

Основная литература	Дополнительная литература
Савельев И.В. Курс общей физики, т. 1, Механика. М., Наука: Физматлит, 1998	Иродов И.Е. Основные законы механики. Физика макросистем. М., Физматлит, 2001
Савельев И.В. Курс общей физики, т. 3, Молекулярная физика и термодинамика. М., Астрель, 2001	Трофимова Т.И. Курс физики. М., Высшая школа, 1997
Чертов А.Г., Воробьев А.А. Задачник по физике. М., 1998	Сивухин Д.В. Общий курс физики, т.1-2, М., Наука, 1979-1989
Волькенштейн В.С. Сборник задач по общему курсу физики, 1999	

1. Предмет физики

Физика – наука о наиболее простых и общих формах движения материи.

Неживая материя существует в двух видах – *вещества* (атомы, молекулы и построенные из них тела) *и поля* (электромагнитное и гравитационное поля, а также поля сильных и слабых взаимодействий).

Вещество и поле могут превращаться друг в друга.

Например, в результате аннигиляции электрона и позитрона рождаются фотоны – кванты электромагнитного поля.

Существует и обратный процесс: при движении фотона вблизи ядер может рождаться пара частиц *электрон + позитрон*.

Основным методом исследования в физике является опыт. В результате обобщения опытных фактов устанавливаются физические законы в виде соотношений между физическими величинами.

Физический закон – это устойчивая, повторяющаяся закономерность, существующая в природе.

По мере накопления опытных данных происходит уточнение законов, смена физических теорий.

Физика тесно связана с другими естественными науками – химией, биологией, астрономией, геологией и т.д.

Исторически физика возникла из потребностей техники в **Древней Греции**.

В **19** веке потребность в более экономичных двигателях привела к созданию новых разделов физики — термодинамики, статистической физики и т.д.

Изучение физики начинается с механики.

Механика это часть физики, в которой изучаются закономерности механического движения.

Механическое движение есть изменение во времени взаимного расположения тел или частей тел.

Механика как наука началась с работ
Архимеда (287-212 г. до н.э.).

Основные законы механики открыл
Галилей (1564-1642 г.).

Окончательно законы механики сформулировал
Ньютон (1643-1727 г.) в своей работе *“Математические
начала натуральной философии”* (1687 г.).

Поэтому **Ньютона** считают основателем
естествознания.

Механика **Галилея-Ньютона** называется *классической
механикой*. Ее законы справедливы для макротел,
движущихся со скоростями много меньшими скорости
света.

Если скорости тел сравнимы со скоростью света, то их движение необходимо описывать другой - *релятивистской механикой*, основанной на *специальной теории относительности* (Эйнштейн, 1905 г.).

Для микрочастиц (атомов, молекул, элементарных частиц) законы классической механики также не справедливы – их надо описывать с помощью *квантовой механики* (Планк, 1900 г.)

Механика делится на 3 части:

- 1) кинематику** - изучает движение тел, отвлекаясь от причин, его вызывающих
- 2) динамику** - изучает законы движения тел и причины, вызывающие их движение
- 3) статику** - изучает законы равновесия тел

Рассмотрим сначала основные законы кинематики.

2. Кинематика материальной точки

2.1 *Понятия системы отсчета и материальной точки*

Ньютон считал пространство и время *абсолютными*, не зависящими друг от друга и от присутствующих в них тел.

Пространство – этоместилище вещей, которое везде и всегда одинаковое и неподвижное.

Время – течет равномерно безотносительно к чему-либо.

Согласно специальной теории относительности пространство и время *неразрывно связаны друг с другом* и образуют единое 4-х мерное пространство-время.

В общей теории относительности показывается, что *массы искривляют пространство и влияют на ход времени.*

Для описания движения какого-либо тела необходимо указать по отношению к какому телу рассматривается его движение.

Для измерения времени надо иметь часы.

Роль часов может выполнять любое устройство, повторяющее многократно один и тот же процесс.

Совокупность неподвижных друг относительно друга тел и отсчитывающих время часов образуют систему отсчета.

Описать движение тела – значит указать для каждого момента времени положение тела в пространстве и его скорость.

Для системы тел – надо задать положения и скорости всех входящих в систему тел.

Задание положений и скоростей тел полностью определяет состояние механической системы.

Для описания движения тел используют приближения. Часто можно пренебречь размерами тела.

