# ВВЕДЕНИЕ

В древности слово “физика” означало природоведение. С накоплением объема знаний природоведение расчленилось на ряд наук: физику, химию, астрономию, геологию, биологию и т.д.

Среди этих наук физика занимает особое положение, так как предметом ее изучения служат все *основные, наиболее общие, простейшие формы движения материи* (механические, тепловые, электромагнитные и т.д.). Изучаемые физикой формы движения присутствуют во всех высших и более сложных формах движения (в химических, биологических процессах и др.) и неотделимы от них, хотя никоим образом не исчерпывают их. Установленному физикой закону сохранения энергии подчиняются все процессы, независимо от того, носят ли они специфический химический, биологический или другой характер.

Процесс познания в физике, как и в любой другой науке, начинается либо с *наблюдения* явлений в естественных условиях, либо со специально поставленных опытов – *экспериментов*. На основе накопленного материала строится предварительное научное предположение о механизме и взаимосвязи явлений – создается *гипотеза*, которая требует проверки и доказательства.

Некоторые гипотезы, ряд следствий из которых противоречит опыту, оказываются ошибочными и отбрасываются при дальнейшем развитии науки (например, гипотезы флогистона, эфира и д.р.). Другие гипотезы, выдерживающие проверку на опыте и правильно предсказывающие ряд новых, ранее неизвестных явлений, входят в науку в качестве *физических теорий*. Хорошим примером этому является молекулярно-кинетическая теория.

Дальнейшее накопление знаний приводит к необходимости создания новых гипотез и развития новых теорий. Новая теория не всегда отрицает старую, но чаще всего включает ее в себя как часть, т.е. является более широкой и всеохватывающей.

Развитие физики тесно связано с развитием техники. Крупные физические открытия рано или поздно приводят к техническим переворотам, созданию новых отраслей техники, тесно связанных с физикой. В свою очередь развитие техники дает физикам в руки новые, более совершенные, более мощные методы исследования. Развитие техники и промышленности требует разрешения ряда физических проблем, тесно связанных с дальнейшим техническим прогрессом.

Широкое знание физики является необходимым для специалиста, работающего в любой области науки и техники, желающего осмыслить основы своей области знания, стремящегося принять творческое участие в ее развитии. Задача курса физики, читаемого студентам высшего технического учебного заведения, и заключается в том, чтобы помочь учащимся понять физические основы техники.

# ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ

## 1. КИНЕМАТИКА ПОСТУПАТЕЛЬНОГО И ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

### 1.1 КИНЕМАТИКА ПОСТУПАТЕЛЬНО ДВИЖЕНИЯ МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ.

Механика изучает механическую форму движения, т.е. перемещение тел или их частей друг относительно друга. Изучение других разделов физики невозможно без знания механики, так как перемещения имеют место во всех физических явлениях. Кинематика, являясь разделом механики, занимается описанием движения тел без анализа причин, вызывающих это движение. Физическая задача не может быть решена абсолютно точно, так как при ее решении приходится пренебрегать некоторыми, несущественными в данном случае, факторами. Например, при движении Земли вокруг Солнца можно пренебречь размерами Земли. Тело, размерами которого можно пренебречь, в условиях данной задачи, называют **материальной точкой**. Для описания движения материальной точки необходимо выбрать тело отсчета, относительно которого будем рассматривать его движение. Обычно с этим телом связывают какую-либо систему координат, например декартовую, которая дает возможность количественно описать движение. Положение материальной точки в процессе движения характеризуется радиус-вектором $\vec{r} = \vec{r}(t)$, проведенным из начала координат к точке. Проецируя $\vec{r}$ на координатные оси, получим $x = x(t), y = y(t), z = z(t)$. Отсюда следует, что положение материальной точки в любой момент времени полностью задается тремя числами. Поэтому говорят, что материальная точка имеет три степени свободы. Используя правило сложения векторов можно уравнение движения записать в векторной форме: $\vec{r} = r_x \vec{i} + r_y \vec{j} + r_z \vec{k}$.

