Э. Е. ЭВЕНЧИК

ПРЕПОДАВАНИЕ МЕХАНИКИ В КУРСЕ ФИЗИКИ СРЕДНЕЙ ШКОЛЫ

АКАДЕМИЯ ПЕДАГОГИЧЕСКИХ НАУК СССР

Э. Е. ЭВЕНЧИК

Преподавание механики в курсе физики средней школы

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ПРОСВЕЩЕНИЕ»
Москва · 1967

Рекомендовано к изданию ученым советом Научно-исследовательского института общего и политехнического образования АПН СССР

Эвенчик Э. Е.

Э 15 Преподавание механики в курсе физики средней школы. М., «Просвещение», 1967.

180 с. с илл. (Акад. пед. наук СССР).

Книга посвящена вопросу более современного подхода к преподаванию механики в школьном курсе. В ней обсуждается возможность введения в курс элементов релятивистской механики и рассматривается вопрос о границах применимости законов классической механики.

$\frac{6\text{-}5}{186\text{-}67}$ 531(07)

Предисловие

По методике преподавания механики — одного из самых старых разделов физики — имеется большая литература. Формированию основных механических понятий, таких, как масса, сила и др., а также преподаванию законов динамики, раздела статики посвящены специальные диссертационные исследования [1].

В 1958 г. АПН РСФСР была издана методика преподавания механики [2], в которой были обобщены достижения в преподавании этого раздела, накопленные к этому времени в практике преподавания и в исследованиях методистов. Можно считать, что целый ряд вопросов, связанных с преподаванием вопросов механики, с формированием ее основных понятий, нашел достаточно удачное решение. Однако общая задача, стоящая перед методикой преподавания физики,— дать более современное изложение ее основ — заставляет вновь обратиться к вопросу преподавания механики.

Сущность современного подхода к изложению физики четко сформулирована в аннотации к книге Л. Д. Ландау и А. И. Китайгородского «Физика для всех»: «...связь актуальных проблем физики с ее классическими понятиями, их взаимная обусловленность и неизбежные

---

[1] Я. Д. Гиленко, Изучение понятия массы в курсе физики средней школы, 1953; Ю. И. Соколовский, Понятие работы и закон сохранения и превращаемости энергии, 1950; М. С. Шимхович, Понятие силы и его изучение в разделе механики курса физики средней школы, 1955 и др.

[2] Л. И. Резников, Э. Е. Эвенчик, В. Ф. Юськович (под ред. проф. Б. М. Яворского), Методика преподавания физики в средней школе, т. I. Механика изд. АПН РСФСР, М., 1958.

противоречия, выводящие за рамки классических понятий,— все это составляет сущность современного подхода к изучению физики»[1].

Задача приближения школьного курса физики к современной науке решается не только (и не столько!) введением новых вопросов в содержание учебного материала, но и, главным образом, преодолением существующего в настоящее время в ее преподавании противопоставления и резкого разделения классической и современной физики, современной трактовкой основных классических понятий.

Анализируя сложившуюся к настоящему времени методику преподавания механики, нельзя не отметить, что этот современный подход к изучению одного из самых старых разделов физики представлен в ней не в должной мере.

Изучаемая в школе механика предстает перед учащимися как «истина в последней инстанции», ее законы и понятия — как абсолютно точные и универсально применимые. Учащимся нигде, ни в одном месте курса не показывают границ применимости ряда ее основных понятий и закономерностей.

Возрастные особенности и уровень развития учащихся VIII класса не позволяют изучать совместно вопросы классической и релятивистской механики, раскрыть законы классической механики как частный случай, как известную апроксимацию к более общим законам. Такая задача не ставится перед преподаванием механики и проектом новой программы курса физики.

Некоторые вопросы теории относительности предполагается изучать в конце курса физики, перед изучением физики атомного ядра.

Однако подготовка к изучению этих вопросов, определенная направленность мышления учащихся к восприятию ими в дальнейшем идей теории относительности должна быть осуществлена уже при изучении механики.

Это заставило нас вновь обратиться к методике преподавания механики, для того чтобы попытаться решить вопрос более современного ее изучения.

---

[1] Л. Д. Ландау и А. И. Китайгородский, Физика для всех, Физматгиз, М., 1963.

Особое внимание было обращено на развитие понятий относительности движения, систем отсчета, прослеженных на протяжении всего раздела.

В программу раздела введен принцип относительности Галилея, который находит применение при изучении многих вопросов.

В ряде мест курса показаны границы применимости основных понятий и закономерностей классической механики. Большое внимание уделено законам сохранения, причем рассмотрены все три закона сохранения, действующие в механике — закон сохранения импульса (количества движения), закон сохранения энергии и закон сохранения момента импульса. Законы сохранения импульса и энергии разобраны на такой важной динамической задаче, как столкновение тел, причем подобраны и такие, которые имеют значение при изучении физики ядра, так как они раскрывают один из методов идентификации элементарных частиц по их трекам в камере Вильсона.

В работе рассмотрены вопросы механики, которые связаны с освоением космического пространства — вычисление космических скоростей, выяснение понятий невесомости и перегрузок.

В данной работе далеко не с одинаковой полнотой разобраны все вопросы методики преподавания механики. Совершенно не затрагивались вопросы, изложение которых, с нашей точки зрения, не требует существенных изменений, а только указано их место в структуре раздела.

Более подробно изложены те основные идеи раздела, которые должны быть ведущими в изучении механики,— они прослежены на протяжении всей работы,— а также те новые вопросы, которые сектор обучения физике АПН СССР, разрабатывая содержание курса физики, считал необходимым ввести в программу по физике для средней школы.

Изложенная ниже методика преподавания механики проверялась в течение двух лет в школах 204 и 101 Москвы (учителя З. М. Грудская и В. И. Гершман), в школе 157 Ленинграда (учитель Н. А. Лазарева), в школе Памяти В. И. Ленина в Ленинских Горках (руководитель экспериментальной проверки Г. И. Батурина), в двух школах Комсомольска-на-Амуре (руководитель Д. Е. Рубинштейн). Всем этим товарищам, проделавшим большую работу по практической проверке разработанной методики, автор приносит благодарность.

Настоящая работа выполнена в секторе обучения физике ИОПО АПН СССР. Ее основные методические идеи неоднократно обсуждались сотрудниками сектора, которым автор приносит свою искреннюю благодарность за проявленный ими интерес к работе и помощь.

Автор.

Глава I

КИНЕМАТИКА

§ 1. Относительность движения. Системы отсчета

Формирование понятия о механическом движении невозможно без введения понятия о системе отсчета. Для описания движения тела, т. е. его перемещения в пространстве относительно каких-то других тел, с этими телами жестко связывается система отсчета: система координат и часы для отсчета времени. Как известно, в классической механике Ньютона постулируется существование избранной системы отсчета, которая является абсолютно покоящейся. Всякое тело, которое по отношению к этой системе покоится, находится в абсолютном покое, а движение тел по отношению к ней является абсолютным движением.

Гипотеза об абсолютном пространстве к концу прошлого века значительно укрепилась в связи с успехами концепции эфира. Движение по отношению к эфиру рассматривалось как абсолютное. И только в опытах Майкельсона и Морли, отрицательный результат которых показал невозможность определить движение относительно эфира, была развеяна иллюзия о существовании абсолютной системы отсчета.

Однако у Ньютона абсолютная система отсчета не связывалась с каким-либо неподвижным телом. Никакие попытки найти привилегированную систему координат, укрепленную на абсолютно неподвижном теле, не привели к положительным результатам.

В «Математических началах натуральной философии» Ньютон писал, что абсолютное пространство не может быть предметом наблюдения, наблюдаемыми могут быть лишь относительные положения тел: «...Ибо, возможно, не существует тела поистине покоящегося, относительно которого все положения и все движения других тел можно было бы отсчитать...»

Аргументы в пользу существования абсолютного пространства, остававшиеся непоколебленными вплоть до создания общей теории относительности (1916 г.), Ньютон видел в появлении так называемых сил инерции в неинерциальных системах отсчета, т. е. системах, движущихся с ускорением. Известно, что ускорение движения системы отсчета может быть определено абсолютным образом, т. е. независимо от тел, находящихся вне ее. Ускоренное движение не подчиняется галилеевскому принципу относительности.

Классический принцип относительности был сформулирован еще на начальном этапе развития механики. История открытия Коперника и ожесточенная борьба, которая развернулась вокруг него, была и историей открытия принципа относительности. Противники Коперника аргументировали тем, что мы, жители Земли, никак не ощущаем ее движения. В споре с церковниками и был сформулирован принцип относительности, утверждающий, что равномерное и прямолинейное движение системы тел не может быть обнаружено в результате наблюдения в ней механических явлений. С физической точки зрения это означает, что поступательное равномерное и прямолинейное движение системы не оказывает никакого влияния на механические процессы в системе. Все физические процессы, происходящие внутри такой системы, не зависят от того, покоится ли эта система как целое или движется равномерно и прямолинейно.

