§ 7. Абсолютное, относительное и переносное движения

Говоря о движении тел, мы непременно должны указать, относительно какой системы координат происходит это движение. Действительно, пассажир, сидящий в автомобиле, неподвижен относительно машины, но в то же время он движется вместе с автомобилем в системе координат, связанной с Землей. Хотя в кинематике все системы отсчета равноправны, однако кинематические величины (координаты, траектория, путь, перемещение) в разных системах отсчета будут разными. При переходе из одной системы координат в другую указанные величины могут изменяться. В этом и состоит относительность движения.

При решении различных задач часто бывает удобно переходить от одной системы координат к другой, поэтому нужно уметь находить связи между различными кинематическими величинами в различных системах отсчета.

Представим себе две системы координат: неподвижную $X_0Y_0Z_0$ и XYZ, которая движется относительно системы $X_0Y_0Z_0$ со скоростью v_0.

Движение точки относительно неподвижной системы координат условно называют *абсолютным*.

Движение точки относительно подвижной системы координат называют *относительным*.

Движение самой подвижной системы координат относительно неподвижной называют *переносным*.

Соответственно скорость, ускорение, перемещение и траекторию точки в неподвижной системе координат называют абсолютными, а аналогичные физические величины в подвижной системе координат называют относительными.

Пусть по реке слева направо плывет плот, по которому перемещается человек. Одну систему координат $X_0 0 Y_0$ (неподвижную) свяжем с берегом реки, а другую $X0Y$ (подвижную) свяжем с плотом (*рис. I.27*, вид сверху).

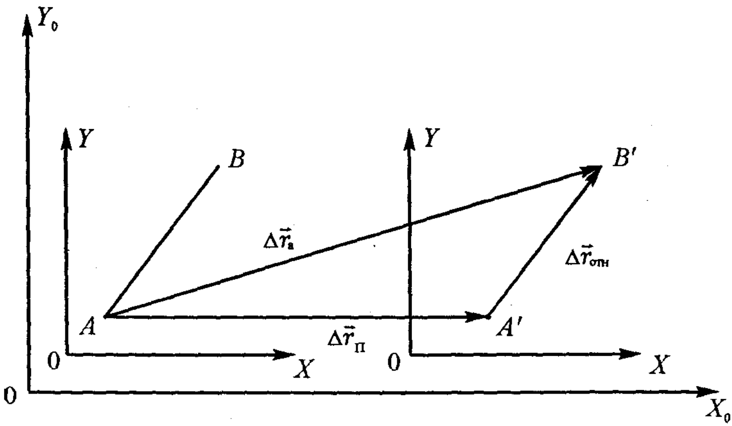

Рис. I.27

Человек движется по плоту равномерно и прямолинейно из точки A в точку B и тратит на это время Δt. За это время относительно плота человек переместился на расстояние $A'B'$, т.е. его относительное перемещение $\overrightarrow{A'B'} = \Delta\vec{r}_{отн}$. Перемещение плота за время Δt $\overrightarrow{AA'} = \Delta\vec{r}_п$. Это перемещение является переносным. Перемещение человека относительно неподвижной системы $X_0 0 Y_0$ является абсолютным, т. е. $\overrightarrow{AB'} = \Delta\vec{r}_{\text{а}}$.

Из рисунка видно, что абсолютное, относительное и переносное перемещения связаны между собой правилом сложения векторов

$$\Delta\vec{r}_{\text{а}} = \Delta\vec{r}_{\text{п}} + \Delta\vec{r}_{\text{отн}}.$$

Если мы это равенство разделим на Δt, то получим

$$\frac{\Delta\vec{r}_{\text{а}}}{\Delta t} = \frac{\Delta\vec{r}_{\text{п}}}{\Delta t} + \frac{\Delta\vec{r}_{\text{отн}}}{\Delta t}.$$

При равномерном и прямолинейном движении каждое из отношений представляет собой скорость соответствующего движения, а именно

$$\vec{v}_{\text{а}} = \vec{v}_{\text{п}} + \vec{v}_{\text{отн}},$$

т. е. вектор абсолютной скорости равен сумме векторов относительной и переносной скоростей.

Последнее равенство устанавливает связь между скоростями тела в различных системах координат и носит название *закона сложения скоростей.*

Векторное сложение скоростей проводится по правилу параллелограмма или треугольника (*рис. I.28*).

