вектор средней скорость может иметь не только разные численные значения, но и разные направления. Следовательно, средняя скорость не содержит достаточно информации о движении материальной точки в каждый момент времени.

# Кинематика твердого тела

## Средняя и мгновенная скорости

При неограниченном уменьшении $\Delta t$ средняя скорость стремится к предельному значению, которое называется *мгновенной скоростью* $\vec{v}$ :




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

Мгновенная скорость $\vec{v}$, таким образом, есть векторная величина, равная первой производной по времени радиуса-вектора движущейся точки.

Так как секущая в пределе совпадает с касательной, то вектор скорости $\vec{v}$ направлен по касательной к траектории в сторону движения.

По мере уменьшения $\Delta t$ путь $\Delta s$ все больше будет приближаться к $|\Delta \vec{r}|$, поэтому модуль мгновенной скорости

$$v = |\vec{v}| = \left| \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} \right| = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{|\Delta \vec{r}|}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt}.$$

# Кинематика твердого тела

## Средняя и мгновенная скорости

Таким образом, модуль мгновенной скорости равен первой производной пути по времени:

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

Зная, что в декартовой системе координат радиус-вектор

$$\vec{r} = x \cdot \vec{i} + y \cdot \vec{j} + z \cdot \vec{k}$$

и принимая во внимание, что единичные орты $\left(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}\right)$ не изменяются во времени, уравнение мгновенной скорости $\vec{v} = \dfrac{d\vec{r}}{dt}$ принимает вид:

$$\vec{v} = \frac{dx}{dt}\vec{i} + \frac{dy}{dt}\vec{j} + \frac{dz}{dt}\vec{k} \quad \text{или} \quad \vec{v} = v_x \cdot \vec{i} + v_y \cdot \vec{j} + v_z \cdot \vec{k},$$

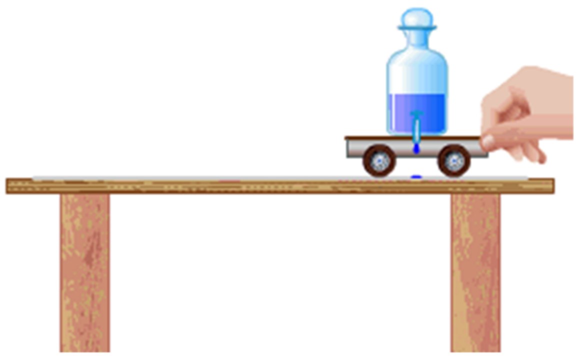
где $v_x = \dfrac{dx}{dt}, \; v_y = \dfrac{dy}{dt}, \; v_z = \dfrac{dz}{dt}.$

Модуль мгновенной скорости равен: $\left|\vec{v}\right| = v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}.$

# Кинематика твердого тела

## Средняя и мгновенная скорости

Рассмотрим случай, когда направление вектора скорости $\vec{v}$ во время движения материальной точки не изменяется. Это означает, что точка движется по такой траектории, касательные к которой во всех ее точках имеют одно и то же направление.



Таким свойством обладают только прямолинейные траектории. Значит, рассматриваемое движение — прямолинейное.

Если численное значение мгновенной скорости точки остается во время движения неизменным $\left(\left|\vec{v}\right| = const\right)$, то такое движение называют равномерным. В этом случае пройденный путь $s$ равен

$$dS = v \cdot dt \Rightarrow \int_{S_0}^{S} ds = v \int_{t_0=0}^{t} dt \Rightarrow s = s_0 + v \cdot t.$$

Если за произвольные равные промежутки времени точка проходит пути разной длины, то численное значение ее мгновенной скорости с течением времени изменяется. Такое движение называют *неравномерным*.