Линию, описываемую материальной точкой при движении, называют **траекторией**. Пусть материальная точка переместилась вдоль некоторой траектории из положения 1 в положение 2 (рисунок 1.1). Расстояние $\Delta s$ между точками 1 и 2, отсчитанной вдоль траектории, называется **путем**, пройденным частицей. Прямолинейный отрезок $\Delta\vec{r}$, проведенный из точки 1 в точку 2, называется **перемещением** частицы. Перемещение является векторной величиной. Сумма нескольких перемещений находится по закону сложения векторов. Если при движении частица проходит за равные промежутки времени одинаковые пути, движение называют равномерным. Скорость такого движения можно вычислить, разделив путь s на время t, т.е. $\upsilon = \frac{s}{t}$. Размерность скорости $[\upsilon] = \text{м/с}$. В физике под скоростью понимают векторную величину, характеризующую не только быстроту перемещения частицы, но и направление, в котором движется эта частица.

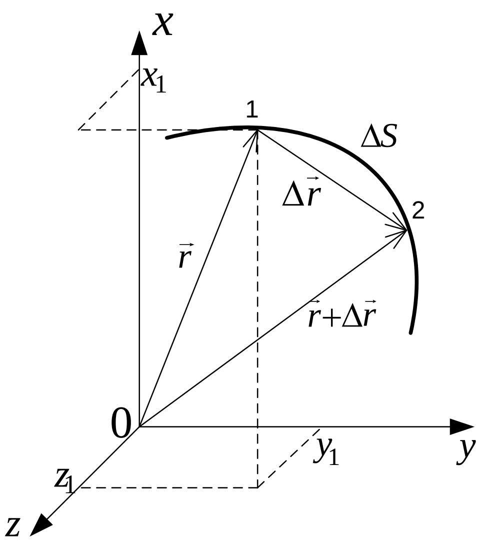

Рисунок 1.1

Пусть за время $\Delta t$ частица получила перемещение $\Delta\vec{r}$. Величину $\vec{\upsilon}_{\text{ср}} = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}$ называют средней скоростью движения частицы. Если брать всё более малые промежутки времени $\Delta t$, то отношение $\frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}$ в пределе стремится к точному значению скорости $\vec{\upsilon}$ в данной точке, которая называется мгновенной:

$$\vec{\upsilon} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \dot{\vec{r}},$$

где $\dot{\vec{r}}$ есть производная от радиус-вектора по времени.

В предельном случае при $\Delta t \to 0$ направление $\Delta\vec{r}$ совпадает с направлением касательной к траектории. Поэтому, в любой точке траектории, мгновенная скорость направлена по касательной к траектории. Модуль мгновенной скорости определяется по формуле

$$\upsilon = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\left|\Delta\vec{r}\right|}{\Delta t}.$$

При $\Delta t \to 0$ величина $\left|\Delta\vec{r}\right| \to \Delta s$, поэтому формулу можно записать в виде:

$$\upsilon = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt}.$$

Таким образом, модуль скорости равен производной от пути по времени.

Быстрота изменения вектора скорости определяется отношением изменения скорости $\Delta\vec{\upsilon}$ к соответствующему промежутку времени $\Delta t$ и называется средним ускорением:

$$\vec{a}_{\text{ср}} = \frac{\Delta\vec{\upsilon}}{\Delta t}.$$

Размерность ускорения $[a] = \text{м}/\text{с}^2$. Соответственно мгновенное ускорения равно

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vec{\upsilon}}{\Delta t} = \frac{d\vec{\upsilon}}{dt} = \dot{\vec{\upsilon}}. \qquad (1.1)$$

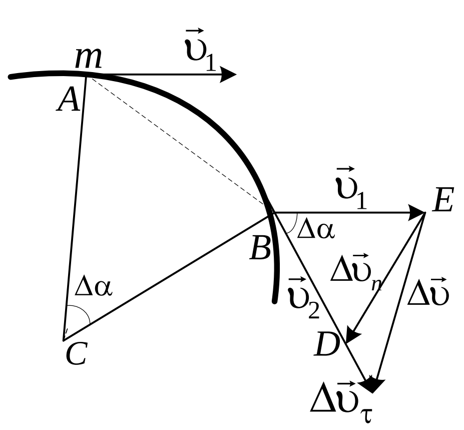


Рисунок 1.2

Пусть материальная точка М движется по криволинейной траектории и за время $\Delta t$ переместится из точки А в точку В (рисунок 1.2). При этом вектор её скорости изменится от значения $\vec{\upsilon}_1$ до значения $\vec{\upsilon}_2$. Для нахождения разности векторов перенесем вектор $\vec{\upsilon}_1$ параллельно его направлению так, чтобы его начало переместилось из точки А в точку В. Разность векторов $\Delta\vec{\upsilon} = \vec{\upsilon}_2 - \vec{\upsilon}_1$ есть вектор, проведенный из конца $\vec{\upsilon}_1$ к концу $\vec{\upsilon}_2$. Отложим на векторе $\vec{\upsilon}_2$ точку D так, чтобы отрезок BD = $\upsilon_1$. Разложим вектор $\Delta\vec{\upsilon}$ на составляющие $\Delta\vec{\upsilon}_n$ и $\Delta\vec{\upsilon}_\tau$, так чтобы $\Delta\vec{\upsilon} = \Delta\vec{\upsilon}_n + \Delta\vec{\upsilon}_\tau$. Ускорение точки M будет равно