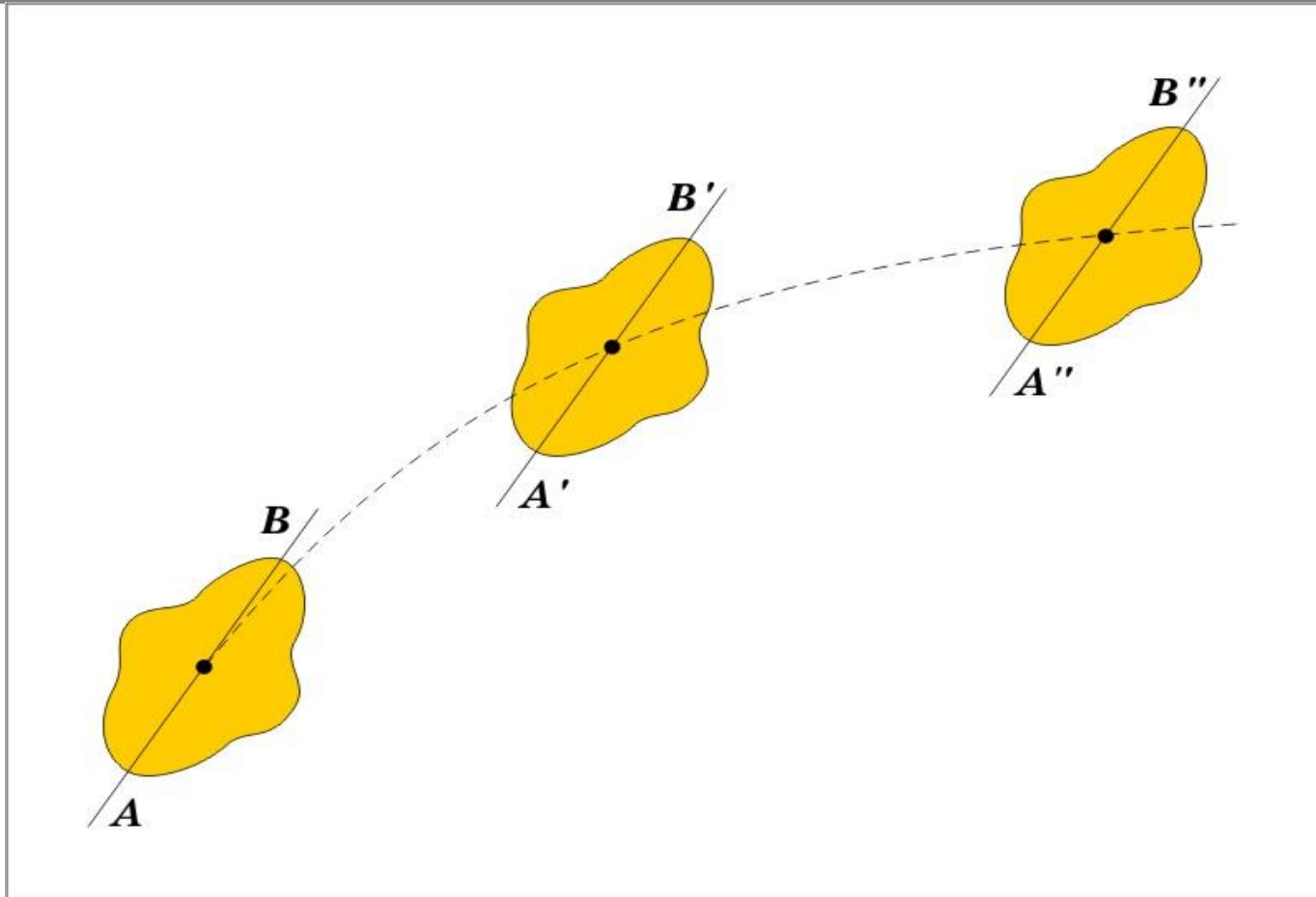
Тело, размерами которого в условиях решаемой задачи можно пренебречь, называется материальной точкой.

Одно и то же тело в одних условиях можно рассматривать как материальную точку, а в других нельзя.

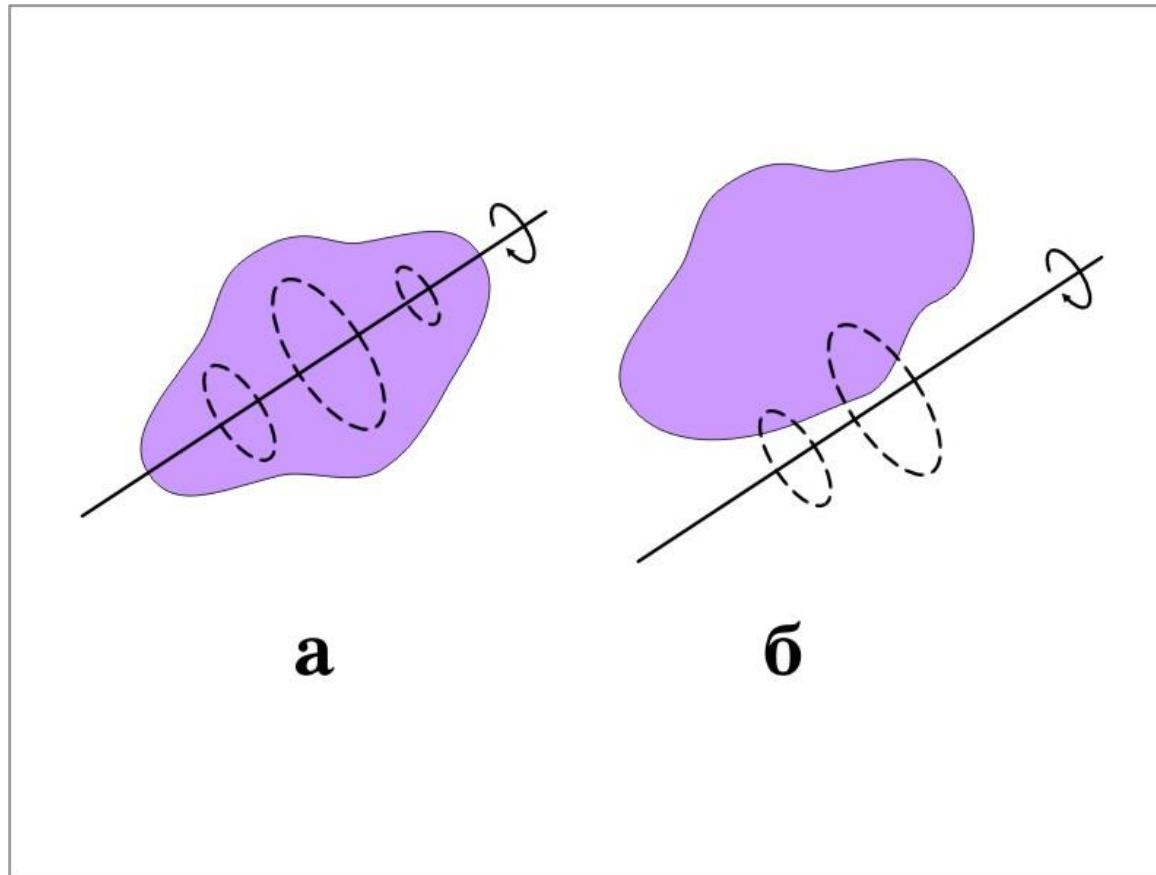
Материальную точку далее будем называть частицей.