Это полностью относится и к Земле как системе отсчета. Равномерное и прямолинейное движение Земли (если пренебречь малой кривизной ее эллиптической траектории) не оказывает влияния на физические процессы, происходящие на ней. Поэтому ее равномерное и прямолинейное движение непосредственно не может быть замечено. Для этого нужно обратиться к телам, не участвующим в движении Земли. Точно так же и прямолинейное равномерное движение, например, парохода, если оно происходит совершенно плавно без толчков и ускорений, не оказывает влияния на происходящие на нем процессы: так же, как и в неподвижной системе, будут в нем двигаться тела — упругий удар бильярдных шаров на покоящемся и равномерно прямолинейно движущемся пароходах заканчивается разлетом этих шаров на одинаковые углы; брошенное вверх тело вернется в ту же точку, по отношению к пароходу, из которой оно было брошено, а не отстанет от движения парохода (не отклонится в сторону); тело, брошенное вдоль каюты парохода, достигнет противоположной стенки за то же время, независимо от направления движения плавучей лаборатории и т. д.

Нет необходимости перечислять все примеры и иллюстрации этого общего закона природы, который со всей отчетливостью сформулировал Галилей. Этот закон неразличимости покоя и равномерного прямолинейного движения и носит название принципа относительности Галилея. Подтверждаемый все новыми и новыми фактами, он вошел в физику так прочно, что стал необходимой составной частью научного мировоззрения.

И все-таки, как это ни парадоксально, принцип относительности Галилея до сих пор не изучается в средней школе.

Разбирая целый ряд механических явлений, легко и просто объясняемых на основании принципа относительности, в школьном курсе физики приводят более сложные объяснения на основе закона инерции и принципа независимости действия сил, обладающего значительно меньшей общностью. Отсутствие в разделе механики классического принципа относительности лишает преподавание механики возможности развивать одну из важнейших идей — относительность движения. Развитие этой идеи невозможно без изучения принципа относительности.

Недостаточное внимание к формированию представления об относительности движения в преподавании механики совершенно справедливо подвергалось критике в методической литературе [1]. Часто вопросу об относительности движения учителя уделяют внимание лишь на одном из первых уроков и ограничиваются анализом ряда тривиальных примеров, показывающих, что всякое движение и покой являются относительными. Далее идея относительности движения не развивается в кинематике,

[1] М. И. Блудов, К изучению систем отсчета на уроках физики, «Физика в школе», 1961, № 4. Л. А. Иванова, К изучению относительности механического движения в курсе физики средней школы, там же.

и о ней полностью забывают при изучении динамики и других разделов механики. Между тем из принципа относительности вытекает ряд положений, которые должны быть усвоены учащимися. И прежде всего то, что такие понятия, как пространственные координаты точки, траектория и скорость, являются понятиями относительными, они зависят от выбора системы отсчета.

Однако из принципа относительности вытекает также и то, что некоторые величины являются абсолютными (инвариантными в отношении различных систем отсчета). Например, расстояние между телами не зависит от того, по отношению к какой системе отсчета мы рассматриваем движение этих тел. То же относится и к промежуткам времени между событиями. Ускорения, если мы ограничиваемся рассмотрением только инерциальных, или так называемых галилеевых, систем, движущихся равномерно и прямолинейно друг относительно друга, тоже являются величинами абсолютными. Ведь если тело движется с некоторым ускорением в какой-то системе отсчета, то его ускорение останется тем же и в другой системе, движущейся равномерно и прямолинейно относительно первой; поскольку сама система движется без ускорения, то изменение скорости, которое тело получило в первой системе, останется таким же и по отношению ко второй системе. Теннисный мяч, получивший некоторое ускорение под действием удара ракетки относительно теплохода, будет иметь то же ускорение относительно берегов, так как поступательное равномерное движение теплохода не влияет на изменение скорости мяча [1]. В то же время скорость теннисного мяча — относительная величина — будет различна в каждый момент времени в этих системах отсчета.

Мы видим, что принцип относительности по своему содержанию глубоко диалектичен: наряду с утверждением относительности ряда величин и понятий он содержит и утверждение об абсолютности (инвариантности) ряда других величин. Кроме того, в принципе относительности содержится и нечто большее — утверждение об абсолютности законов динамики: во всех инерциаль-

[1] Инвариантность ускорения в отношении различных инерциальных систем отсчета легко устанавливается из преобразований Галилея.

ных системах отсчета, независимо от их относительной скорости, все механические явления протекают одинаково, т. е. все три закона Ньютона одинаково справедливы. В этом именно и заключается равноправие этих систем отсчета. Утверждение, что все явления протекают одинаково, означает одинаковость проявления всех законов. В то же время ряд величин и понятий будут, конечно, различны. Явления будут выглядеть в разных системах по-разному, так как в них неодинаковы начальные условия: траектория воды, падающей в движущемся равномерно и прямолинейно поезде, будет по отношению к поезду отвесная прямая, а по отношению к полотну дороги — парабола.

Это и понятно, так как начальные условия в этих системах различны: в поезде тела уже имеют относительно полотна дороги определенно направленную начальную скорость. *Инвариантны в инерциальных системах именно все законы, а не все величины, из которых многие относительны.*

При изучении кинематики, пока речь идет об описании движения, мы не можем установить никакого принципиального различия между разными системами отсчета, все они равноправны. Только в динамике, при изучении законов движения, обнаруживается принципиальное различие между некоторыми системами отсчета и преимущества одного класса систем по сравнению с другим. Вопрос о том, как выбрать эти обладающие преимуществами системы отсчета, будет выяснен дальше. Там же при анализе преподавания некоторых вопросов динамики мы обсудим, как дать определение инерциальных систем отсчета и проанализируем вопрос о том, как изложить учащимся принцип относительности Галилея, формулировка которого может быть дана, конечно, только при изучении динамики. Однако уже при изучении кинематики идея относительности механического движения должна быть развита со всей доступной в этом разделе полнотой.

Уже на первых уроках, на которых дается определение механического движения, нужно выяснить прежде всего, что сами по себе слова «тело движется» абсолютно бессодержательны, пока мы не укажем тело, которое по определению считаем неподвижным. Разъясняют учащимся, что выбор тела отсчета произволен. При его выборе руководствуются лишь удобством наблюдения и вычислений, которые позволяют детально изучить интересующее нас движение. Так, при изучении движения автомобиля удобно в качестве тела отсчета выбрать Землю (или тела, неподвижные относительно нее). Выбор же для этой цели Солнца приведет к необходимости учета движения Земли вокруг Солнца и ее вращения вокруг оси, что очень усложнит исследование. Между тем автомобиль используется для перемещения по земле, движение которой при этом несущественно. Но зато при изучении движения Земли, планет, искусственных спутников и т. д. удобнее всего в качестве тела отсчета принять Солнце. При изучении движения всей солнечной системы или движения космических кораблей в глубины Вселенной в качестве тела отсчета удобно брать звезды.

Введя систему отсчета, на ряде примеров далее выясняют, что движение любого тела описывается по-разному в различных системах отсчета.

Например, по отношению к движущемуся вагону падающее в нем яблоко совершает прямолинейное движение, а по отношению к перрону — криволинейное; шарик, катящийся по желобу вдоль радиуса вращающегося колеса, относительно колеса совершает прямолинейное движение, а относительно земли — криволинейное.

Если провести по линейке мелом черту по диаметру быстро вращающегося диска (рис. 1), то получится спираль, изображающая траекторию куска мела по отношению к диску, тогда как траектория движения мела по отношению к линейке — прямая линия. Можно предложить учащимся самим разобрать, например, какова траектория точки обода катящегося по рельсам колеса относительно наблюдателя, находящегося в вагоне, и относительно полотна железной дороги. Такие примеры, разобранные в достаточном количестве, позволят учащимся убедиться в том, что траектория движения — понятие относительное, зависящее от системы отсчета. Для формирования этого понятия важно, чтобы с учащимися были разобраны приме-

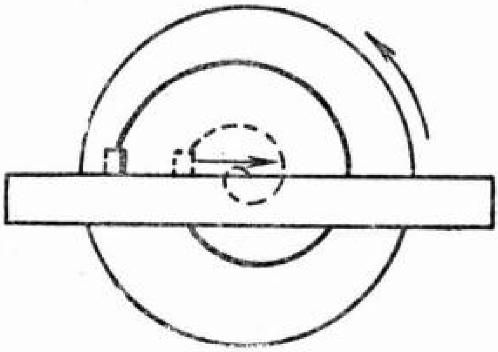


Рис. 1

ры, показывающие, что для удобства следует в ряде случаев в качестве системы отсчета брать не землю, а какие-нибудь тела, движущиеся относительно нее. Это поможет развеять иллюзию, присущую мышлению учащихся (и не только учащихся), что «истинное» движение — это движение относительно земли, а движение относительно других систем отсчета — это движение «кажущееся».

