задачи, носит название *динамики*. Зная причины движения, можно предсказать, при каких условиях исследуемые тела будут находиться в состоянии равновесия. Поэтому часть механики, занятая изучением условий равновесия тел,— *статика* — логически следует за динамикой, и, как мы увидим, все законы статики действительно могут быть получены из законов динамики. Поскольку изучение равновесия тел является делом менее сложным, чем изучение движения, то не удивительно, что исторически многие вопросы статики были решены раньше, чем была разработана динамика.

Начиная со второй половины прошлого столетия, сложилась традиция предпосылать изложению динамики учение о движении вне зависимости от причин, вызывающих движение; эта формальная часть механики носит название *кинематики*.

§ 2. Система ориентировки. Материальная точка и ее перемещение

Механическое движение есть перемещение тел или частиц в пространстве с некоторой скоростью. В этом кратком определении скрыто немало трудностей. Для определения перемещения тела нужно сопоставлять положение тела с положением каких-либо других тел или хотя бы одного тела, которое совершенно условно считается неподвижным. Интересующее нас движение может выглядеть по-разному в зависимости от того, по отношению к какому телу мы будем определять перемещения движущегося тела. Например, движение педали велосипеда кажется велосипедисту происходящим по кругу, тогда как для постороннего наблюдателя оно кажется происходящим волнообразно. Далее, нужно располагать точными способами измерения расстояний и масштабами, которые пригодны не только для определения расстояний между взаимно неподвижными телами, но также и для измерений, осуществляемых при движении тел. Наконец, для определения скорости движения необходимо располагать точными способами измерения времени.

Во всех случаях, кроме чрезвычайно стремительных движений со скоростью, близкой к скорости света, пространственные и временны́е измерения (масштабы длин и времени) можно считать не зависящими от скорости движения. Более сложно дело обстоит, когда приходится анализировать движения, происходящие со скоростями, близкими к скорости света; экспериментальные факты показывают, что скорость света в вакууме является максимально возможной в природе скоростью движения (предельной скоростью); в связи с этим (как будет пояснено в т. III при изложении теории относительности) обнаруживается необходимость уточнения наших обычных представлений о пространственных и временны́х измерениях.

Условно неподвижные тела, по отношению к которым решено рассматривать перемещения движущегося тела, называют *системой отсчета* или *системой ориентировки*, или, что то же самое, *системой координат*.

В технических приложениях физики и в обыденной жизни систему координат чаще всего связывают с Землей, которую в таких случаях считают как бы неподвижной, хотя всем отлично известно, что Земля испытывает суточное вращение, обращается вокруг Солнца и движется вместе с Солнцем.

Положение рассматриваемой точки C часто определяют, указывая *радиус-вектор* $\mathbf{r}$, т. е. длину и направление отрезка прямой, проведенной из начала координат в точку C (рис. 1). Радиус-вектор имеет проекции на оси координат (*компоненты* по осям), равные координатам точки C (x, y, z); поэтому

$$r=\sqrt{x^2+y^2+z^2}. \tag{1}$$

(В данной книге векторы, в отличие от скаляров, набраны жирным шрифтом; числовые значения векторов набраны обычным шрифтом.)

Для точного определения перемещения тела нужно знать координаты всех частиц тела до и после перемещения. Однако если частицы тела сохраняют при перемещении неизменное расположение по отношению друг к другу и движутся параллельно друг другу, то, чтобы судить о перемещении такого тела, достаточно проследить за изменением координат одной какой-либо точки тела Это, конечно, вносит значительное упрощение в исследование движения тела. Аналогичное упрощение становится также возможным вообще во всех тех случаях, когда важна приближенная картина движения тела в целом (именно поступательного перемещения в пространстве, а не вращения вокруг какой-либо оси, проходящей через тело); что же касается движения частиц тела по отношению друг к другу, то может оказаться, что они нас или вовсе не интересуют, или же по характеру задачи допустимо их рассматривать особо. Такой подход к изучению движения уместен в особенности тогда, когда размеры тела весьма малы в сравнении с интересующими нас перемещениями тела.

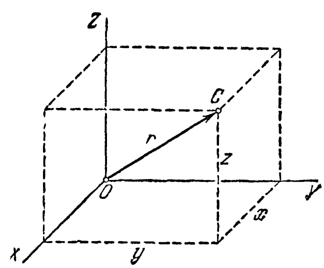

Рис. 1. Декартова система координат (*правовинтовая* система, принятая в данном курсе; если смотреть по направлению оси OZ, то поворот на 90° в сторону движения часовой стрелки приводит ось OX к совпадению с осью OY)

В указанном смысле и в указанных случаях можно отвлечься от формы тела и от движения его частиц или частей по отношению друг к другу и рассматривать тело как некую *материальную точку*. Из сказанного ясно, что в одних случаях под материальной точкой можно понимать мельчайшую частицу вещества, в других случаях — большое, даже космическое, тело. Главные особенности движения волчка нельзя было бы выявить, если бы вздумали рассматривать движение волчка как движение материальной точки; с другой стороны, в некоторых задачах небесной механики вполне допустимо движение Земли и других планет вокруг Солнца рассматривать как движение материальных точек.