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vec{\upsilon}}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vec{\upsilon}_n}{\Delta t} + \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vec{\upsilon}_\tau}{\Delta t} = \vec{a}_n + \vec{a}_\tau \tag{1.2}$$

Из выражения (1.2.) следует, что полное ускорение точки M равно векторной сумме ускорений $\vec{a}_n$ и $\vec{a}_\tau$. Ускорение $\vec{a}_\tau$ совпадает по направлению с вектором $\Delta\vec{\upsilon}_\tau$, т.е. при $\Delta t \to 0$ с направлением скорости в точке A. $\vec{a}_\tau$ называется **тангенциальным** или линейным ускорением, направлено по касательной к траектории и характеризует изменение скорости по величине. Модуль тангенциального ускорения равен $a_\tau = \dfrac{d\upsilon}{dt}$.

Ускорение $\vec{a}_n$ совпадает по направлению с вектором $\Delta\vec{\upsilon}_n$, т.е. при $\Delta t \to 0$ направлено к центру, перпендикулярно скорости в точке A. Это ускорение характеризует изменение вектора скорости по направлению. Из рисунка 1.2 по определению радианной меры угла получим $\Delta\varphi = \dfrac{\Delta s}{r}$, из подобия треугольников для малых $\Delta\varphi$ следует, что $\Delta\varphi \approx \dfrac{\Delta\upsilon_n}{\upsilon}$. Здесь $r$ – радиус кривизны траектории в данной точке, $\Delta s$ – путь пройденный точкой. Приравнивая правые части равенств, получим $\Delta\upsilon_n \approx \dfrac{\Delta s \cdot \upsilon}{r}$. Используя это выражение получим:

$$a_n = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\upsilon_n}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\upsilon \Delta s}{r \Delta t} = \frac{\upsilon}{r} \frac{ds}{dt} = \frac{\upsilon^2}{r} \tag{1.3}$$

Ускорение $a_n$ называется **нормальным** или **центростремительным**

Так как векторы $\vec{a}_n$ и $\vec{a}_\tau$ взаимно перпендикулярны, то модуль полного ускорения определяется по теореме Пифагора

$$a^2 = a_n^2 + a_\tau^2 .$$

Для равнопеременного движения, суммируя все $d\upsilon = a_\tau dt$ за промежуток времени от 0 до *t*, получим для модуля скорости $\upsilon$:

$$\int_{\upsilon_0}^{\upsilon} d\upsilon = \int_0^t a_\tau dt, \text{ или } \upsilon = \upsilon_0 + a_\tau t \qquad (1.4.)$$

Аналогично суммируя все $ds$ за промежуток времени от 0 до t, используя выражение $ds = \upsilon dt$, получим формулу для пройденного пути:

$$s = \int ds = \int_0^t (\upsilon_0 + a_\tau t)dt = \upsilon_0 t + \frac{a_\tau t^2}{2} \qquad (1.5.)$$

## 1.2 КИНЕМАТИКА ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА.

При вращательном движении твердого тела все его точки движутся по окружностям, центры которых лежат на оси вращения. Как следует из рисунка 1.3, за некоторое время $dt$ радиус вектор $\vec{R}$ произвольной точки твердого тела повернется на один и тот же угол $d\varphi$, а сама точка сместится на некоторое расстояние $ds$. Соответственно, при вращательном движении роль пройденного пути может играть угол поворота тела $d\varphi$, а вместо линейной скорости вводят угловую скорость

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt} \qquad (1.6)$$

Размерность угловой скорости $[\omega] = \text{рад/с}$.