Интересный пример такой абсолютизации Земли как системы отсчета приводит В. П. Смилга, цитирующий одного из авторов, критикующих якобы философскую несостоятельность теории относительности на том основании, что в ней признается относительным понятие траектории.

Не понимая того, что он «воюет», вообще говоря, не с теорией относительности Эйнштейна, а с механикой Ньютона, этот автор писал: «Разговоры об относительности траектории нелепы, потому что, например, молния, которая наблюдателю в поезде представляется падающей по косой линии, а наблюдателю на Земле отвесно вниз, на земле, ударив в песок, оставляет вертикальный след от удара в виде вертикально торчащего «чертова пальца» — спеченного песка»[1]. По этому поводу В. П. Смилга пишет: «Самое забавное даже не то, что нашим воителем была атакована классическая механика Ньютона,— дело в том, что подобный опыт (правда, не с молнией, а с дождем) как раз прекрасно иллюстрирует относительность траектории. Все, очевидно, сотни раз наблюдали косые следы дождя на вагонных окнах. Чисто же психологически рассуждения нашего «ученого соседа» заслуживают особого внимания, потому что показывают, как интуитивно и бессознательно мы возводим систему отсчета, связанную с землей, в ранг абсолютной. В самом деле, отвечая на вопрос, что же движется на «самом деле» — «поезд» относительно земли или «земля» относительно поезда,— невольно хочется сказать: «Конечно, поезд»... По существу все недоумения связаны только с чисто психологическим фактором — бессознательным желанием цепляться за привычное».

Вот почему уже на первых уроках по кинематике необходимо разобрать с учащимися достаточное число при-

[1] Цитируется по статье В. П. Смилги в книге «Физика: близкое и далекое», изд. «Знание», М., 1963, стр. 26—27.

меров, в которых соображения удобства требуют принять в качестве системы отсчета как раз не Землю, а движущиеся относительно нее тела. В следующем параграфе мы разберем ряд таких примеров, связанных с выяснением относительности понятия скорости и сложением скоростей.

Формирование у учащихся понятия об относительности движения и его кинематических характеристик, в частности траектории, требует не только анализа ряда примеров, но и постановки демонстрационного эксперимента, а также решения ряда экспериментальных задач.

Относительность траектории легко продемонстрировать в классе при помощи длинной вертикально поставленной стеклянной трубки с вязкой жидкостью, в которой падает шарик (рис. 2). Движение шарика относительно трубки будет равномерное, по отвесному направлению вниз; если же мы одновременно будем двигать трубку вдоль классной доски, отмечая мелом положения шарика через некоторые промежутки времени, то мы можем по этим точкам начертить траекторию шарика относительно классной доски.

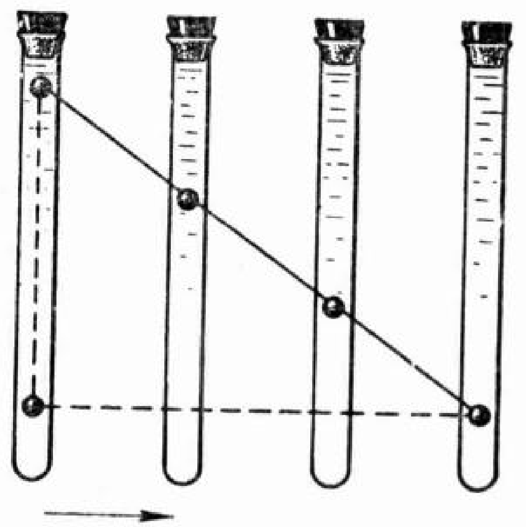


Рис. 2

Хороший пример экспериментального задания по выяснению относительности траектории капли дождя для наблюдателя внутри вагона и вне его приведен в указанной статье М. И. Блудова. Предлагают учащимся вырезать из плотной бумаги два одинаковых прямоугольника, на одном из них провести жирную наклонную черту (след капли на оконном стекле), а в другом сделать узкую вертикальную прорезь. Наложив лист с прорезью на лист с чертой, медленно перемещают последний горизонтально. В прорези видно, как черное пятнышко (капля) движется вертикально.

Можно предложить учащимся выполнить такое задание: перемещать угольник одним из его катетов вдоль линейки, положенной на бумагу, как по направляющей (рис. 3). Если при этом карандашом проводить вдоль вертикального катета, то на бумаге получится наклонная траектория; относительно же угольника траектория — вертикальная линия.

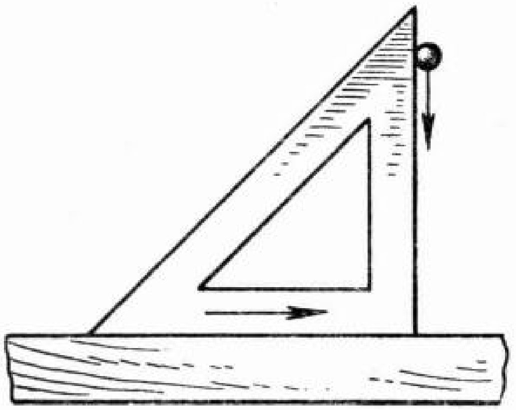


Рис. 3

Кроме относительности траектории, на первых уроках по кинематике полезно разобрать вопрос и об относительности координат движущейся материальной точки.

Опыт преподавания показывает, что несложные рассуждения о галилеевых преобразованиях координат легко воспринимаются учащимися. Двигаясь по определенной траектории в выбранной системе отсчета, материальная точка последовательно занимает различные положения в пространстве. Положение точки в пространстве может быть в данной системе отсчета охарактеризовано значением трех координат. Разумеется, в разных системах отсчета координаты одной и той же точки в один и тот же момент времени будут различными. Если, например, координаты тела, находящегося на столике не-

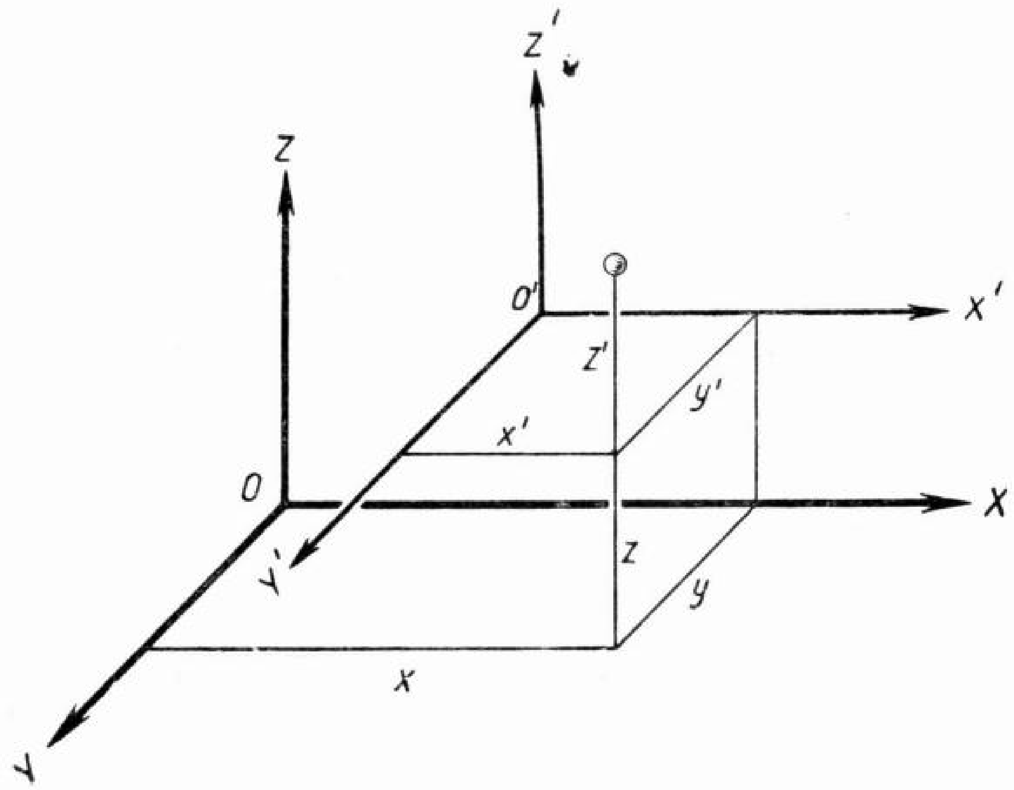


Рис. 4

подвижного вагона, в системе *земля* будут x, y, z (рис. 4), то в системе отсчета *поезд* они будут уже x', y', z', причем, как видно из рисунка, $x'=x-x_0$; $y'=y-y_0$; $z'=z-z_0$, где x_0, y_0, z_0 — координаты начала отсчета O' вагона относительно земли[1].

Рассмотрев относительность траекторий и координат, надо так же подробно на конкретных примерах рассмотреть относительность понятия скорости. Закон сложения скоростей, вытекающий из относительности этого понятия, мы рассмотрим в следующем параграфе.