# Кинематика твердого тела

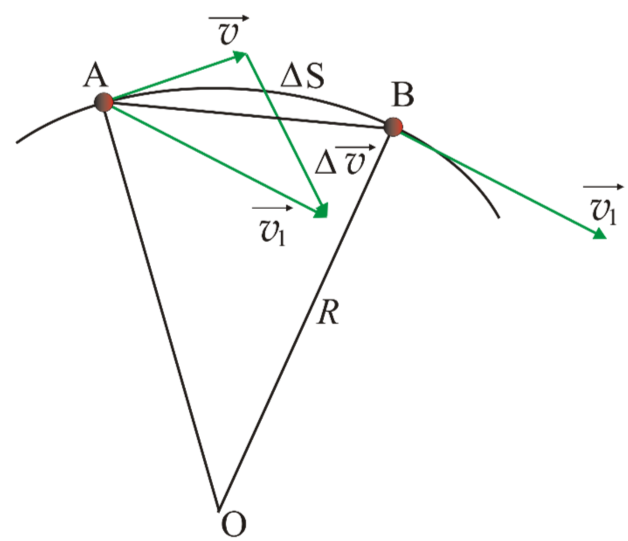
## Среднее и мгновенное ускорения

В случае неравномерного движения важно знать, как быстро изменяется скорость с течением времени. Физической величиной, характеризующей быстроту изменения скорости по модулю и направлению, является *ускорение*.

Рассмотрим плоское движение. Пусть вектор $\vec{v}$ - скорость точки $A$ в момент времени $t$.

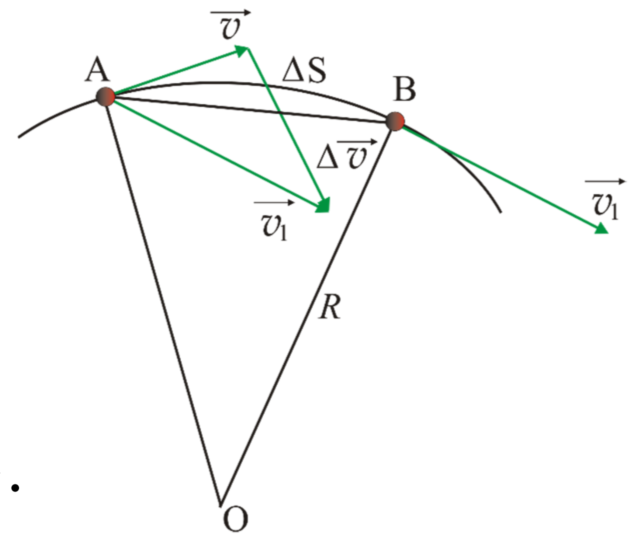
За время $\Delta t$ движущаяся точка перешла в положение $B$ и приобрела скорость, отличную от $\vec{v}$ как по модулю, так и по направлению и равную $\vec{v}_1 = \vec{v} + \Delta\vec{v}$.

Перенесем вектор $\vec{v}_1$ в точку $A$ и найдем $\Delta\vec{v}$.



## Кинематика твердого тела
## Среднее и мгновенное ускорения

*Средним ускорением* неравномерного движения в интервале времени от $t$ до $t_1 = t + \Delta t$ называется векторная величина, равная отношению изменения скорости $\Delta\vec{v}$ к интервалу $\Delta t$:




$$\langle\vec{a}\rangle = \vec{a}_{ср} = \frac{\vec{v}_1 - \vec{v}}{t_1 - t} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}, \qquad [a]_{СИ} = \frac{м}{с^2}.$$

*Мгновенным ускорением* (ускорением материальной точки в момент времени $t$ ) называется предел среднего ускорения:

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \to 0}\langle\vec{a}\rangle = \lim_{\Delta t \to 0}\frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt}.$$

Таким образом, ускорение $\vec{a}$ есть векторная величина, равная первой производной скорости по времени.

# Кинематика твердого тела

## Среднее и мгновенное ускорения

Вектор $\vec{a}$ ускорения материальной точки можно разложить на три составляющие, направленные вдоль осей прямоугольной декартовой системы координат:

$$\vec{a} = \vec{a}_x + \vec{a}_y + \vec{a}_z = a_x \cdot \vec{i} + a_y \cdot \vec{j} + a_z \cdot \vec{k},$$

где $a_x$, $a_y$ и $a_z$ – проекции вектора ускорения на оси координат.