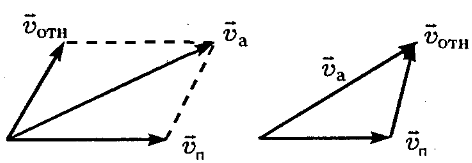

Рис. I.28

Полученный закон сложения скоростей справедлив не только для равномерных и прямолинейных, но и для любых движений. В этом случае под $\vec{v}_а$, $\vec{v}_п$, $\vec{v}_{отн}$ надо понимать мгновенные скорости тела (точки).

При решении задач на относительность движения прежде всего надо выбрать две системы координат. Одну из них принять условно за неподвижную. Далее нужно выяснить, какая скорость будет абсолютной, переносной и относительной. Затем записать закон сложения скоростей в векторной форме. После чего можно переходить к записи этого закона в проекциях на выбранное направление осей координат.

Следует отметить, что вовсе не принципиально, какую систему координат считать неподвижной. В ряде случаев удачный выбор неподвижной системы координат существенно упрощает решение задачи.

Задача I.18 Два поезда движутся навстречу друг другу. Величины их скоростей соответственно равны v_1 и v_2. Чему равна скорость первого поезда относительно второго $\left(v_{1-2}\right)$ и второго относительно первого $\left(v_{2-1}\right)$?

Решение. Свяжем неподвижную систему координат $X_0Y_0Z_0$, например, с Землей, а подвижную XYZ – со вторым поездом, движущимся со скоростью $\vec{v}_2$ (*рис. I.29*). Тогда движение второго поезда относительно Земли будет переносным. Движение первого поезда относительно Земли

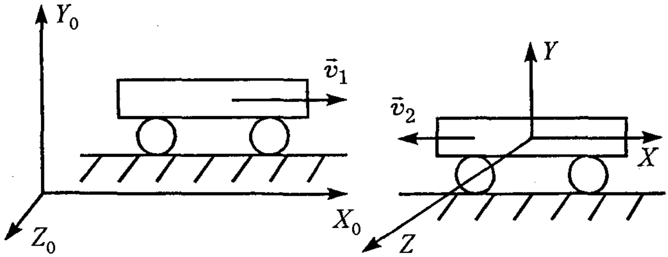

Рис. I.29

(неподвижной системы $X_0Y_0Z_0$) – абсолютным. Скорость первого поезда относительно второго поезда (относительно подвижной системы XYZ) является относительной. Следовательно, при таком выборе системы координат

$$\vec{v}_{\text{а}} = \vec{v}_1, \quad \vec{v}_{\text{п}} = \vec{v}_2, \; \vec{v}_{\text{отн}} = \vec{v}_{1-2}.$$

Закон сложения скоростей $\vec{v}_{\text{а}} = \vec{v}_{\text{п}} + \vec{v}_{\text{отн}}$ запишется так: $\vec{v}_1 = \vec{v}_2 + \vec{v}_{1-2}$. Отсюда относительная скорость $\vec{v}_{1-2} = \vec{v}_1 - \vec{v}_2$. Вспомним правило вычитания векторов (*рис. I.30*). Из рисунка видно, что в проекциях на ось $0X_0$ последнее уравнение запишется $v_{1-2} = v_1 - (-v_2) = v_1 + v_2$. Скорость первого поезда относительно второго равна сумме величин скоростей v_1 и v_2 и направлена в сторону оси $0X$. Чтобы определить скорость второго поезда относительно первого, удобно под-

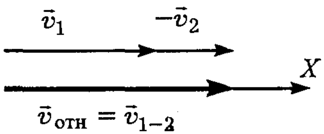

Рис. I.30

вижную систему координат связать с первым поездом, а неподвижную систему координат $X_0Y_0Z_0$ по-прежнему оставить связанной с Землей. Тогда $\vec{v}_а = \vec{v}_2$, $\vec{v}_п = \vec{v}_1$, $\vec{v}_{отн} = \vec{v}_{2-1}$. При таком выборе систем координат закон сложения скоростей будет иметь вид:

$$\vec{v}_2 = \vec{v}_1 + \vec{v}_{2-1} \quad \text{или} \quad \vec{v}_{отн} = \vec{v}_{2-1} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1.$$

Векторное вычитание скоростей изображено на *рис. I.31*. В проекции на ось $0X$ значение относительной скорости $v_{2\text{-}1}$ запишется:

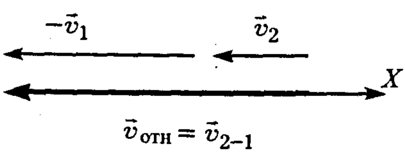

Рис. I.31

$$v_{2-1} = -v_2 - v_1 = -(v_2 + v_1).$$

Как видно, скорость второго поезда относительно первого равна сумме скоростей v_1 и v_2, но направлена в сторону, противоположную оси $0X$.

