

# ЧАСТЬ I. КЛАССИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

## Введение

Классическая механика — наука о законах движения и равновесия макроскопических материальных тел. При этом под механическим движением понимается простейшая форма движения — изменение положения тел относительно друг друга.

Механическое движение широко распространено в окружающем мире и имеет для человека первостепенное, жизненно важное значение наряду с другими формами движения. Оно тесно связано с тепловым движением (движением входящих в состав тел атомов и молекул), с электромагнитным и гравитационным полями. В частности, поля могут служить причиной, определяющей особенности механического движения, а механическое движение заряженных частиц — порождать поля.

О механическом движении говорят как о наиболее простом из всех видов движения материи. Однако простота механического движения означает лишь простоту описывающей его модели, отражающей интересующие нас стороны движения с достаточной для практических нужд полнотой. Механическое движение теряет свою простоту, если рассматривать механические объекты и явления со всеми деталями. Так, например, движение любого тела определяется взаимодействием и движением всех составляющих его ядер и электронов, атомов и молекул, однако строение тел и взаимодействие составляющих их частиц в механике не учитывают, заменяя тела простыми моделями.

Основная исходная модель всех материальных объектов в механике — *материальная точка*. Она заменяет материальный объект (тело или его часть) с пренебрежимо малыми по условиям задачи размерами, но конечной массой. Тела и их части моделируются геометрической точкой, которая наделяется массой, проявляющейся при взаимодействиях. Существенное свойство материальной точки состоит в том, что мы можем определить ее положение в пространстве и скорость (импульс) в каждый момент времени. При этом материальная точка движется по гладкой кривой линии — траектории движения.

Для изучения материальными точками заменяются как макроскопические тела целиком (например, Земля при изучении ее движения в Солнечной системе), так и отдельные части твердых, жидких, газообразных тел. Важно отметить, что, говоря о материальной точке как об объекте бесконечно малых размеров, имеют в виду физически бесконечно малый объект, т. е. объект конечных, притом, может быть,

очень больших размеров по отношению к человеческому телу, но достаточно малый по сравнению с другими размерами в задаче.

Более того, если обратиться к элементарным частицам — материальным объектам очень малых размеров (например, электроны имеют радиус меньше  $10^{-18}$  м, а возможно, что их радиус равен 0), то некоторые характеристики движения материальной точки — определенные значения координат и скоростей, определенная траектория движения — для них могут быть утрачены. В классической механике микрообъекты в таком случае не рассматриваются и материальными точками в классическом смысле не моделируются.

Заменяя несколько тел или части одного тела материальными точками, приходят к *системе материальных точек*. Других самостоятельных моделей материальных объектов классическая механика не имеет. К системе сводятся твердые тела с неизменными расстояниями между точками, сплошные вещественные среды. Движение тел и систем тел сводится к движению составляющих их материальных точек.

В механике используется определенная модель пространства и времени, а также *система отсчета*. Тела, относительно которых рассматривается движение, заменяются системой отсчета, назначение которой состоит в том, чтобы иметь возможность различить положения движущейся материальной точки в пространстве в любой момент времени. С помощью жестких масштабов (для измерения длин и углов) и часов (для измерения времени) можно в каждый момент времени  $t$  определить в некоторой системе отсчета положение материальной точки  $\vec{r}$ , т. е. кинематически описать ее движение, что выражается *кинематическим уравнением*:  $\vec{r} = \vec{r}(t)$ .

Следующий шаг описания механического движения — рассмотрение взаимодействия между материальными точками. Механика исходит из идеи *дальнодействия*: одна материальная точка действует в пространстве на другую, находящуюся от нее на расстоянии, и изменяет ее скорость без какого-либо посредника, заполняющего пространство между точками. Действие в пространстве передается мгновенно. Это действие характеризуется силой; сила вызывает *ускорение*.

Если сила задана, то ее источник во многих случаях может не рассматриваться (когда его движение нас не интересует). Так в механике возникает понятие *силового поля* — пространства, в каждой точке которого на материальную точку действует сила:  $\vec{F} = \vec{F}(\vec{r})$ .

Основная задача механики и заключается в *динамическом описании движения материальной точки*, устанавливающем связь между силовым полем, в котором движется материальная точка, и кинематическим уравнением ее движения. Эта связь отражена в дифференциальном уравнении:  $m\ddot{\vec{r}} = \vec{F}$ .

Почти все содержание классической механики, как будет видно из настоящего курса, связано с решением этого уравнения.

В механике можно выделить *кинематику*, где рассматриваются различные виды кинематического уравнения в различных системах координат, *динамику*, где решается динамическое уравнение для одной материальной точки, системы точек, твердого тела, *статику*, где разбираются случаи равновесия систем, т. е. движения (покоя) при отсутствии ускорений.