Используя уравнение $\upsilon = \vec{\upsilon}_x + \vec{\upsilon}_y + \vec{\upsilon}_z = \upsilon_x \cdot \vec{i} + \upsilon_y \cdot \vec{j} + \upsilon_z \cdot \vec{k}$ получим:

$$\vec{a} = \frac{d\upsilon_x}{dt}\vec{i} + \frac{d\upsilon_y}{dt}\vec{j} + \frac{d\upsilon_z}{dt}\vec{k}.$$

Следовательно, проекции ускорения материальной точки на оси прямоугольной декартовой системы координат равны первым производным по времени от соответствующих проекций скорости этой точки:

## Среднее и мгновенное ускорения

$$a_x = \frac{dv_x}{dt}, \; a_y = \frac{dv_y}{dt}, \; a_z = \frac{dv_z}{dt}.$$

Модуль ускорения равен

$$a = \left|\vec{a}\right| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}.$$

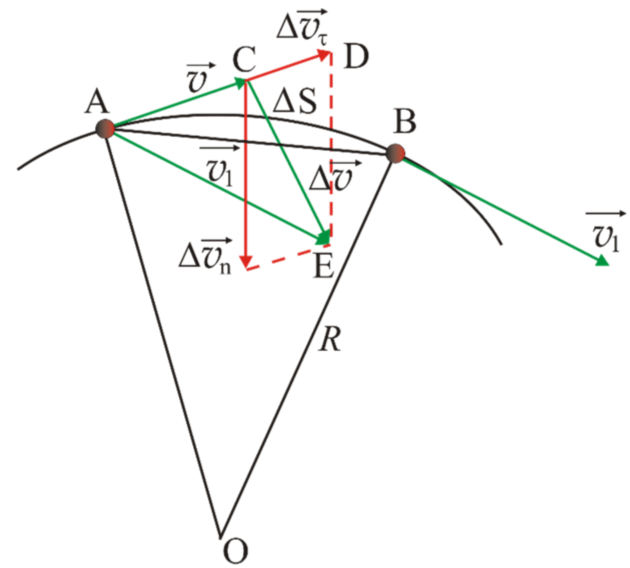
Отметим, что рассмотренные характеристики движения: $\vec{a}$ , $\vec{v}$ и $S$ называются линейными.

# Кинематика твердого тела

## Тангенциальное и нормальное ускорения

Разложим вектор $\Delta\vec{v}$ на две составляющие. Для этого из точки $A$ по направлению скорости $\vec{v}$ отложим вектор $\overrightarrow{AD}$, по модулю равный $\vec{v}_1$.

Вектор $\overrightarrow{CD}$, равный $\Delta\vec{v}_\tau$, характеризует быстроту изменения скорости по модулю за время Δt: $\Delta v_\tau = v_1 - v$. Он определяет ускорение, называемое тангенциальным (касательным).




Модуль тангенциального ускорения равен

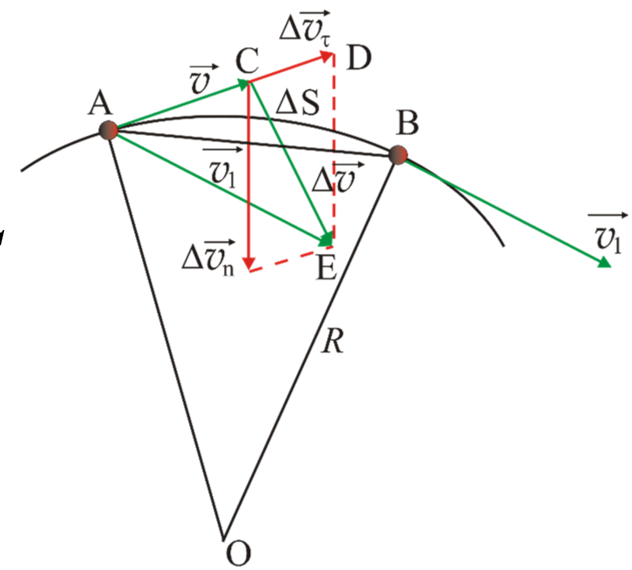
$$a_\tau = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta v_\tau}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt}.$$

т.е. равна первой производной по времени модуля скорости.

# Кинематика твердого тела

## Тангенциальное и нормальное ускорения

Вторая составляющая вектора $\Delta\vec{v}$ - $\Delta\vec{v}_n$ характеризует изменение скорости по направлению. Допустим, что точка $B$ достаточно близка к точке $A$, поэтому $\Delta S$ можно считать дугой окружности некоторого радиуса $R$, мало отличающейся от хорды $AB$.