§ 2. Сложение скоростей

Классический закон сложения скоростей непосредственно связан с относительностью понятия скорости. Отметим прежде всего, что из-за неточностей формулировок, допускаемых в ряде элементарных учебников, при применении этого закона в практике преподавания возникают некоторые ошибки.

Часто можно встретить утверждения о том, что материальная точка одновременно совершает два различных движения. При этом о системе отсчета ничего не говорится, следовательно, предполагается, что оба движения совершаются в одной и той же системе отсчета. (Обычно в практике преподавания, когда не указывается система отсчета, имеется ввиду система, связанная с Землей.) Причем если еще при выводе закона сложения скоростей на примере двух прямолинейных и равномерных движений указывается, что эти движения совершаются относительно различных систем отсчета, то

---

[1] Несколько более сложные рассуждения, приводящие к выводу формул преобразования Галилея для координат, когда одна из систем отсчета движется относительно другой, имеет смысл давать учащимся только в классах, с хорошим математическим развитием. В этих классах учащимся можно объяснить, что вектор скорости может быть задан тремя его компонентами по координатным осям — v_x, v_y, v_z. Тогда, предположив, что, например, система *поезд* движется со скоростью v_x вдоль оси x, легко найти координаты тела в любой момент времени в другой системе, например, в системе *земля*:

$$x = x_0 + v_x t + x';$$

$$y = y_0 + y';\ \ z = z_0 + z'.$$

при переходе к изучению криволинейных движений об этом совершенно забывают.

Выясним, что означает утверждение, что материальная точка одновременно совершает два различных движения в одной и той же системе отсчета. Как известно, положение точки в данной системе отсчета может быть определено тремя пространственными координатами или, что нам сейчас удобнее, радиусом-вектором r.

Если точка участвует одновременно в двух различных движениях, то радиус-вектор получает сразу два различных приращения: $\Delta\bar{r}_1$ и $\Delta\bar{r}_2$. Тогда в один и тот же момент времени положение точки определится двумя векторами: $\bar{r}_1=\bar{r}+\Delta\bar{r}_1$ и $\bar{r}_2=\bar{r}+\Delta\bar{r}_2$, что означает одновременное нахождение точки в двух различных местах пространства. Нелепость последнего утверждения совершенно очевидна. Следовательно, исходное положение о том, что точка может одновременно участвовать в двух различных движениях в одной системе отсчета, неправильно.

Разъяснение этого вопроса встречается в ряде работ по механике. «Одно движение было задано двумя движениями: такое задание представляет не более как только математический прием, математический способ рассмотрения вопроса... Когда мы говорим: «Тело имеет сразу два движения», то фраза эта, если понимать ее буквально, заключает в себе нелепость» [1].

«Если указано движущееся тело и система отсчета, то по отношению к этой системе отсчета движение, раз оно определено, может быть только единственным: не может тело одновременно занимать два различных положения по отношению к одной и той же системе отсчета. Но движение твердого тела мы можем рассматривать по отношению к различным системам отсчета; движущееся тело может одновременно двигаться относительно различных систем отсчета...» [2].

Что собой представляет криволинейное движение тела и как его следует трактовать в средней школе, будет предметом нашего обсуждения несколько позже. Здесь же для нас важно другое — выяснить, при каких условиях возникает задача сложения движений.

---

[1] Л. Кирпичев, Начала механики, 1871, стр. 58.

[2] И. Н. Веселовский, Курс механики, ГТТЛ, 1951, стр. 245—246.

Совершенно очевидно, что в одной системе отсчета происходит лишь одно движение материальной точки.

Однако движение любого тела происходит по-разному в разных системах отсчета. Как уже было выяснено, в разных системах отсчета телу соответствуют различные координаты, траектории, скорости.

Представим себе, что некоторая материальная точка движется по отношению к какой-то системе отсчета (например, шарик движется по канавке вдоль линейки), которая сама перемещается по отношению к другой системе отсчета (к поверхности стола), которую мы считаем неподвижной.

Движение первого тела (шарика) по отношению к движущейся системе отсчета называют относительным; движение перемещающейся системы отсчета (линейки) по отношению к той, которую мы считаем неподвижной, называют переносным.

Но шарик, движущийся относительно линейки одновременно движется относительно стола. И это движение относительно системы отсчета, которую мы считаем неподвижной, принято называть результирующим, полным или абсолютным движением. Условность всех этих названий совершенно очевидна.

Легко видеть, что если нам известно относительное перемещение шарика, то его перемещение относительно стола можно найти сложением относительного и переносного перемещений. Другими словами, изменение системы отсчета, переход от одной системы к другой, приводит к задаче сложения перемещений.

От сложения перемещений легко перейти к сложению скоростей, так как скорости мы определяем как отношения перемещений ко времени, в течение которого они произошли.

Здесь нужно лишь иметь в виду следующее. Относительное движение — это может быть как движение точки, так и тела. Переносное движение — это движение системы отсчета, т. е. некоторого тела. Если система совершает поступательное движение, то все ее точки движутся одинаково. В общем же случае переносной скоростью точки называют скорость той точки подвижной системы отсчета, в которой в данный момент находится движущаяся относительным движением материальная точка. Однако если мы ограничимся рассмотрением только поступательного движения системы отсчета, то этой оговорки можно не делать.

Итак, сложение скоростей тела, участвующего одновременно в двух движениях относительно различных систем отсчета состоит в изменении системы отсчета, в пересчете скорости от одной системы к другой. Формула этого пересчета (преобразование Галилея)

$$\bar{v}_{\text{а}} = \bar{v}_{\text{о}} + \bar{v}_{\text{п}}$$

и представляет собой закон сложения скоростей в классической механике.

Эта формула выражает математически тот уже неоднократно отмечавшийся факт, что координаты тела и его скорость относительны, они различны в различных системах отсчета. Формулы преобразования Галилея являются «словарем», позволяющим переходить от одной системы отсчета к другой.

Итак, в одной системе отсчета происходит лишь одно движение материальной точки и в каждый данный момент существует лишь один вектор скорости этой точки.

Конечно, любой вектор можно представить как сумму векторов, являющихся его составляющими по координатным осям. Всякий вектор скорости можно представить как векторную сумму двух или более составляющих скоростей. Например, при $z=0$ две составляющие вектора однозначно определяют величину и направление скорости в плоскости xy.

Составляющая вектора вдоль определенной оси представляет собой скорость проекции тела на данную ось. Ее можно наглядно представить себе как скорость тени движущегося тела.

Две составляющие скорости, направленные вдоль осей x и y, представляют собой скорости двух теней движущегося тела, отбрасываемых на два экрана, расположенные перпендикулярно осям x и y.

Зная скорости теней на двух экранах, мы однозначно определим величину и направление скорости тела на плоскости:

$$\bar{v} = \bar{v}_x + \bar{v}_y.$$

Смысл классического закона сложения скоростей должен быть достаточно четко разъяснен учащимся.

Для этого достаточны те традиционные примеры, на которых обычно выводится закон сложения скоростей: человек перемещается относительно палубы теплохода, а теплоход перемещается относительно берегов.

Однако для правильного усвоения вопроса при анализе этого примера следует: а) четко разъяснять, что движение человека одновременно осуществляется в двух различных системах отсчета — в системе *теплоход* и в системе *берега,* по отношению к каждой из систем данное тело совершает одновременно лишь одно движение; б) формулируя задачу о сложении скоростей, нужно предложить учащимся вычислить скорость тела по отношению к системе отсчета S, если эта скорость задана в системе отсчета S_0, которая сама движется с некоторой скоростью v_0 по отношению к системе S. Решение этой задачи приведет к сложению скоростей и его физический смысл выяснится естественным образом.

То же самое относится и к параболическому движению тел, брошенных горизонтально и под углом к горизонту, или к падению тела, например, в движущемся поезде.

Относительно земли тело совершает одно движение и в каждый данный момент обладает одной скоростью. Однако можно рассматривать движение, например, груза, сброшенного с самолета, относительно самолета как системы отсчета, а затем, зная скорость самолета относительно земли, определить движение груза (его траекторию и скорость) относительно земли [1].

Решение ряда задач помогает учащимся достаточно глубоко осознать и усвоить этот вопрос, весьма важный для понимания и развития идеи относительности движений. Приведем примеры таких задач.

1. Пловец желает переплыть реку по кратчайшему расстоянию из точки A в точку B. Если известны скорость пловца относительно воды v_1, скорость течения воды относительно берегов v_2 и ширина реки d, то под каким углом α к прямой AB он должен плыть и сколько времени займет переправа?

Проведем анализ задачи.

---

[1] Подробнее методика изучения этого вопроса будет рассмотрена в параграфе о параболическом движении тел.