Всякое движение можно разложить на два основных вида движения – поступательное и вращательное.

Поступательное движение - такое движение, при котором любая прямая, связанная с телом, остается параллельной самой себе при движении тела.

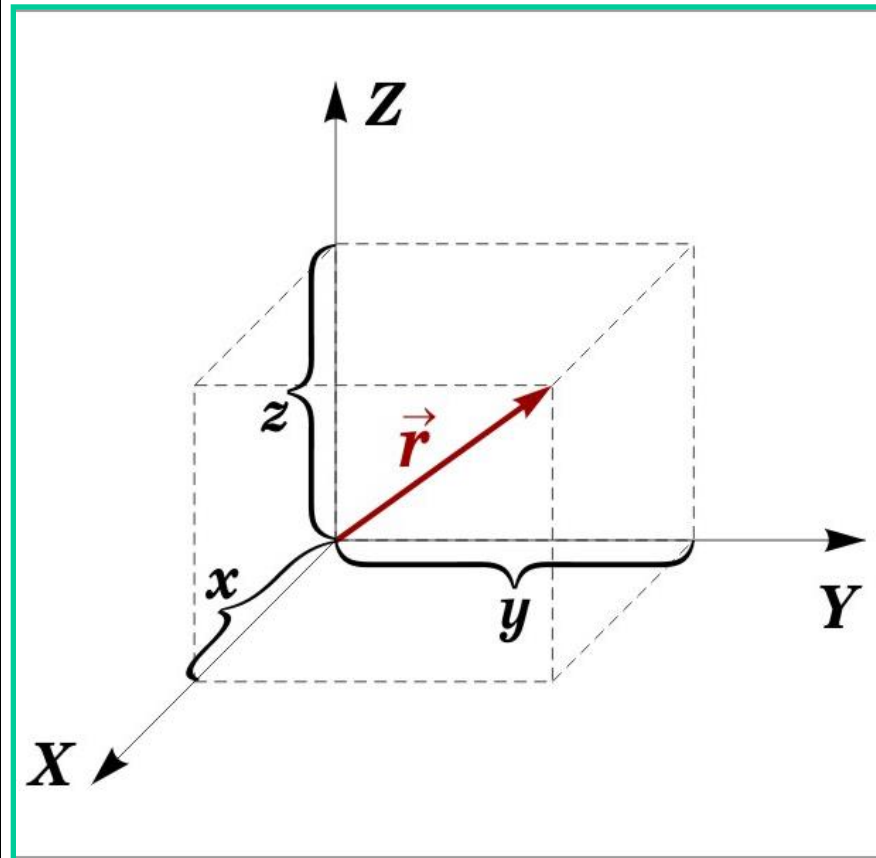


При вращательном движении все точки тела движутся по окружностям, центры которых лежат на одной и той же *оси вращения* (а). Ось вращения может *находиться и вне тела* (б).



Для описания движения вводят **систему координат**, которая связана с телами, образующими систему отсчета.

В **прямоугольной декартовой системе координат** положение точки определяется 3-мя проекциями (x, y, z) на декартовые оси радиус-вектора $\vec{r}$, проведенного из начала координат в данную точку



$$\vec{r} = x\vec{e}_x + y\vec{e}_y + z\vec{e}_z \quad (2.1.1)$$

где $\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z$ - базисные векторы (орты), имеющие единичную

длину $|\vec{e}_x| = |\vec{e}_y| = |\vec{e}_z| = 1$

и ортогональные друг к другу $\vec{e}_x \perp \vec{e}_y \perp \vec{e}_z$, поэтому

$$|\vec{r}|^2 = r^2 = x^2 + y^2 + z^2$$

2.2 Перемещение и скорость материальной точки

При своем движении материальная точка описывает некоторую линию, которая называется *траекторией*.