Тогда из подобия треугольников $AOB$ и $EAD$ следует

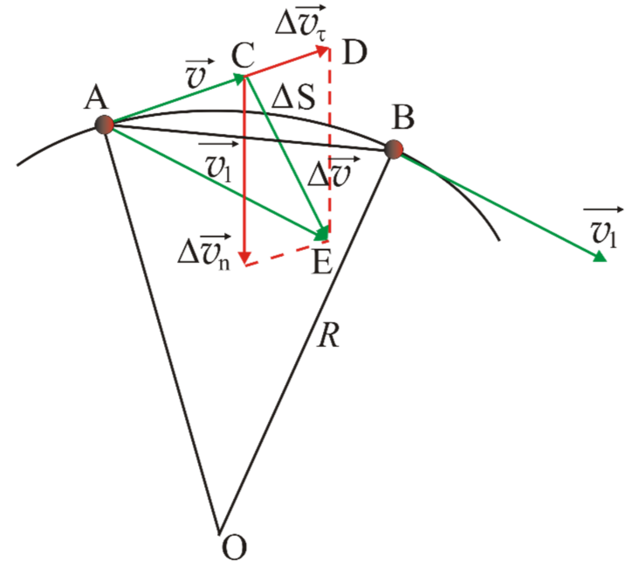
$$\frac{DE}{AB}=\frac{AE}{R}\Rightarrow\frac{\Delta v_n}{\Delta S}=\frac{v_1}{R}\Rightarrow\quad\{\Delta S=v\cdot t\}\Rightarrow\frac{\Delta v_n}{\Delta t}=\frac{v\cdot v_1}{R}.$$

В пределе при $\Delta t\to 0\quad\vec{v}_1\to\vec{v}$.

При этом угол $EAD$ стремится к нулю, а так как треугольник $EAD$ равнобедренный, то угол $ADE$ между $\vec{v}$ и $\Delta\vec{v}_n$ стремится к прямому.

# Кинематика твердого тела
## Тангенциальное и нормальное ускорения

Следовательно, при $\Delta t \to 0$ векторы $\Delta\vec{v}_n$ и $\vec{v}$ оказываются взаимно перпендикулярными.




Так как вектор скорости направлен по касательной к траектории, то вектор $\Delta\vec{v}_n$ перпендикулярный вектору скорости, направлен к центру ее кривизны. Он определяет нормальное ускорение.

Модуль нормального ускорения равен

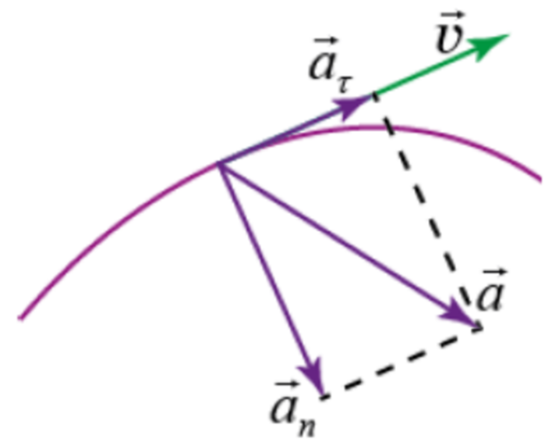
$$a_n = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta v_n}{\Delta t} = \frac{v^2}{R},$$

Нормальное ускорение направлено к центру кривизны траектории.

## Тангенциальное и нормальное ускорения

*Полное ускорение* тела есть геометрическая сумма тангенциальной и нормальной составляющих :

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n.$$



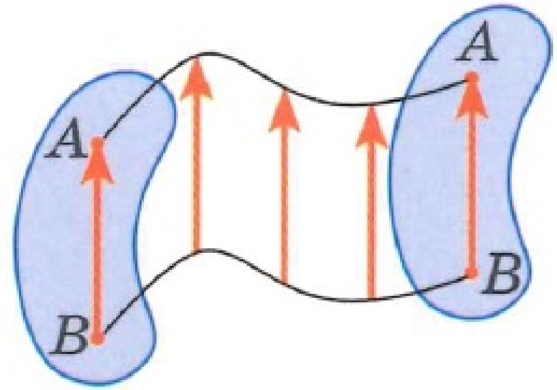

Итак, *тангенциальная* составляющая ускорения характеризует *быстроту изменения скорости по модулю* (направлена по касательной к траектории), а *нормальная* составляющая ускорения — *быстроту изменения скорости по направлению* (направлена к центру кривизны траектории).