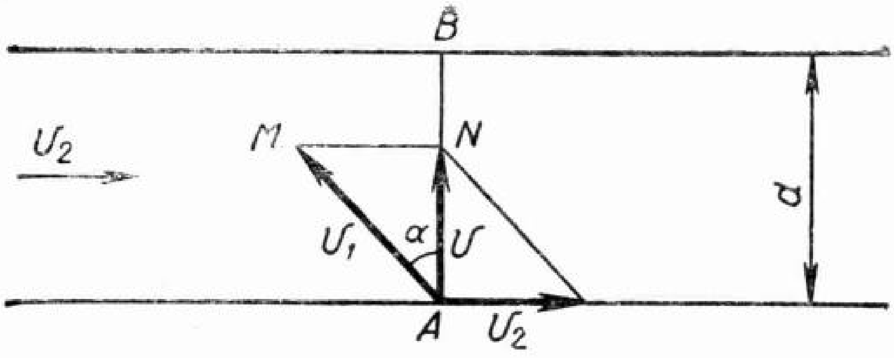


Рис. 5

Итак, известна скорость пловца v_1 относительно воды, а для решения поставленного в задаче вопроса нужно определить скорость пловца v относительно другой системы — *берегов*, если известна еще скорость течения реки v_2, т. е. скорость первой системы отсчета. Для этого нужно к скорости v_1 прибавить скорость v_2. Результирующая скорость v и будет искомой скоростью пловца относительно берегов.

Направление скорости v в системе *берегá* задано тем, что переправа должна происходить по кратчайшему пути, т. е. эта скорость должна быть направлена от A к B (рис. 5).

Так как скорость v равна геометрической сумме скоростей v_1 и v_2, т. е. равна диагонали параллелограмма, построенного на этих скоростях, то, следовательно, скорость v_1 должна быть направлена под некоторым углом α к направлению AB. Пловец должен плыть под этим углом α вверх по течению.

Этот угол мы получим, построив параллелограмм (или треугольник) скоростей, в котором диагональ равна результирующей скорости, т. е. скорости пловца v относительно берегов, а одна из сторон — скорости v_1 относительно воды.

Решение. Из ΔAMN находим:

$$\sin\alpha = \frac{v_2}{v_1}.$$

Скорость движения относительно берега $v=\sqrt{v_1^2-v_2^2}$, а время t, которое потребуется для переправы,

$$t = \frac{d}{\sqrt{v_1^2 - v_2^2}}.$$

Задача могла бы быть поставлена иначе, если бы требовалось найти кратчайшее время для переправы через реку. В этом случае пловец должен был бы держать курс прямо в точку B, т. е. направление скорости относительно воды должно быть перпендикулярно берегу (рис. 6).

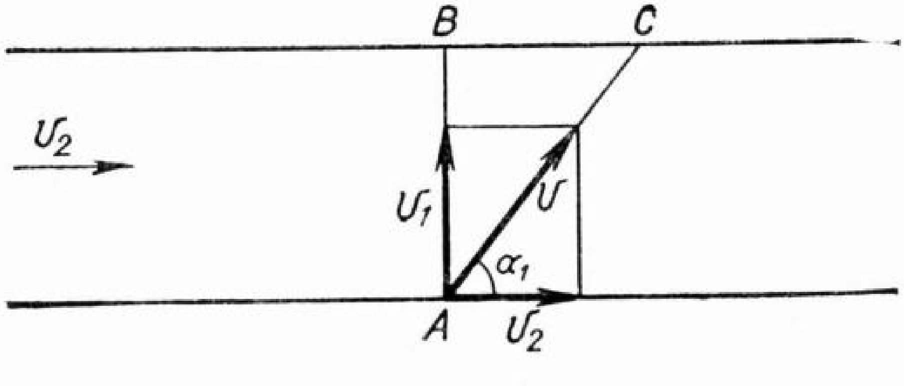


Рис. 6

В этом случае скорость пловца относительно берегов v будет направлена вниз по течению под углом α_1 к берегу. Она будет равна:

$$v=\sqrt{v_1^2+v_2^2},$$

а путь, пройденный пловцом с этой скоростью, будет равен AC.

Причем

$$\frac{AC}{AB}=\frac{v}{v_1},$$

т. е. этот путь больше пути в спокойной воде во столько раз, во сколько скорость абсолютного движения больше скорости в спокойной воде. В этом случае время переправы t будет равно $\frac{d}{v_1}$, т. е. времени переправы в спокойной воде.

Пользуясь координатным методом, эту задачу можно решить еще и другим способом.

Начало прямоугольной системы координат совместим с точкой, в которой пловец входит в воду. Ось Ox направим вдоль берега по течению, ось Oy — перпендикулярно к берегу. Предположим, что скорость пловца v_1 составляет неизвестный нам угол α с осью Ox.

Составляющие этой скорости по осям координат будут: $v_{1x}=v_1\cos\alpha$ и $v_{1y}=v_1\sin\alpha$. Тогда уравнение движения для проекции на ось Oy будет: $y = v_1 \sin\alpha \cdot t$. Пловец попадает на другой берег при $y = d$. Следовательно, время переправы $t = \frac{d}{v_1 \sin\alpha}$. Оно будет минимальным, когда $\sin\alpha$ максимален, т. е. при $\alpha = 90°$. Следовательно, скорость пловца v_1 должна быть направлена перпендикулярно берегу и кратчайшее время переправы $t = \frac{d}{v_1}$.

Как мы уже отмечали, для жителей Земли психологически вполне понятна тенденция абсолютизировать в качестве системы отсчета землю или тела, жестко связанные с ней. Этому способствует не только то, что в обыденной жизни мы рассматриваем происходящие вокруг нас движения по отношению к земле (или предметам, с ней скрепленным), но и то, что мы в школе чаще всего решаем такие задачи, в которых требуется найти скорости относительно земли.

Для того чтобы не происходило такой абсолютизации Земли как системы отсчета в сознании учащихся, желательно решать и такие задачи, в которых проще всего находится ответ при пересчете скорости в систему, движущуюся относительно земли. При решении таких задач затруднения у учащихся возникают часто именно из-за их стремления всегда определять скорость относительно земли.

Приведем пример. При решении задачи на нахождение угла, который образует с вертикалью след дождевой капли на стекле вагона, падающей со скоростью v_1, если поезд движется со скоростью v_2, у многих учащихся наблюдается следующая ошибка. Складывают скорость v_1 капли относительно земли со скоростью v_2 поезда относительно Земли и получают, естественно, совсем не то направление следа (рис. 7), который они, находясь в движущемся поезде, наблюдают на окнах вагона.

Ошибка происходит вследствие того, что учащиеся в качестве неподвижной системы отсчета, по отношению к которой они привыкли находить результирующую скорость, считают и в этом случае землю. А в данном случае надо было пересчет движения вести из

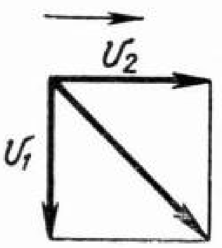


Рис. 7

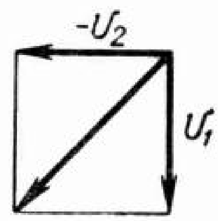


Рис. 8

системы *земля* в систему *поезд,* т. е. нужно находить результирующую скорость относительно поезда. Капли падают со скоростью v_1 относительно земли. Так как определение скорости ведется относительно системы *поезд,* то именно его мы считаем неподвижным, а землю — движущейся со скоростью $-v_2$ (рис. 8). Тогда скорость капли относительно поезда определится диагональю параллелограмма, построенного на скоростях v_1 и $-v_2$; угол α легко найти из треугольника:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{v_2}{v_1} \text{ и } \alpha = \operatorname{arctg}\frac{v_2}{v_1}.$$

Приведем еще примеры задач, в которых учащимся самим приходится решать вопрос о наиболее целесообразном выборе системы отсчета.

Корабль плывет на юг со скоростью 42,3 *км/ч.* Заметив в море катер, наблюдатель, находящийся на палубе корабля, определил, что катер движется на северо-восток со скоростью 30 *км/ч.*

Какова скорость катера в системе *земля* и в каком направлении он идет?

Заметим, кстати, что в одном из новых задачников [1], в котором помещена эта задача, вопрос сформулирован неудачно. Автор спрашивает: «Какова в действительности скорость катера...», т. е. подчеркивает, что скорость относительно земли это «действительная», а скорость относительно корабля это уже какая-то не «истинная», а «кажущаяся».

В этой задаче относительная скорость дана в системе *корабль*; переносная скорость самой системы отсчета — корабля — известна. Поэтому скорость в системе *земля* легко определяется сложением относительной и переносной скоростей.

Приведенная ниже вторая задача решается значительно проще, если в качестве системы отсчета выбирается тело, движущееся относительно земли.

Трамвай идет со скоростью v_1 по прямому пути MN из точки A (рис. 9). Из точки B, находящейся на расстоянии l от A, выезжает автомобиль, развивающий скорость v_2. Под каким углом к трамвайному пути

---

[1] В. А. Балаш, Задачи по физике, изд. «Просвещение», М., 1964, задача 11.