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

Координаты точки меняются со временем согласно *кинематическим уравнениям движения*

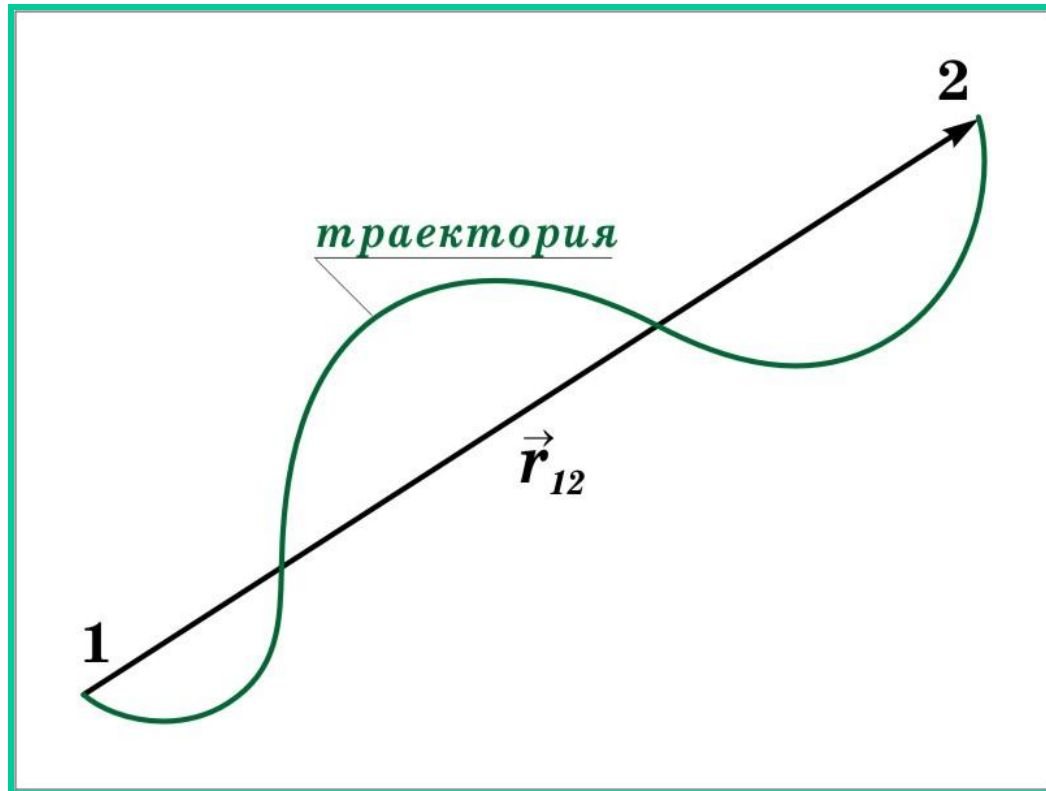
$$x = x(t) ; y = y(t) ; z = z(t) \quad (2.2.1)$$

которые можно записать в векторном виде $\vec{r} = \vec{r}(t)$

Уравнение траектории получается из уравнений (2.2.1) путем исключения времени t .

Пусть частица движется вдоль некоторой траектории и за время t перемещается из точки **1** с радиус-вектором $\vec{r}_1$ в точку **2** с радиус-вектором $\vec{r}_2$.

Вектор $\vec{r}_{12}$, соединяющий начальную точку **1** с конечной точкой **2**, называется *перемещением*



$$\vec{r}_{12} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$$

Длина траектории S называется *путем*, пройденным частицей за время t .

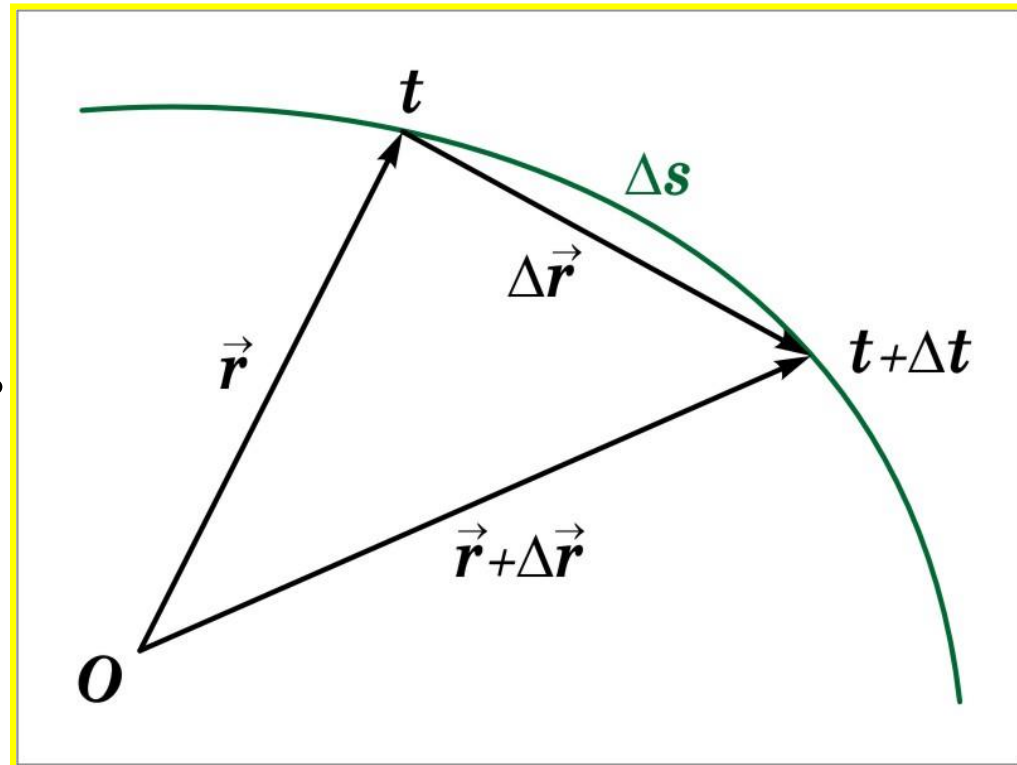
Быстроту и направление движения частицы характеризует векторная величина – *скорость*.