Векторы $\vec{a}_\tau$ и $\vec{a}_n$ взаимно перпендикулярны, так что модуль ускорения $a$ материальной точки равен

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

# Кинематика твердого тела
## Угловые характеристики вращательного движения

При поступательном движении тела траектории любых двух его точек совершенно идентичны: их можно полностью совместить путем параллельного переноса вдоль прямой $AB$.



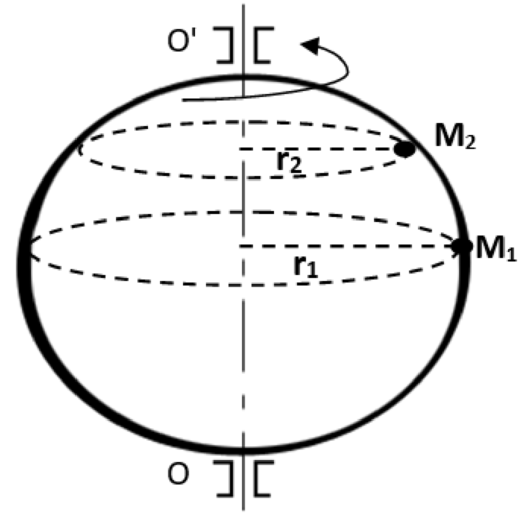

Следовательно, в любой момент времени все точки тела имеют одинаковые скорости и ускорения, а кинематическое рассмотрение поступательного движения абсолютно твердого тела сводится к изучению движения любой из его точек.

Для описания вращательного движения нельзя пользоваться такой моделью как материальная точка, здесь уместно говорить о системе материальных точек, из которых состоит твердое тело.

Наиболее простой случай вращательного движения абсолютно твердого тела - это вращение его относительно неподвижной оси.

# Кинематика твердого тела

## Угловые характеристики вращательного движения




При вращательном движении абсолютно твердого тела все точки двигаются по окружностям, центры которых лежат на прямой $OO'$, называемой *осью вращения*.

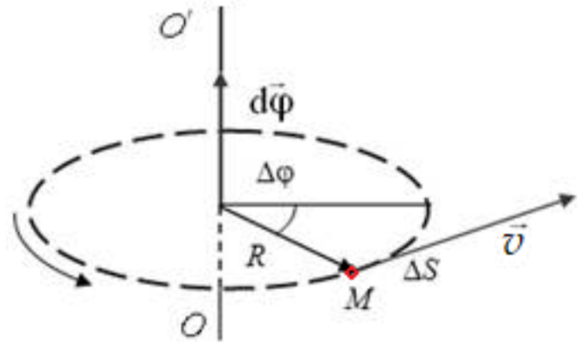
Точки тела $M_1$, $M_2$, и т.д. двигаются по окружностям разного радиуса, т.е. их пути, равные длинам дуг соответствующих окружностей, различны, а, следовательно, и скорости различны. Поэтому, линейными характеристиками нельзя описать вращательное движение, как это было сделано в поступательном движении.

Рассмотрим, как ведут себя материальные точки твердого тела, лежащие в плоскости, перпендикулярной оси вращения.

## Угловые характеристики вращательного движения

Пусть некоторая точка движется по окружности радиуса $R$.

За промежуток времени $\Delta t$ она повернется относительно оси $OO'$ на угол $\Delta\varphi$. Элементарные (бесконечно малые) углы поворота рассматривают как векторы.




Модуль вектора $d\vec{\varphi}$ равен углу поворота, а его направление совпадает с направлением поступательного движения острия винта, головка которого вращается в направлении движения точки по окружности, т. е. подчиняется *правилу правого винта*.