должна быть направлена скорость, чтобы автомобиль догнал трамвай по кратчайшему пути?

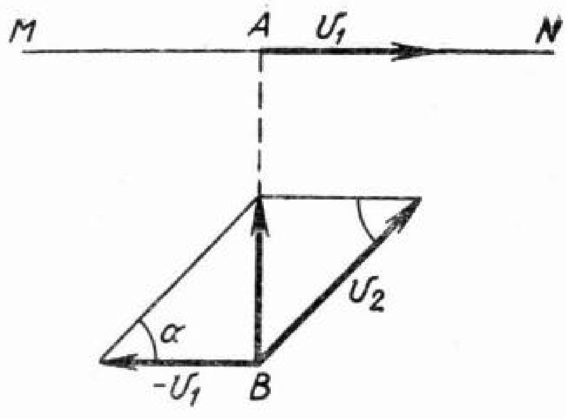


Рис. 9

Для решения этой задачи целесообразно выбрать в качестве системы отсчета трамвай. Тогда скорость земли относительно трамвая будет $(-v_1)$. Скорость v автомобиля относительно трамвая (принимаемого за неподвижное тело отсчета) находится сложением скоростей v_2 и $-v_1$. По условию задачи (кратчайший путь!) эта скорость должна быть направлена по прямой AB.

Решение ряда таких задач приводит учащихся к ясному пониманию смысла сложения скоростей, непосредственно связанного с понятием относительного движения.

§ 3. Границы применимости классического закона сложения скоростей

Раскрытие границ применимости ряда физических понятий и закономерностей, изучаемых в средней школе, является важной стороной формирования мировоззрения учащихся.

В основе теории познания диалектического материализма лежит принципиальное положение о том, что, с одной стороны, наши представления и понятия не априорны, а являются обобщением опыта человечества и что, с другой стороны, природа неисчерпаема, и поэтому наши понятия и представления имеют ограниченную применимость.

Раскрытию этого положения не придается должного значения даже в старших классах. В частности, при изучении механики учащиеся не получают представления о том, что понятия и закономерности классической механики не обладают абсолютной точностью и универсальной применимостью. На протяжении изучения всего раздела не приводится ни одного примера, показывающего границы применимости изучаемых закономерностей.

Именно поэтому наши учащиеся, по крылатому выражению Д. Данина [1], «успевают на школьной скамье стать современниками Ньютона, но не успевают стать современниками Эйнштейна».

У учащихся не формируется понятие об относительности ряда изучаемых закономерностей, не выясняется соотношение между относительной и абсолютной истинами в процессе познания. Это является существенным пробелом в физическом образовании учащихся, в формировании их мировоззрения, так как вопрос о соотношении относительной и абсолютной истин имеет непосредственное отношение к основному вопросу философии — об отношении создаваемых нами понятий и теорий к объективному миру.

«Озабоченная только тем, чтобы мы знали назубок законы Ома и Гей-Люссака... школа совершенно не заботится о нашем физическом мировоззрении. А между тем каждый жаждет хотя бы почувствовать неизбежность и осознать необходимость той неклассической, по слухам — совершенно непонятной картины движущейся материи, которую рисует физика XX века» [2].

Несмотря на некоторое преувеличение Д. Данина, нельзя не признать справедливости его критики о недостаточной заботе, проявляемой в отношении формирования мировоззрения учащихся, создания у них современной научной картины мира.

Вопрос заключается не в том, чтобы одновременно с классической учащиеся изучали уже в VIII классе и релятивистскую механику. Это вряд ли возможно и не может привести к хорошему усвоению механики. Однако, преподавая классическую механику, следует показывать учащимся, что она справедлива в определенных границах, показывать относительный характер некоторых получаемых ими знаний. Как известно, новые крупные открытия обнаружили ограниченность и относительность ряда фундаментальных понятий классической физики.

Понятия и теории изменяются в ходе познания. Они меняются по мере того, как мы все глубже познаем материальный мир. Научные понятия и теории отражают

---

[1] Д. Данин, Неизбежность странного мира, изд. «Молодая гвардия», М., 1962.

[2] Там же.

неполно, иногда односторонне, определенные черты действительности; поэтому для определенного исторического этапа они служат ступенью для последующего более глубокого познания.

Каждая ступень познания есть ступень относительного, а не абсолютного знания, но в этом относительном знании есть частица абсолютного, в нем есть объективное содержание, не зависящее от человека.

Вопрос об изменчивости научных понятий не имеет, конечно, ничего общего с вопросом об их объективном содержании. Последнее подтверждается тем, что, возникнув, эти понятия позволяют нам, во-первых, решать ряд нынешних практических задач и, во-вторых, двигаться к еще более глубокому знанию.

Процесс развития научных идей определяется необходимостью приводить теории в соответствие с более широкой практикой, достигнутой на основе предыдущего познания.

Так, например, идеи теории относительности возникли в науке в результате обобщения новой практики, связанной с необходимостью отразить движение электрически заряженных тел с околосветовыми скоростями. Появившись, она помогла разрешить ряд новых, ранее не возникавших практических задач, например создать новый тип ускорителей и т. п.

В этом процессе развития познания выкристаллизовываются взгляды, которые точнее отображают действительность. Характерным здесь является то, что пересмотр основных физических понятий и закономерностей завершается не простым отрицанием накопленных ранее представлений, а отрицанием глубоко диалектическим, которое сопровождается обобщением основных понятий на значительно более широкую область явлений. Сущность пересмотра сводится обычно к пересмотру тех границ, в пределах которых классические представления применимы к реально существующим условиям.

Физическая теория является правильной, если она имеет определенную область применения, где она не противоречит себе и опытным фактам. Такой теорией является ньютоновская механика.

Дальнейшее развитие теории не отменяет и не опровергает правильную теорию, а только расширяет ее понятия так, чтобы охватить новые области применения.

Это неразрывно связано с объективным характером физических знаний.

Теория относительности и квантовая механика не отбрасывают предшествующие теории, а являются по отношению к ним обобщенными теориями. При некоторых предельных значениях параметров эти обобщенные теории возвращаются к классическим, которые оказываются, таким образом, частными случаями обобщенных теорий.

Формирование у учащихся правильного понимания закономерного хода развития познания — важный вопрос идеологического воспитания. Оно должно происходить постепенно и систематически по мере изучения курса физики.

Для этого необходимо:

а) в тех случаях, где это возможно, показывать границы применимости изучаемых в школе понятий и законов, т. е. разъяснять эти закономерности как истину, имеющую объективное содержание, проверяемое практикой, применимостью к ряду явлений, но истину относительную — ступень более обобщенного знания;

б) показать, что новые научные идеи возникают не беспорядочно, а развиваются в определенном направлении. Этот процесс определяется необходимостью приводить теории в соответствие с более широкой практикой, достигнутой на основе предыдущего знания;

в) показать, что новые знания, возникающие в ходе исторического развития познания, являются обобщенными по отношению к старым, а не отрицают их.

Содержание школьного курса физики позволяет в известной мере осуществить эти требования. Первая возможность такого рода в разделе механики возникает в связи с изучением классического закона сложения скоростей.

После того как учащиеся изучат и хорошо усвоят этот закон, следует показать, что он является достаточно точным лишь для скоростей малых в сравнении со скоростью света, а движения с релятивистскими скоростями подчиняются более общему закону, по отношению к которому классический является частным случаем. Это можно сделать уже при изучении кинематики. Однако не исключена и другая возможность — вынести изучение этого вопроса вместе с другими подобными (например, выяснением границ применимости классического понятия массы) в динамику и рассмотреть их после изучения законов динамики и принципа относительности Галилея.

Этапы ознакомления учащихся с границами применимости классического закона сложения скоростей сводятся к следующему:

а) Выясняют, что скорость света, в отличие от скоростей любых других материальных тел, является не относительной, а абсолютной величиной — она одинакова во всех системах отсчета, т. е. знакомят учащихся с одним из двух постулатов специальной теории относительности. Это утверждение должно получить обоснование, во всяком случае неизбежность этого вывода должна быть разъяснена учащимся.

В VIII классе можно разъяснить абсолютность величины скорости света прежде всего на основе обсуждения результатов астрономических наблюдений над двойными звездами.

В самом деле, если исходить из того, что скорость света является величиной относительной, как любая другая скорость, то необходимо указать систему отсчета, от которой она зависит (по отношению к которой она может быть измерена).

Естественнее всего представить себе, что она зависит от движения источника, испустившего его. В этом случае она должна складываться со скоростью источника, подобно тому как скорость движения человека в поезде по отношению к станции складывается из скорости человека в системе *поезд* и скорости поезда в системе *земля*. Однако наблюдения над двойными звездами опровергают эту гипотезу.