Получим формулу для скорости. Пусть за малый промежуток времени Δt частица прошла путь Δs и переместилась на вектор $\Delta \vec{r}$. Тогда **среднее значение скорости** частицы есть отношение вектора перемещения к затраченному времени:

$$\Delta \vec{r} / \Delta t$$

Уменьшая промежуток времени Δt , в пределе получим *мгновенную* скорость частицы в момент времени t

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt} \quad (2.2.2)$$



Следовательно, *вектор мгновенной скорости равен первой производной радиус-вектора по времени.*

Направление скорости совпадает с направлением вектора бесконечно малого перемещения $d\vec{r}$, который направлен вдоль касательной к траектории.

Модуль скорости равен

$$v = |\vec{v}| = \frac{d|\vec{r}|}{dt} = \frac{dr}{dt}$$

Из рисунка видно, что модуль перемещения dr является хордой, которая в силу своей малости равна длине дуги, выступающей пройденным путем ds : $dr = ds$, поэтому

$$v = ds/dt \quad (2.2.3)$$

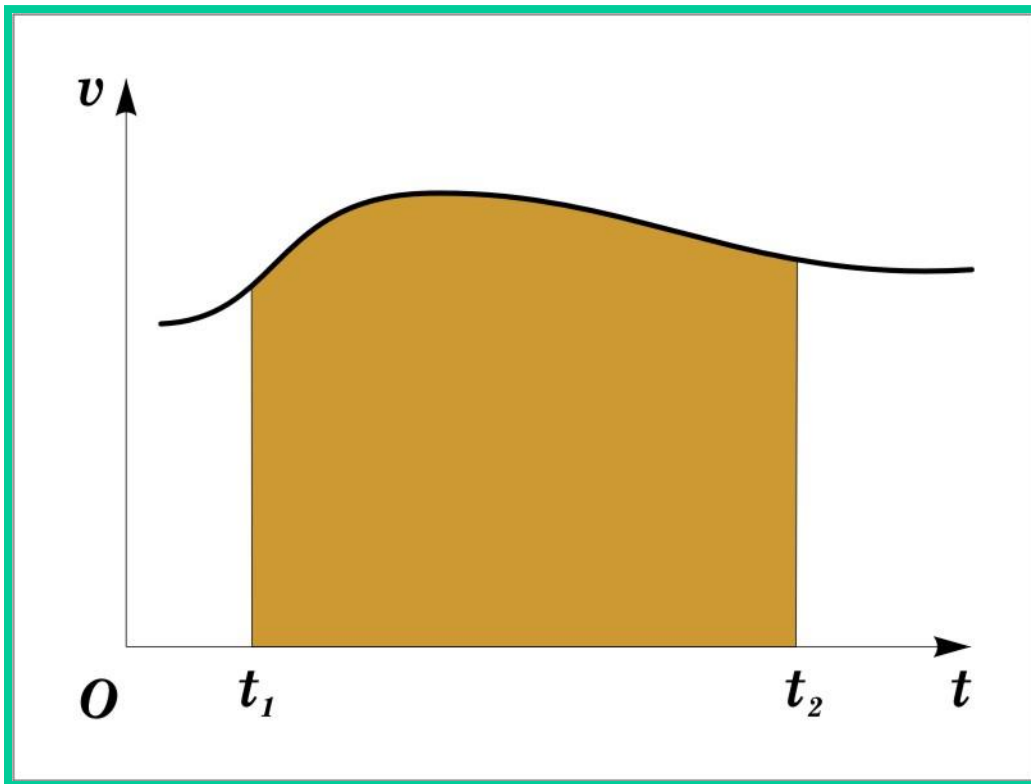
Модуль мгновенной скорости равен первой производной от пути по времени.

Из формулы (2.2.3) следует, что элементарный путь, пройденный частицей за бесконечно малое время dt , равен

$$ds = v dt$$

За конечное время движения $t = t_2 - t_1$ от точки 1 до точки 2 частица пройдет путь, равный интегралу

$$s = \int_1^2 ds = \int_{t_1}^{t_2} v dt \quad (2.2.4)$$



Поэтому путь имеет простой геометрический смысл – он *равен площади* под кривой скорости $v(t)$ на участке 1-2.