Задача I.19. По пересекающимся под углом α шоссейным дорогам движутся две автомашины со скоростями $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_2$ (*рис. I.32*). Определить величину и направление скорости первого автомобиля относительно второго $(\vec{v}_{1-2})$.

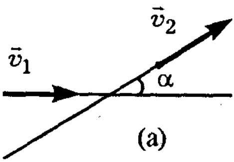

Рис. I.32

Решение. Неподвижную систему координат $X_0Y_0Z_0$ свяжем с Землей. Подвижную XYZ – с автомашиной, движущейся со скоростью $\vec{v}_2$. Тогда движение этой автомашины будет переносным.

В системе координат XYZ движение первой автомашины будет относительным, а ее движение относительно Земли – абсолютным, т. е. $\vec{v}_{а} = \vec{v}_1$, $\vec{v}_{п} = \vec{v}_2$, $\vec{v}_{отн} = \vec{v}_{1-2}$.

Пользуясь законом сложения скоростей, запишем $\vec{v}_1 = \vec{v}_2 + \vec{v}_{1-2}$ или $\vec{v}_{1-2} = \vec{v}_1 - \vec{v}_2$.

Вычитание векторов показано на *рис. I.32, б*. Вектор $\vec{v}_{1-2}$ является скоростью первой автомашины относительно второй. Величина этой скорости определяется по теореме косинусов

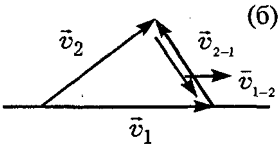

Рис. I.32

$$\left|\vec{v}_{1-2}\right| = \sqrt{v_1^2 + v_2^2 - 2v_1v_2\cos\alpha}\,.$$

Задача I.20 На тележке, движущейся прямолинейно с постоянной скоростью $\vec{v}_{т}$, установлена труба. Под каким углом к направлению движения тележки следует установить трубу, чтобы капли дождя, падающие вертикально относительно Земли со скоростью $\vec{v}_{к}$, пролетали через трубу, не задевая ее стенок?

Решение. Капли дождя не будут задевать стенок трубы, если вектор скорости капель относительно тележки $\vec{v}_{кт}$, а следовательно, и относительно трубы будет направлен вдоль стенок трубы.

Неподвижную систему координат $X_0Y_0Z_0$ свяжем с Землей, а подвижную XYZ – с тележкой. Тогда $\vec{v}_{а} = \vec{v}_{к}$, $\vec{v}_{п} = \vec{v}_{т}$, $\vec{v}_{отн} = \vec{v}_{кт}$, а закон сложения скоростей можно записать в виде

$$\vec{v}_К = \vec{v}_Т + \vec{v}_{КТ}, \text{ отсюда } \vec{v}_{КТ} = \vec{v}_К - \vec{v}_Т.$$

Векторное вычитание скоростей показано на *рис. I.33*. Следовательно, трубу нужно расположить вдоль вектора $\vec{v}_{КТ}$. Угол наклона трубы к горизонту определяется из треугольника скоростей $\mathrm{tg}\alpha = \dfrac{v_К}{v_Т}$.

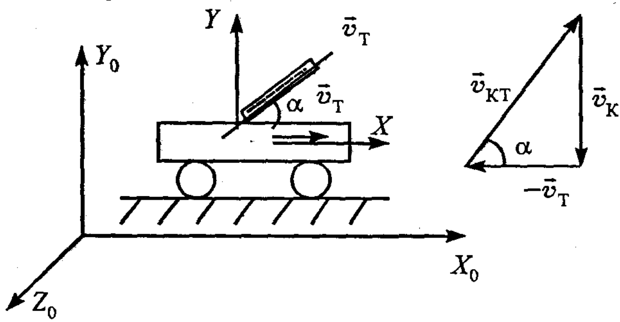

Рис. I.33

Задача I.21 Велосипедист едет с постоянной скоростью по прямолинейному участку дороги. Найти мгновенные скорости точек *A*, *B*, *C*, *D*, лежащих на ободе колеса, относительно Земли (*рис. I.34*).