С точки зрения кинематики движение материальной точки характеризуется: формой *траектории*, т. е. линии, которую точка описывает при своем движении, *длиной пути* l, отсчитываемой вдоль траектории, и *векторами скорости* и *ускорения*. Вспомогательную роль играет *вектор перемещения* $\mathbf{s}$, представляющий собой отрезок прямой, проведенной из какого-нибудь начального положения в конечное положение перемещающейся точки[1]).

При прямолинейном движении материальной точки вектор перемещения является отрезком траектории; при криволинейном дви-

---

[1]) Напомним, что все векторы складываются по тому же правилу, по которому производится сложение векторов перемещения. Если точка испытала перемещение s_1, а затем из нового начального положения s_2 и т. д. (рис. 2), то суммарное («результирующее») перемещение s будет представлять собой отрезок

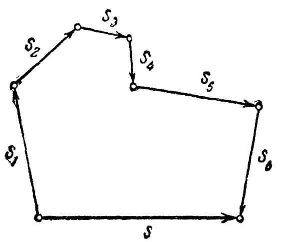

Рис. 2. Правило геометрического сложения векторов.

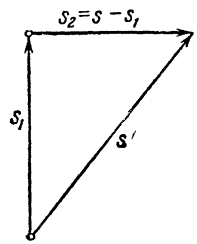

Рис. 3. Правило геометрического вычитания.

прямой, замыкающий многоугольник, сторонами которого служат складываемые перемещения, причем вектор этого результирующего перемещения следует считать направленным из исходного положения точки в ее конечное положение. Этот способ сложения называют *геометрическим сложением*, или правилом многоугольника.

Из этого правила, в частности, следует, что при сложении двух векторов результирующий вектор является диагональю параллелограмма, построенного на складываемых векторах как на сторонах.

Вычитание представляет собой действие обратное сложению. Поэтому, когда даны два вектора s и s_1 и требуется найти их геометрическую разность, задача решается как показано на рис 3, чтобы вектор s был действительно равен сумме s_1 и s_2 надо искомый вектор s_2 считать выходящим из конца вычитаемого вектора s_1.

жении он замыкает рассматриваемую часть траектории (рис. 4). Понятно, что для разных промежутков времени векторы перемещения имеют, вообще говоря, разную величину и разное направление. Для бесконечно малого промежутка времени вектор перемещения при криволинейном движении в пределе совпадает по направлению с направлением касательной к траектории движения (понятно, что речь идет о касательной в том месте, где в данный момент находится движущаяся материальная точка).

Мгновенное положение точки определяется ее координатами x, y, z; перемещение точки означает изменение ее координат; очевидно, что вся картина движения явится точно установленной, если мы будем иметь уравнения, позволяющие для любого момента времени t вычислить координаты точки:

$$x=f_1(t),\ y=f_2(t) \text{ и } z=f_3(t). \tag{2}$$

Такие уравнения называют *кинематическими уравнениями движения.*

В любой момент времени материальная точка занимает (при заданном движении) вполне о п р е д е л е н н о е положение в пространстве, изменяющееся со временем н е п р е р ы в н о. Соответственно кинематические уравнения какого угодно движения материальной точки должны *однозначно определять координаты точки* и состоять из так называемых *непрерывных функций.* Это утверждение, считающееся в классической механике самоочевидным, иногда называют *принципом точной локализации* [1]) (иначе «принцип полной детерминированности [2]) уравнений механики»).

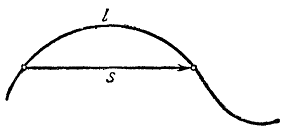

Рис 4. Вектор перемещения s для одного из интервалов времени при криволинейном движении; длина пути l отсчитывается вдоль траектории

С чисто кинематической точки зрения система ориентировки может выбираться произвольно, а траектория движущегося тела и остальные характеристики движения (скорость, ускорение) являются совершенно условными представлениями, имеющими конкретное содержание только по отношению к избранной системе отсчета. Очевидно, что движение тела C по отношению к телу K, с которым мы связали систему координат, будет иметь один характер, тогда как движение того же тела C по отношению к другому телу K' (если эта вторая система отсчета K' сама как-то движется по отношению к первой K) будет иметь совершенно иной вид. Так, какой-либо предмет, уроненный из окна равномерно движущегося вагона, падает по отношению к вагону по прямой, тогда как по отношению к железнодорожной насыпи он снижается по параболе.

---

[1]) От латинского localis — м е с т н ы й, свойственный только определенному месту.

[2]) От латинского determino — о п р е д е л я ю.