Используя выражение для радиус-вектора (2.1.1) и учитывая постоянство декартовых ортов во времени, получим формулы для проекций вектора скорости

$$d\vec{r} = dx\vec{e}_x + dy\vec{e}_y + dz\vec{e}_z$$

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{dx}{dt}\vec{e}_x + \frac{dy}{dt}\vec{e}_y + \frac{dz}{dt}\vec{e}_z = v_x\vec{e}_x + v_y\vec{e}_y + v_z\vec{e}_z$$

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

$$v^2 = |\vec{v}|^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$$

$$\vec{v} = v_x\vec{e}_x + v_y\vec{e}_y + v_z\vec{e}_z \quad (2.2.5)$$

При неравномерном движении мгновенная скорость частицы меняется от точки к точке.

Определим *среднее значение модуля скорости* за конечное время от t_1 до t_2 как отношение пройденного пути S к затраченному времени $t = t_2 - t_1$

$$\langle v \rangle = \frac{S}{t_2 - t_1} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} v(t) dt \quad (2.2.6)$$

Аналогично определяется *среднее значение вектора скорости* на участке пути

$$\langle \vec{v} \rangle = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \vec{v}(t) dt \quad (2.2.7)$$

Из сравнения (2.2.2) с (2.2.7) видим, что *мгновенная скорость есть средняя скорость на бесконечно малом пути.*

Представим вектор скорости в другом виде

$$\vec{v} = v \vec{\tau} \quad (2.2.8)$$

где $\vec{\tau}$ - единичный вектор, направленный вдоль вектора скорости, v - модуль скорости. С другой стороны, используя (2.2.2) и (2.2.3), можем записать

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{ds}{dt} \vec{\tau}$$

Сокращая общий дифференциал времени, получаем выражение для орта

$$\vec{\tau} = \frac{d\vec{r}}{ds} \quad (2.2.9)$$

Получим для скорости еще одно полезное выражение.
Для этого запишем радиус-вектор в виде, подобном (2.2.8)

$$\vec{r} = r\vec{e} \quad (2.2.10)$$

где $\vec{e}$ - единичный вектор, направленный вдоль радиус-вектора $\vec{r}$, r - модуль радиус-вектора. Вектор $\vec{e}$ зависит от времени, так как $\vec{r}$ с течением времени меняет свое направление. Подставим (2.2.10) в формулу скорости

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{d(r\vec{e})}{dt} = \frac{dr}{dt}\vec{e} + r\frac{d\vec{e}}{dt}$$

Следовательно, скорость равна сумме двух составляющих

$$\vec{v} = \vec{v}_r + \vec{v}_\varphi \quad (2.2.11)$$

где

$$\vec{v}_r = \frac{dr}{dt}\vec{e} \quad ; \quad v_r = \frac{dr}{dt} \quad ; \quad \vec{v}_\varphi = r\frac{d\vec{e}}{dt}$$

Составляющая скорости $\vec{v}_r$ направлена вдоль радиус-вектора и поэтому *характеризует быстроту изменения модуля* этого вектора. Чтобы установить смысл второй составляющей скорости $\vec{v}_\phi$, рассмотрим движение частицы в плоскости (x, y) .