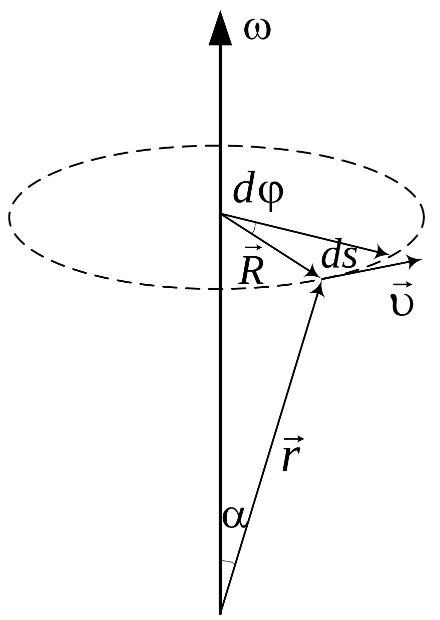


Рисунок 1.3

По определению радианной меры

угла получим $d\varphi = \frac{ds}{R}$. Учитывая выражение (1.6) получим

$$\omega = \frac{ds}{Rdt} \text{ или } \omega = \frac{\upsilon}{R} \qquad (1.7)$$

Как показывает опыт, результирующую угловой скорости можно найти по закону сложения векторов. Поэтому угловую скорость представляют в виде вектора, направление которого определяется по **правилу правого винта** (или **буравчика**): вектор ω направлен по оси вращения тела в сторону перемещения правого винта, головка которого вращается так же, как тело (рисунок 1.3). Вектор $\vec{\omega}$ является аксиальным, т.е. направленным по оси вращения. Этот вектор отличается от таких наглядных векторов, как скорость, перемещение, и его иногда называют псевдовектором.

Согласно рисунку 1.3, $R = r\sin\alpha$, где $\vec{r}$ – радиус-вектор, проведенный из произвольной точки на оси вращения, $\alpha$ – угол между векторами $\vec{\omega}$ и $\vec{r}$. С учётом равенства (1.7) получим v=ω r sinα. Если модули двух любых векторов, таких как $\vec{\omega}$ и $\vec{r}$, связаны подобным соотношением и оба эти вектора перпендикулярны к третьему вектору, как вектор $\vec{\upsilon}$, то эти три вектора записываются в виде векторного произведения $\vec{\upsilon} = \left[\vec{\omega} \cdot \vec{r}\right] = \vec{\omega} \times \vec{r}$. Направление вектора $\vec{\upsilon}$ так же определяется по правилу буравчика: если буравчик вращать от направления вектора $\vec{\omega}$ к направлению вектора $\vec{r}$, то направление его поступательного движения совпадет с направлением вектора $\vec{\upsilon}$.

По аналогии с поступательным движением для описания вращательного вводится **вектор углового ускорения**

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} \qquad (1.8)$$

где $d\omega$ – изменение вектора угловой скорости за время $dt$. Размерность углового ускорения $[\varepsilon] = \text{рад}/\text{с}^2$. Как и вектор $\vec{\omega}$, вектор $\vec{\varepsilon}$ является псевдовектором и направлен по оси вращения. При равноускоренном вращении тела вокруг неподвижной оси направление вектора $\vec{\varepsilon}$ и $\vec{\omega}$ совпадают, при равнозамедленном вращении их направления противоположны.

Найдем связь между линейным и угловым ускорениями. Модуль тангенциально ускорения $a_\tau = \frac{d\upsilon}{dt}$. С учетом равенства (1.7) получим

$$a_\tau = \frac{d(\omega R)}{dt} = R\frac{d\omega}{dt} = \varepsilon R. \qquad (1.9)$$

Аналогично формуле, связывающей угловую и линейную скорости, равенство (1.9) можно записать в виде векторного произведения $\vec{a}_\tau = \left[\vec{\varepsilon} \cdot \vec{r}\right]$.

При вращении тела вокруг неподвижной оси с постоянным угловым ускорением $\varepsilon$ легко получить зависимости угла поворота $\varphi$ и угловой скорости $\omega$ от времени. Подставляя в формулы (1.4) и (1.5) выражения $s = \varphi \cdot R$, $\upsilon = \omega \cdot R$, $a_\tau = \varepsilon \cdot R$, получим

$$\varphi = \omega_0 t + \frac{\varepsilon t^2}{2}, \qquad (1.10)$$

$$\omega = \omega_0 + \varepsilon t, \qquad (1.11)$$

где $s$ – расстояние, которое проходит точка, находящаяся на расстоянии $R$ от оси вращения, при повороте тела на угол $\varphi$; $\upsilon$ – линейная скорость этой точке; $a_\tau$ – тангенциальное ускорение.