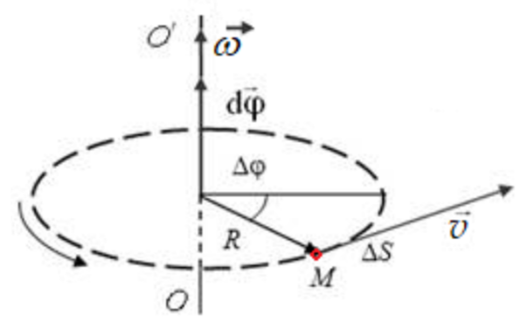
Векторы, направления которых связываются с направлением вращения, называются *псевдовекторами* или *аксиальными векторами*. Эти векторы не имеют определенных точек приложения: они могут откладываться из любой точки оси вращения.

# Кинематика твердого тела
## Угловые характеристики вращательного движения

При вращательном движении угол поворота $\Delta\varphi$ (угловой путь) изменяется с течением времени.

Быстроту изменения углового пути со временем характеризует векторная величина $\vec{\omega}$, называемая *угловой скоростью*, численно равная первой производной угла поворота по времени:

$$\vec{\omega} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vec{\varphi}}{\Delta t} = \frac{d\vec{\varphi}}{dt}. \qquad [\omega]_{СИ} = \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$




Вектор $\vec{\omega}$ направлен вдоль оси вращения по правилу правого винта, т. е. так же, как и вектор $d\vec{\varphi}$.

Вращение с постоянной угловой скоростью $\left(|\vec{\omega}| = const\right)$ называется *равномерным*, тогда

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t},$$

где $\Delta\varphi$ - угол поворота за время $\Delta t$.

# Кинематика твердого тела
## Угловые характеристики вращательного движения

Равномерное вращение можно характеризовать периодом вращения $T$.

За время $\Delta t=T$ тело совершает один полный оборот, т. е. поворачивается на угол $\Delta\varphi = 2\pi$ радиан. Значит,

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad \text{или} \quad T = \frac{2\pi}{\omega}.$$

Число оборотов в единицу времени называется *частотой вращения*

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

откуда угловая скорость $\omega = 2 \cdot \pi \cdot \nu.$

При равномерном вращении с угловой скоростью $\omega$ и начальным положением тела $\varphi_0$, угол поворота равен:

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt} \Rightarrow d\varphi = \omega \cdot dt \Rightarrow \int_{\varphi_0}^{\varphi} d\varphi = \omega \int_{t_0}^{t} dt \Rightarrow \varphi = \varphi_0 + \omega\left(t - t_0\right).$$

## Угловые характеристики вращательного движения

Вектор $\vec{\omega}$ может изменяться с течением времени как за счет изменения скорости вращения тела вокруг оси, так и за счет изменения направления вращения.

Быстрота изменения угловой скорости характеризуется *угловым ускорением*.

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

$$\vec{\varepsilon} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \vec{\omega}}{\Delta t} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}.$$

Вектор углового ускорения $\vec{\varepsilon}$ направлен вдоль оси вращения в направлении вектора $\vec{\omega}$ при ускоренном вращении $(\vec{\varepsilon} \uparrow\uparrow \vec{\omega})$ и противоположно вектору $\vec{\omega}$ - при замедленном вращении $(\vec{\varepsilon} \uparrow\downarrow \vec{\omega})$.

Единица углового ускорения в СИ - рад/с$^2$.

## Угловые характеристики вращательного движения

При постоянном значении углового ускорения $\vec{\varepsilon} = const$ тело совершает *равнопеременное* вращательное движение.

При равнопеременном вращении, зависимость угловой скорости от времени описывается уравнением:

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} \Rightarrow d\omega = \varepsilon \cdot dt \Rightarrow \int_{\omega_0}^{\omega} d\omega = \varepsilon \int_{t_0}^{t} dt \Rightarrow \quad \omega = \omega_0 + \varepsilon\left(t - t_0\right),$$

где $\omega_0$ – начальная угловая скорость.