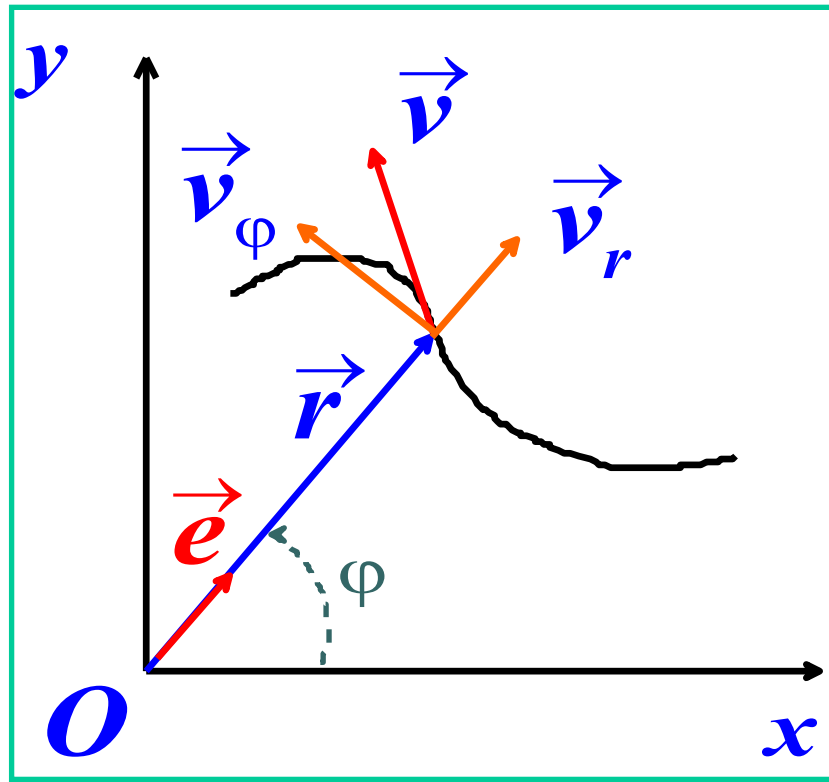


Рис.1 Вектора в момент времени t

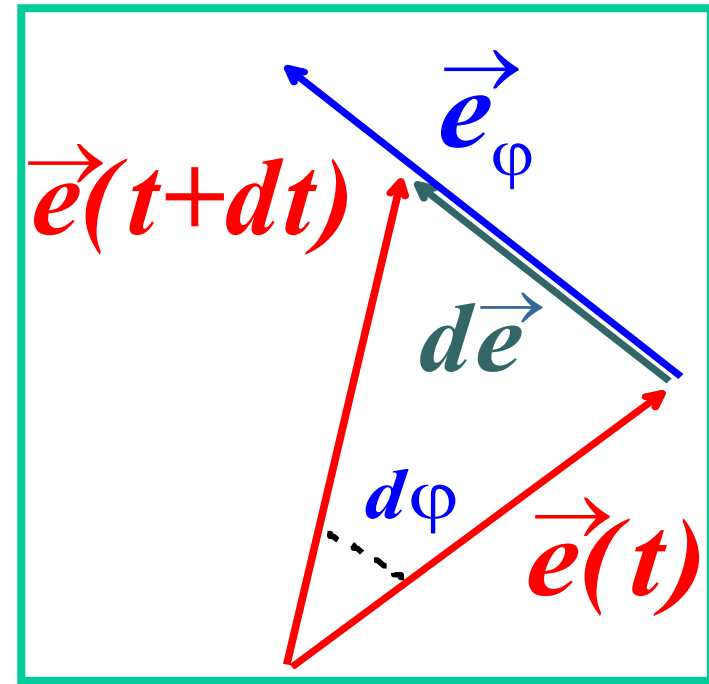


Рис.2 Орт $\vec{e}$ в два близких момента времени

При движении частицы вдоль траектории единичный вектор $\vec{e}$ меняет *только свое направление, поэтому его конец описывает окружность*. Запишем приращение этого вектора в виде

$$d\vec{e} = de \cdot \vec{e}_\varphi$$

где $\vec{e}_\varphi$ – орт, направленный вдоль $d\vec{e}$.

Поскольку угол поворота $d\varphi$ мал, то можно считать, что

$$d\vec{e} \perp \vec{e} \quad ; \quad \vec{e}_\varphi \perp \vec{e} \quad ; \quad de = d\varphi \quad ; \quad d\vec{e} = d\varphi \cdot \vec{e}_\varphi$$

Разделив последнее равенство на время dt , за которое произошел поворот вектора $\vec{e}$, получим

$$\frac{d\vec{e}}{dt} = \frac{d\varphi}{dt} \vec{e}_\varphi = \dot{\varphi} \vec{e}_\varphi \quad (2.2.12) \quad \dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt}$$

где $\dot{\varphi}$ – модуль угловой скорости вращения вектора $\vec{e}$.

Подставим последнюю формулу (2.2.12) в выражение для скорости $\vec{v}_\varphi$

$$\vec{v}_\varphi = r \frac{d\vec{e}}{dt} = r\dot{\varphi}\vec{e}_\varphi \quad (2.2.13)$$

Отсюда следует, что составляющая скорости $\vec{v}_\varphi$ *характеризует быстроту изменения направления* радиус-вектора $\vec{r}$.

Поскольку $\vec{e}_\varphi \perp \vec{e}$, то и $\vec{v}_\varphi \perp \vec{v}_r$, поэтому

$$v = \sqrt{v_r^2 + v_\varphi^2} = \sqrt{v_r^2 + r^2(\dot{\varphi})^2} \quad (2.2.14)$$

2.3 Ускорение материальной точки

При неравномерном движении скорость частицы может меняться как по величине, так и по направлению. Быстрота изменения скорости определяется *ускорением*, которое равно первой производной от скорости по времени

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \dot{\vec{v}} \quad (2.3.1)$$

Проекция вектора ускорения на декартовую ось x равна

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = \dot{v}_x = \frac{d}{dt} \left(\frac{dx}{dt} \right) = \ddot{x}$$

Для a_y и a_z надо сделать замены $x \rightarrow y$ и $x \rightarrow z$.

Выделим из ускорения нормальную и тангенциальную составляющие. Для этого подставим в (2.3.1) формулу для скорости $\vec{v} = v\vec{\tau}$ получим

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

Обозначим

$$\vec{a}_\tau = \frac{dv}{dt}\vec{\tau} = \dot{v}\vec{\tau} \quad ; \quad \vec{a}_n = v\frac{d\vec{\tau}}{dt} = v\dot{\vec{\tau}}$$

Тогда

$$\vec{a} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n \quad (2.3.2)$$

$\vec{a}_\tau$

- тангенциальное ускорение

$\vec{a}_n$

- нормальное ускорение

Тангенциальное ускорение $\vec{a}_\tau$ направлено вдоль единичного вектора $\vec{\tau}$, поэтому оно направлено по касательной к траектории и характеризует изменение модуля скорости.

При этом если $\dot{v} > 0$, то модуль скорости со временем увеличивается, а вектор тангенциального ускорения $\vec{a}_\tau$ направлен в ту же сторону, что и вектор скорости $\vec{v}$.

Если $\dot{v} < 0$, то модуль скорости со временем уменьшается, а векторы $\vec{a}_\tau$ и $\vec{v}$ направлены в противоположные стороны.

При равномерном движении $\dot{v} = 0$ тангенциального ускорения нет.