Известно, что двойными звездами называются пары звезд, находящиеся на сравнительно близком расстоянии друг от друга, из которых одна обращается вокруг другой (рис. 10). Для этих звезд измерены расстояния друг от друга, скорость обращения одной звезды вокруг другой, а также расстояние до Земли. Пусть звезда B обращается вокруг звезды

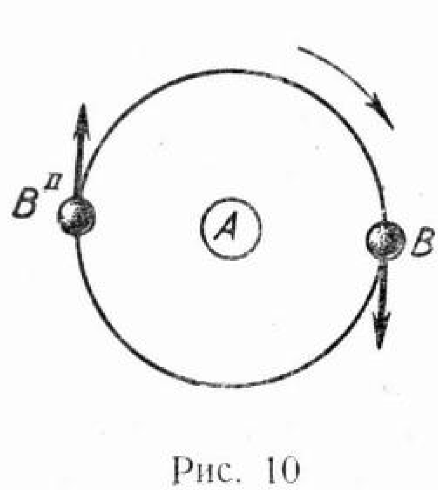


Рис. 10

A по часовой стрелке. В положении I скорость света по отношению к Земле будет $c+v$, где c — скорость света относительно звезды, а v — скорсть движения звезды. В положении II она будет $c-v$. Несмотря на то что скорость движения звезд чрезвычайно мала по сравнению со скоростью света, этой разности в скорости вполне достаточно, чтобы при движении до Земли «быстрый» свет догнал «медленный» или даже перегнал его.

Если оба луча света дойдут до Земли одновременно, то в телескоп вместо двойной звезды мы увидим тройную: кроме центральной, мы увидим вторую звезду сразу в двух положениях, из которых распространялся «быстрый» и «медленный» свет.

Если расстояние до Земли так велико, что «быстрый» свет за время своего движения перегонит «медленный», то астрономы увидят звезду B в положении II раньше, чем в положении I. Однако такие явления никогда не наблюдались. Это заставляет считать, что скорость света не складывается с движением источника, не зависит от него.

Обоснование абсолютности скорости света, вообще говоря, требует проверки и второй гипотезы — возможности измерить скорость света в пустоте относительно движущегося тела.

Если бы оказалось, что относительно этого тела скорость света в пустоте различна в разных направлениях, например вдоль пути и перпендикулярно к нему, то можно было бы говорить об относительности этой скорости и о применении к ней закона сложения скоростей.

Известно, что ответ на этот вопрос и притом отрицательный дан в историческом опыте Майкельсона и Морли (1887 г.).

Однако идея этого опыта сложна для учащихся IX класса. В некоторых частях она и недоступна им, так как требует знания явления интерференции. Поэтому, в лучшем случае, можно только сослаться на то, что такой опыт был поставлен. Лабораторией для эксперимента являлась наша Земля, движущаяся вокруг Солнца со скоростью 30 *км/сек.* Изучая распространение света на Земле вдоль ее движения и перпендикулярно к нему, установили, что скорость света не складывается со скоростью Земли. Подробно с идеей опыта Майкельсона учащихся можно знакомить лишь в X классе.

Таким образом, скорость света в вакууме не складывается ни с какой другой скоростью. Относительно любого тела она равна одной и той же величине — 300 000 *км/сек.*

Итак, получен важнейший вывод о том, что скорость света — величина абсолютная. Классический закон сложения скоростей к ней неприменим. Однако нужно показать, что он неприменим также ко всем телам, движущимся с околосветовыми скоростями.

Из факта абсолютности скорости света еще не следует, что она является предельной, что ни одно тело не может двигаться, ни один материальный процесс не может происходить с большей скоростью. Между тем только существование в мире предельной скорости лишает закон сложения скоростей его универсальной применимости к большим и малым скоростям.

Ведь если какая-то система *(поезд Эйнштейна)* движется относительно другой системы *(земля)* со скоростью, например, 240 000 *км/сек.*, а относительно первой системы движется тело со скоростью 100 000 *км/сек*, то его скорость относительно другой системы не может быть равна

$$240\,000\ \text{км/сек} + 100\,000\ \text{км/сек} = 340\,000\ \text{км/сек},$$

так как она превышает предельную скорость, существующую в природе. Для больших скоростей должен действовать более точный закон сложения, который оставляет величину скорости света в вакууме предельной для всех тел в природе.

б) Второй этап, приближающий к ознакомлению учащихся с границами применения классического закона сложения скоростей, связан с выяснением существования в природе предельной скорости движения тел и протекания материальных процессов, равной скорости света в пустоте.

Обоснование этого положения далеко не просто. Конечно, можно найти такой выход. Учащимся просто сообщается, что скорость света не только абсолютная величина. Она играет исключительно важную роль в современной физике именно в связи с тем, что является максимальной для движения тел, для передачи действия (сигнала) из одной точки пространства в другую.

Можно сослаться на то, что экспериментальные факты, с которыми учащиеся будут знакомиться в дальнейшем, например при изучении электронной теории, служат подтверждением этого закона.

В дальнейшем можно будет привести сколько угодно парадоксальных примеров, следующих из того допущения, что скорость электронов может быть больше скорости света. Невозможность ситуаций, к которым приводят эти примеры, показывает, что последовательная электронная теория не может быть построена на основе механики Ньютона, в которой отсутствует представление о существовании предельной скорости, и, следовательно, имеет место классический закон сложения скоростей.

В той части курса, в которой учащиеся будут знать о фотонах как о частицах материи, существующих только в движении со скоростью *c*, т. е. у которых масса покоя равна нулю, легко будет показать, что не может быть такого тела, которое может двигаться с такой же скоростью. Ведь относительно такого тела фотон будет находиться в покое. А значит, для тела, движущегося со скоростью света, фотон перестанет существовать, так как его масса покоя равна нулю. В то же время для других тел он будет существовать! Это уже нелепость, несовместимая с научной теорией. Отсюда вывод: нет таких материальных тел, которые движутся со скоростью света [1]. Однако эти вопросы можно будет обсуждать с учащимися значительно позже, а не при изучении механики.

Открытие существования в мире предельной скорости является одним из величайших триумфов человеческой мысли. Поэтому изложение этого вопроса без должной аргументации нельзя считать наилучшим вариантом.

В классе с достаточно развитыми учащимися можно обоснование предельной скорости строить на основе рассмотрения относительности понятия одновременности. Элементарный доступный учащимся VIII класса и вполне корректный анализ понятия одновременности можно

---

[1] Л. Инфельд в статье «История развития теории относительности» писал, что, еще будучи 16-летним гимназистом, Эйнштейн задумывался над вопросом о том, «что случится, если кто-нибудь побежит за световым лучом и попытается догнать его».

«Эйнштейн и современная физика. Сборник памяти А. Эйнштейна». Гостехиздат, М., 1956.

найти во многих научно-популярных книгах по теории относительности [1].

Изложение этого вопроса проводится в виде анализа некоего мысленного эксперимента. Пусть по прямому пути с постоянной скоростью движется длинный поезд. В некоторый момент времени точно в середине поезда вспыхивает лампочка. Через некоторое время свет от нее достигает дверей, которые находятся в переднем и заднем концах поезда. Двери при этом автоматически открываются.

Как это явление будет происходить с точки зрения пассажиров в поезде и наблюдателей на платформе?

Люди, сидящие в поезде, увидят, что обе двери открываются одновременно. Ведь скорость света во всех направлениях одинакова, а пути света от середины поезда до обеих дверей одинаковы.

Для неподвижных наблюдателей на платформе свет также распространяется во все стороны с одинаковой скоростью. Но поезд движется. Задний вагон идет навстречу световому лучу, а передний уходит от него. Поэтому задней двери он достигнет раньше, чем передней. Наблюдатели на платформе увидят, что вначале откроется задняя дверь, а затем передняя. Конечно, разница во времени может быть заметной лишь в том случае, если поезд движется со скоростью, близкой к скорости света.

Итак, из абсолютности скорости света, доказанной экспериментально, вытекает вывод о том, что события, являющиеся одновременными в одной системе отсчета, оказываются разделенными некоторым промежутком времени в другой системе.

Логически совершенно неопровержимо доказывается тем самым относительность понятия одновременности.

Нет необходимости в этом месте курса прослеживать за остальными выводами из этого мысленного эксперимента, касающимися замедления времени и сокращения масштабов. Это будет вопросом изучения в X классе. Здесь мы получили лишь тот вывод, который необходим для обоснования предельности скорости света.

---

[1] Л. Д. Ландау и Ю. Б. Румер, Что такое теория относительности, Новосибирское книжное изд., 1963; М. Гарднер, Теория относительности для миллионов, Атомиздат, М., 1965; и др.

Полученный вывод, несомненно, покажется учащимся удивительным, противоречащим здравому смыслу. Поэтому с ними необходимо на эту тему более подробно побеседовать и объяснить, что наука не боится столкновений с так называемым здравым смыслом, т. е. с представлениями, которые кажутся нам привычными, складываются интуитивно.