Тогда угол поворота

$$d\varphi = \left(\omega_0 + \varepsilon t\right)dt \Rightarrow \int_{\varphi_0}^{\varphi} d\varphi = \int_{t_0=0}^{t} \left(\omega_0 + \varepsilon t\right)dt \Rightarrow$$

$$\varphi = \varphi_0 + \omega_0 \cdot t + \frac{\varepsilon \cdot t^2}{2},$$

где $\varphi_0$ – начальный угол поворота

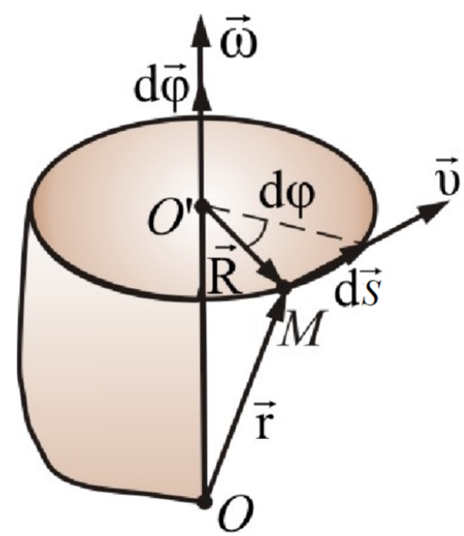
## Кинематика твердого тела

### Связь между кинематическими угловыми и линейными величинами

Между угловыми величинами, характеризующими вращательное движение, и линейными параметрами, определяющими движение отдельных точек вращающегося тела, существует связь.

Отдельные точки вращающегося тела имеют различные линейные скорости $\vec{v}$.

Вектор линейной скорости непрерывно меняет свое направление, а величина скорости $v$ зависит от скорости вращения тела $\omega$ и расстояния $R$ рассматриваемой точки до оси вращения.

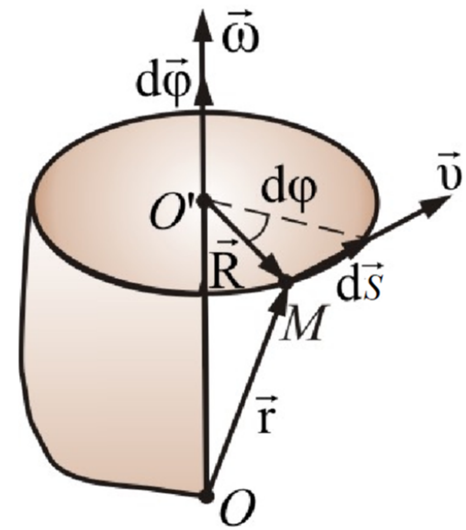



За промежуток времени $dt$ точка $M$ проходит путь $ds = v \cdot dt$.

# Кинематика твердого тела

## Связь между кинематическими угловыми и линейными величинами

В то же время, $ds = R \cdot d\varphi$ (центральный угол). С учетом этого получаем выражение, связывающее линейную и угловую скорости.




$$v = \frac{ds}{dt} = \frac{R \cdot d\varphi}{dt} \Rightarrow \quad v = R \cdot \omega.$$

В векторной форме последнее выражение имеет вид:

$$\vec{v} = \left[\vec{\omega} \cdot \vec{R}\right].$$

Направление вектора линейной скорости $\vec{v}$ совпадает с направлением поступательного движения правого винта при его вращении от $\vec{\omega}$ к $\vec{R}$. При этом модуль векторного произведения, по определению, равен $\omega \cdot R \sin\left(\widehat{\vec{\omega}\,\vec{R}}\right)$,

## Кинематика твердого тела

### Связь между кинематическими угловыми и линейными величинами

Продифференцировав линейную скорость $v$ по времени, получим выражение для тангенциального ускорения и его связи с угловым ускорением

$$a_\tau = \frac{dv}{dt} = R\frac{d\omega}{dt} = R \cdot \varepsilon.$$

Нормальное ускорение точек вращающегося тела равно

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

Таким образом, линейная скорость $\vec{v}$, нормальное $\vec{a}_n$ и тангенциальное ускорения $\vec{a}_\tau$ растут линейно с увеличением расстояния от точки до оси вращения, а все угловые характеристики: угол поворота $\Delta\varphi$, угловая скорость $\vec{\omega}$, угловое ускорение $\vec{\varepsilon}$ одинаковы для всех точек твердого тела.

## Связь между кинематическими угловыми и линейными величинами

Поступательное и вращательное движения твердого тела являются простейшими типами его движения. В общем случае твердое тело может двигаться весьма сложным образом.

Однако, в теоретической механике доказывается, что любое сложное движение твердого тела можно представить как комбинацию поступательного и вращательного движений.