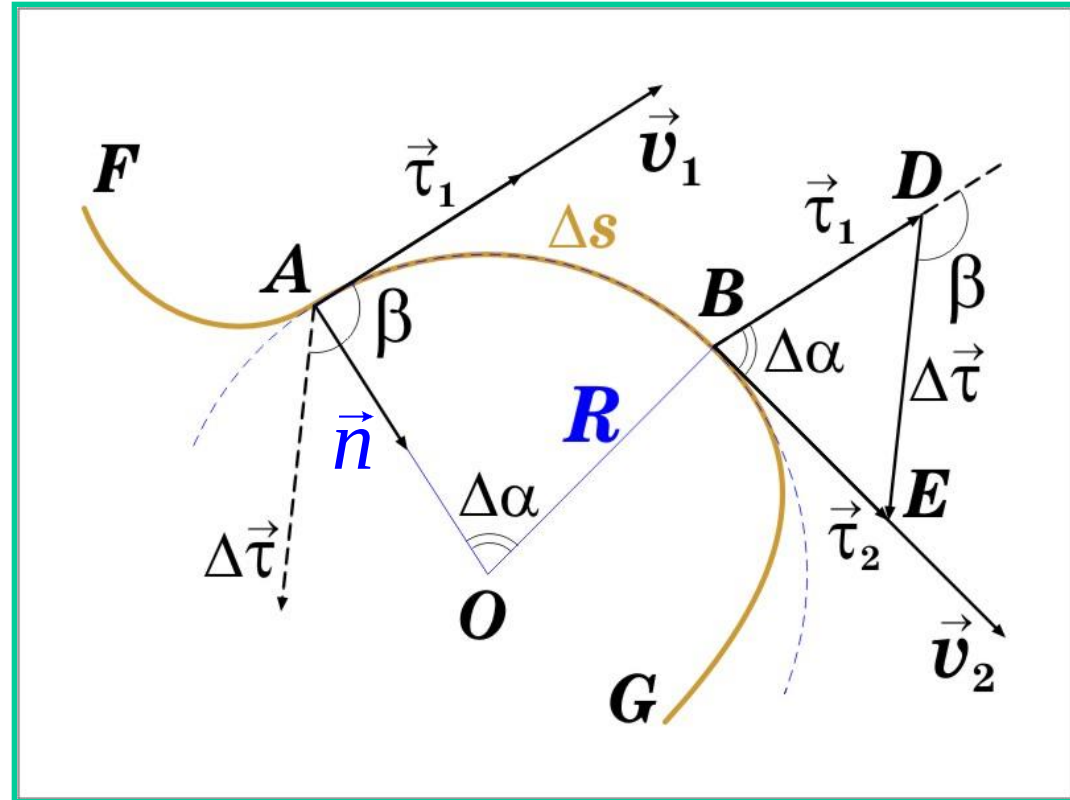
Для выяснения смысла нормального ускорения $\vec{a}_n$ рассмотрим плоское движение частицы вдоль траектории $FABG$. Малый участок траектории в окрестности точки A можно рассматривать как дугу окружности с центром O и радиусом кривизны R .

Треугольник EBD *равнобедренный* $|\vec{\tau}_1| = |\vec{\tau}_2| = 1$

а треугольники OAB и BDE *подобные*, поэтому

$$\Delta\tau = 2 \cdot \sin(\Delta\alpha/2)$$

$$\Delta\tau \approx \Delta\alpha = \Delta s / R$$



$$\dot{\tau} = \frac{d\tau}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\tau}{\Delta t} = \frac{1}{R} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{v}{R}$$

(2.3.3)

При $\Delta t \rightarrow 0$, $\Delta\alpha \rightarrow 0$, а $\beta = \pi/2 + \Delta\alpha/2 \rightarrow \pi/2$

Поэтому вектор $\dot{\vec{\tau}} = d\vec{\tau} / dt$, а с ним и вектор $\vec{a}_n$ перпендикулярны к вектору скорости $\vec{v}$ и направлены к центру кривизны O вдоль вектора нормали $\vec{n}$.

Отсюда и следует название вектора $\vec{a}_n$ - *нормальное или центростремительное* ускорение.

Нормальное ускорение не изменяет модуль скорости, оно меняет только направление скорости.

Подставляя (2.3.3) в формулу (2.3.2), получаем $\vec{a}_n$

$$\vec{a}_n = v \dot{\vec{\tau}} = \frac{v^2}{R} \vec{n} \quad (2.3.4)$$

вектор $\dot{\vec{\tau}} = d\vec{\tau} / dt$, а с ним и вектор $\vec{a}_n$ направлены к центру кривизны O вдоль вектора нормали.

Отсюда и следует название вектора - *нормальное или центростремительное* ускорение.

С учетом полученных выражений для тангенциального и нормального ускорений, вектор полного ускорения принимает окончательный вид

$$\vec{a} = \dot{v}\vec{\tau} + \frac{v^2}{R}\vec{n} \quad (2.3.5)$$

Поскольку $\vec{n} \perp \vec{\tau}$ и $|\vec{n}| = |\vec{\tau}| = 1$, то модуль полного ускорения равен

$$a = \sqrt{(\dot{v})^2 + \left(\frac{v^2}{R}\right)^2} \quad (2.3.6)$$