Таким образом, с кинематической точки зрения все характеристики движения относительны, и ни одна система отсчета не может считаться имеющей какую-либо предпочтительность перед другими системами отсчета. Такой чисто кинематический подход к анализу движений со строгой последовательностью развит в теории относительности (т. III). Теория относительности показывает, что указанный кинематический подход к исследованию движений при должных соглашениях о выборе масштабов длин и времени и при определенной трактовке тяготения обеспечивает совершенно точное о п и с а н и е движений при любых скоростях вплоть до близких к максимально возможной в природе скорости движения (скорости света).

Следует отметить, однако, что указанный чисто кинематический подход к анализу движений, хотя он и обеспечивает полную точность описания движений, с физико-философской точки зрения оставляет желать многого, так как при таком подходе мы отрываем описание движения от исследования причин возникновения движения, что в большинстве случаев означает отрыв описания движения от реального распределения масс. А это влечет за собой искусственное сужение нашего представления о движении до его относительных отображений. Объективная сущность движения, т. е. картина движения вне зависимости от произвольно избранной нами системы ориентировки, оказывается утраченной, как бы лишенной смысла. В чисто кинематическом подходе к анализу движений и в утверждении, что выбор системы ориентировки произволен, заключается принципиальный отказ от стремления раскрыть действительную, объективную, не зависящую от способов наблюдения истинную картину движения. Возведение ограниченной кинематической точки зрения в руководящий принцип равносильно превращению физического релятивизма[1]) в философский релятивизм, т. е. ведет к ложному заключению, что условные, относительные отображения движения не имеют за собой никакой (не зависящей от наших наблюдений) истинной картины движения.

Правильное решение затронутых вопросов состоит в признании, что наши относительные отображения движений (при различных системах ориентировок) при всей их математической равноценности физически неравноценны: одни ближе соответствуют истине, другие дальше от нее. Какая система ориентировки полнее раскрывает объективную картину движения, это определяется анализом причин движения, что в большинстве случаев связано с учетом реального распределения масс.

Так, когда кто-либо роняет камень в глубокий колодец и в то же время отбрасывает в сторону палку, которая, кувыркаясь, отлетает, то, если ограничиваться описанием движения камня по отношению к палке, можно, конечно, выбрать любые системы ориентировки, но

---

[1]) От латинского relativus — о т н о с и т е л ь н ы й.

несомненно, что физически, с точки зрения приближения нас к истинной картине движения, они окажутся неравноценными. Например, можно связать систему координат с палкой и получить хотя и сложное, но совершенно точное описание падения камня. Однако в этой системе ориентировки весь звездный мир будет представляться кувыркающимся вокруг палки, тогда как нет сомнения, что в действительности кувыркается палка. Мы несравненно ближе подходим к истинной картине движения, когда в данном случае принимаем в качестве системы ориентировки Землю.

§ 3. Элементарное перемещение. Векторы скорости и ускорения

Чтобы установить уточненное понимание скорости движения, проследим мысленно, как изменяются радиус-вектор и вектор перемещения при движении материальной точки по криволинейной траектории. На рис. 5 положение материальной точки в исходный момент времени t_0 обозначено C_0, а положения в моменты t и t' — C и C'. Геометрически складывая радиус-вектор $\boldsymbol{r}$ для момента времени t с вектором перемещения $\boldsymbol{s}$ за промежуток времени $(t'—t)$, получаем радиус-вектор $\boldsymbol{r}'$ для момента времени t'. Следовательно, вектор перемещения за любой промежуток времени равен геометрическому приращению радиуса-вектора: $\boldsymbol{s} = \boldsymbol{r}' - \boldsymbol{r}$. Следует обратить внимание на то, что, сопоставляя положения материальной точки с ее исходным положением C_0, мы можем в свою очередь рассматривать вектор $\boldsymbol{s}$ как геометрическое приращение перемещения материальной точки из ее исходного положения $\boldsymbol{s} = \boldsymbol{s}' - \boldsymbol{s}_0$ Поэтому, воспользовавшись общепринятой заменой слова «приращение» символом Δ («дельта»), можно написать

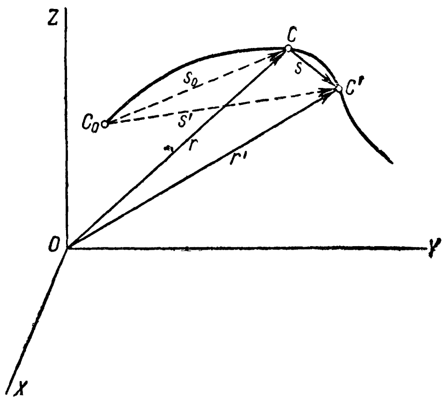

Рис. 5. Геометрические приращения радиуса-вектора $\boldsymbol{r}$ и вектора перемещения $\boldsymbol{s}$ совпадают.

$$\Delta \boldsymbol{s} = \Delta \boldsymbol{r} \qquad (3)$$

Если мы представим себе, что точки C и C', показанные на рис. 5, расположены бесконечно близко одна от другой, то получим элементарно малое, или просто *элементарное, перемещение*. Символ Δ может указывать большое или малое изменение величины. В слу-