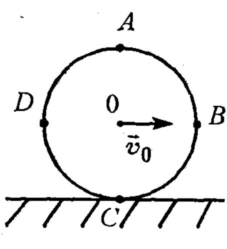

Рис. I.34

Решение. При движении колеса по Земле все его точки участвуют одновременно в двух движениях: вдоль Земли с постоянной скоростью $\vec{v}_0$ и вокруг оси, проходящей через точку 0, с линейной (касательной) скоростью $\vec{v}_Л$, направление которой меняется. Если колесо катится без проскальзывания, то $v_л = v_0$. (Попробуйте доказать это сами!)

Свяжем неподвижную систему координат $X_0Y_0Z_0$ с Землей. Подвижную систему координат XYZ свяжем с центром колеса. Эта система (*рис. I.35*) движется со скоростью v_0 относительно Земли. Тогда линейные скорости каждой точки обода колеса являются относительными скоростями, а мгновенные скорости точек A, B, C, D — абсолютными скоростями, которые вычисляются из закона сложения скоростей $\vec{v}_а = \vec{v}_п + \vec{v}_{отн}$. Для нашего случая $\vec{v}_а = \vec{v}_0 + \vec{v}_л$.

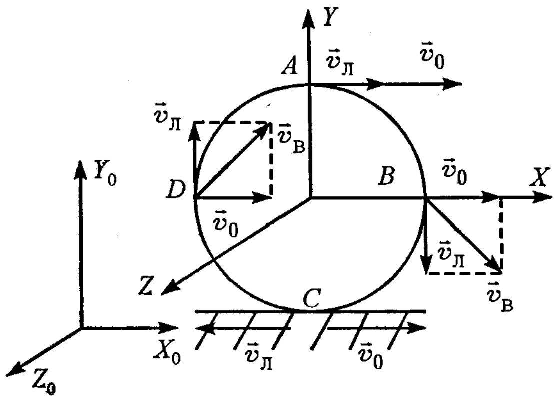

Рис. I.35

Тогда

$$\vec{v}_A = \vec{v}_0 + \vec{v}_{лA} \qquad |\vec{v}_A| = 2v_0;$$

$$\vec{v}_B = \vec{v}_0 + \vec{v}_{лB} \qquad |\vec{v}_B| = v_0\sqrt{2};$$

$$\vec{v}_C = \vec{v}_0 + \vec{v}_{лC} \qquad |\vec{v}_C| = 0;$$

$$\vec{v}_D = \vec{v}_0 + \vec{v}_{лD} \qquad |\vec{v}_D| = v_0\sqrt{2}.$$

Направление скоростей точек A, B, C, D указаны на рис. I.35.

При движении колеса без проскальзывания скорость точки касания колеса с Землей (точка C) всегда равна нулю. Поэтому движение колеса можно рассматривать как последовательность очень малых поворотов вокруг точек касания. Это легко понять, если окружность колеса представить в виде многоугольника с большим числом сторон, так как в каждый момент времени колесо (*рис. I.36*) вращается вокруг точки соединения сторон многоугольника. Точка C называется мгновенным центром вращения колеса. Введение мгновенного центра вращения часто позволяет легко решать некоторые задачи. Действительно, если считать, что колесо вращается вокруг мгновенного центра C, то радиус вращения точки A, например, равен $CA=2 \cdot 0A$, следовательно, скорость точки A будет в два раза больше, чем скорость точки 0, т.е. $v_A = 2v_0$,

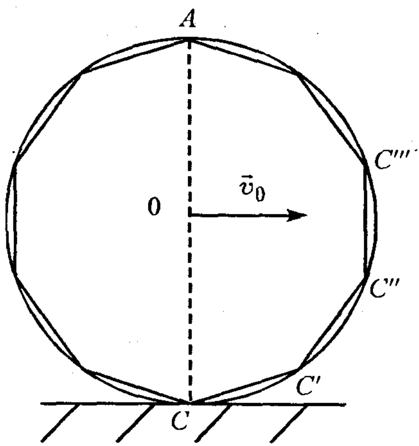

Рис. I.36

ибо скорость определяется по формуле $v_i = \omega r_i$. (Угловая скорость вращения для всех точек колеса одинакова.)