Так как все формы движения материи связаны с механическим движением, то механика оказывается в какой-то мере основой всей физики, лежит в ее фундаменте. Не случайно и исторически эта теория сложилась первой среди других физических теорий. Зародившись в древности, механика получила свое название в трудах Аристотеля (384—322 гг. до н. э.). Архимед (287—212 гг. до н. э.) дал теорию рычага. Галилей (1564—1642) считается основоположником динамики, ибо он установил ряд свойств равноускоренного движения, пришел к выводу о движении тел по инерции, о силе как причине ускорения. С его же именем связывают обращение к эксперименту в механике как методу установления объективно существующей в природе закономерности. Предшествовавший Галилею античный период характерен в науке дедуктивными рассуждениями, опирающимися не на опыт и не всегда на верные предпосылки.

Но основы современной механики заложил И. Ньютон (1643—1727), дав в вышедшей в 1687 г. книге «Математические начала натуральной философии» полную и строгую систему законов механики. Ньюトン определяет механику как «учение о движениях, производимых какими бы то ни было силами, и о силах, требуемых для производства каких бы то ни было движений». Смысл этого определения не утрачен до сих пор и отражается в прямой и обратной задачах механики. Создав принципы механики, Ньютон разрешил и большое число ее конкретных задач, в частности задачу о движении планет в поле силы тяжести Солнца.

Далее существенный этап развития расчетных математических методов в механике связан с именем Даламбера (1717—1783), предложившего простой и общий метод составления уравнения движения системы. Широкое обобщение аналитические методы получили в трудах Лагранжа (1736—1783), выдвинувшего принцип виртуальных перемещений. Расширение принципа виртуальных перемещений мы находим в трудах русского математика М. В. Остроградского (1801—1861). Вклад в динамику твердого тела внес С. А. Чаплыгин (1869—1947), а в аэrodинамику — Н. Е. Жуковский (1847—1921), который был также выдающимся педагогом, ратовавшим за ясное и четкое выделение физической сущности механических задач и их решение.

Основные результаты, составляющие теоретическую основу космонавтики в механике точки с переменной массой, получены И. В. Мещерским (1859—1935) и К. Э. Циолковским (1857—1935).

Классическая механика в настоящее время является вполне сложившейся фундаментальной теорией с четкой системой исходных положений, мощным и универсальным математическим аппаратом, с огромным богатством решений конкретных задач. Она развивается

и в наши дни. В частности, с помощью электронно-счетной техники успешно решаются разнообразные задачи, связанные с движением космических кораблей, задачи на расчет прочности конструкций и т. д.

Выше уже говорилось о роли механики как фундамента физики. Существенна ее связь с прикладными и техническими знаниями. Она является одной из научных основ многих областей современной техники. Можно назвать целый ряд дисциплин, базирующихся на механике: гидравлика, сопротивление материалов, кинематика и динамика машин и механизмов, строительная механика, баллистика, теория движения транспортных средств и т. д.

Наш курс посвящен фундаментальной части механики — динамике, ее основным положениям и законам. Для учителя физики средней школы особенно важна ее познавательная, эвристическая сторона, благодаря которой возможно проникновение с помощью механических законов и методов в сущность явлений, окружающих человека в природе и технике. Важно также значение ряда понятий и законов механики для других разделов физики. Эти обстоятельства в значительной мере определяют содержание и характер изложения материала в курсе.

Механика уже изучалась в курсе общей физики. В курсе теоретической физики изучение механики продолжается, т. е. решаются дополнительные задачи с использованием более последовательных математических методов, углубляется содержание понятий и законов, рассматриваются наряду с законами Ньютона другие общие уравнения и методы механики — уравнения Даламбера, Лагранжа, Гамильтона.

Классическая механика, как и другие фундаментальные физические теории, имеет хотя и широкую, но ограниченную определенными рамками область применимости. Уже говорилось, что это теория движения макроскопических тел: для отдельных микрочастиц ее законы часто утрачивают силу. Кроме этого, классическая механика — теория движения тел с небольшими скоростями по сравнению со скоростью света. В области микрочастиц классическая механика уступает место квантовой, а в области высоких скоростей — релятивистской теории.

## ГЛАВА I. КИНЕМАТИКА ТОЧКИ И ТВЕРДОГО ТЕЛА

Кинематика является вводным разделом механики, в котором математическими средствами описывается движение материальной точки или тела в пространстве. Основная задача кинематики состоит в том, чтобы задать или определить положение движущейся точки относительно некоторой системы отсчета в каждый момент времени. Важно отметить, что в кинематике выясняется лишь характер движения тел: их траектории, скорости, ускорения, зависимость координат точки или тела от времени, а причины движения — действующие на тела силы и их связи с кинематическими параметрами — не обсуждаются.