Представления об абсолютности понятия одновременности сложились потому, что мы живем в мире скоростей, далеких от скорости света. Различия в интервалах между двумя событиями в различных системах отсчета, движущихся относительно друг друга со скоростями, с которыми мы привыкли иметь дело, ничтожны. Они не могут быть обнаружены.

Однако, если в науке обнаруживается несогласие существующих представлений с новыми данными опыта, она безжалостно ломает сложившиеся представления, поднимая наши знания на более высокую ступень. Новые экспериментальные данные привели к непреложному выводу: два события являются одновременными не во всех системах отсчета, не во всех лабораториях, а лишь в тех, которые покоятся относительно друга друга; если же они движутся относительно друг друга, то события, одновременные в одной лаборатории, будут неодновременными в другой.

Если относительность одновременности является доказанным непреложным фактом, то отсюда сразу следует тот вывод, ради которого мы анализировали этот вопрос,— вывод о том, что скорости имеют предел.

В самом деле, если бы можно было осуществить передачу сигналов с бесконечной скоростью, то одновременные события в одной лаборатории мы должны были бы считать одновременными во всех других, независимо от их относительной скорости, так как бесконечно быстрый сигнал о первом событии приходил бы во всех случаях одновременно с сигналом о втором событии. А это противоречит, как мы убедились, выводам, полученным из эксперимента. Скорость передачи любых сигналов не может быть бесконечной; она имеет предел, совпадающий со скоростью света.

Таким образом, на основе довольно длинной логической цепи мы получили необходимый вывод. Надо заметить, что каждое звено этой цепи вполне доступно учащимся, хотя вся последовательность выводов не всеми учащимися самостоятельно может быть воспроизведена. Но это и не обязательно от них требовать. Все же все учащиеся усвоят необходимый вывод не догматически; они будут знать, что он может быть доказан, хотя не все полностью запомнят логику умозаключений, построенных на экспериментальных фактах.

Подобная беседа воспринимается учащимися с исключительным интересом. Она рождает в сознании учащихся представления, к которым они постепенно будут привыкать и которые помогут им в дальнейшем усвоить важные идеи современной физики.

Итак, закон сложения скоростей неприменим к околосветовым скоростям, он должен быть заменен другим, более точным, справедливым как для малых, так и для больших скоростей. Классический закон сложения скоростей — не абсолютная, а относительная истина. Его достаточная точность для большого круга явлений — движений со скоростями, далекими от скорости света, — доказывает объективность его содержания. Однако для того чтобы показать, что он представляет собой определенную ступень познания, необходимо показать также, что он является частным случаем более общего релятивистского закона.

Вывод этого закона, хотя и возможен в VIII классе, но требует слишком сложного для них анализа понятий времени и пространства.

Поэтому возникает необходимость релятивистский закон сложения скоростей $v_2 = \dfrac{v_0 + v_1}{1 + \dfrac{v_0 v_1}{c^2}}$ дать без вывода, но с последующим его анализом.

Этот анализ должен показать следующее:

а) При скоростях v_0 и v_1, малых по сравнению с c, величина $\dfrac{v_0 v_1}{c^2} \ll 1$, и ею можно пренебречь. Тогда, в этом частном случае, получают уже известную классическую формулу $v_2 = v_0 + v_1$. Значит, классический закон является частным случаем более общего и точного релятивистского закона.

б) При скоростях v_0 и v_1, сравнимых со скоростью света, применение релятивистской формулы, вместо классической, дает вполне ощутимую разницу в результате: скорость v_2, вычисленная по обобщенной формуле, будет меньше, чем по классической, в k раз, где $k=1+\frac{v_0 v_1}{c^2}$. Чем больше скорости v_0 и v_1, тем больше этот коэффициент k.

в) Главный вывод из анализа, подтверждающий его справедливость, должен показать, что, применяя его к скоростям, не превышающим скорость света, снова получают скорость, не превышающую c. Ведь именно существование предельной скорости показало неприменимость закона $v_2=v_0+v_1$ к околосветовым скоростям.

Для этого представим формулу в следующем виде:

$$v_2=\frac{v_0+v_1}{1+\frac{v_0 v_1}{c^2}}=c\left[1-\frac{\left(1-\frac{v_0}{c}\right)\left(1-\frac{v_1}{c}\right)}{1+\frac{v_0 v_1}{c^2}}\right].$$

Так как $v_0 \leqslant c$ и $v_1 \leqslant c$, то в правой части равенства числитель и знаменатель, а с ними и вся дробь положительны. Кроме того, раскрыв круглые скобки, можно показать, что числитель дроби меньше знаменателя, т. е. что эта дробь правильная:

$$\frac{1-\frac{v_0}{c}-\frac{v_1}{c}+\frac{v_0 v_1}{c^2}}{1+\frac{v_0 v_1}{c^2}}=\frac{1+\frac{v_0 v_1}{c^2}-\frac{v_0+v_1}{c}}{1+\frac{v_0 v_1}{c^2}}.$$

Поэтому величина в квадратных скобках меньше единицы, а, следовательно, $v_2 \leqslant c$.

Если $v_0=c$ и $v_1=c$, то и $v_2=c$. Это есть не что иное, как закон постоянства скорости света. Таким образом, релятивистский закон сложения скоростей эквивалентен утверждению о существовании в природе предельной скорости.

При разъяснении учащимся приведенной формулы нужно не упускать из виду того, что она применяется при изменении системы отсчета при пересчете скорости от одной системы отсчета к другой. Полученная релятивистская формула также предназначена именно для пересчета величины скорости одного и того же тела от одной системы к другой. Если же из одной и той же системы отсчета наблюдаем два движущихся навстречу друг другу тела, причем скорости этих тел, например, равны $^2/_3$ c, то расстояние между этими телами будет уменьшаться на $^4/_3$ c, т. е. на 400 000 *км* за каждую секунду.

Ряд упражнений может помочь лучше уяснить связь между классическим и релятивистским законами, показать, почему нет смысла применять общий закон, справедливый как для больших, так и малых скоростей, к скоростям, малым по отношению к c.

1. Найти с помощью классической и релятивистской формул скорость пули относительно земли, если она выпущена из горизонтально летящего самолета со скоростью 1000 *м/сек*, а скорость самолета относительно земли 1440 *км/ч*. Сравните полученные значения.

2. Произведите по обеим формулам сложение относительной и переносной скоростей, каждая из которых равна: а) $^1/_2$ c; б) $^2/_3$ c. Сравните полученные результаты.

§ 4. Формирование понятия о векторных величинах. Последовательность изучения вопросов кинематики

В программах курса физики средней школы и соответственно им в учебниках вопросы кинематики прямолинейного и криволинейного движений до сих пор давались раздельно; между ними включается тема «Динамика прямолинейных движений». Однако в последнее время высказываются мнения о том, что изучение вопросов кинематики прямолинейных и криволинейных движений следует проводить совместно. Это мнение представляется правильным.

Объединение однородного материала в пределах одной темы может дать некоторую экономию во времени, что уже является немаловажным фактором, так как бурный рост научной информации, которую постепенно необходимо вводить в среднюю школу, требует изыскания всех возможностей интенсификации обучения. Однако при всей важности указанного аргумента не в нем заключается основное преимущество такой систематизации материала.

При изучении кинематики формируются понятия рении. Трудно переоценить, насколько важно глубокое и полное понимание векторных величин для усвоения о векторных величинах — перемещении, скорости, усковсех вопросов механики. Не случайно в прекрасной книге А. Эйнштейна и Л. Инфельда «Эволюция физики» подчеркивается, что понимание векторного характера величин является одной из путеводных нитей, позволяющих понять руководящие идеи, ведущие к раскрытию основных закономерностей механики.

Может ли быть сформировано понятие о векторной величине в пределах изучения кинематики прямолинейного движения в той мере, в какой это нужно для понимания динамики? Совершенно очевидно, что нет. В самом деле, какое значение усматривают учащиеся в том, что скорость есть векторная величина? Как этот векторный характер скорости или ускорения сказывается при изучении прямолинейных движений?

В связи с тем, что в прямолинейных движениях изменения скорости всегда направлены по линии скорости (в ту же или в противоположную сторону), нахождение скорости в каждый следующий момент времени производится алгебраически. Только при переходе к криволинейному движению совершается переход от мышления непрерывно изменяющимися алгебраическими величинами к мышлению непрерывно изменяющимися векторными величинами. То, что направленность, так же как и размер (число), существенна для характеристики скорости, определяет ее величину, учащиеся не могут понять при анализе прямолинейных движений. Только в тех случаях, когда ускорения направлены под углом к скорости, выяснится, что два вектора скорости, имеющие одинаковый размер, но направленные под углом друг к другу, это неравные векторы, и равномерное движение по окружности есть движение с ускорением. Оставаясь в рамках изучения прямолинейного движения, учащиеся не вкладывают в понятия векторных величин иного смысла, кроме того, что это перевод некоторых фраз о направленности ряда физических величин на другой символический язык. То, что эта символика приводит к важным обобщениям, в которых понятия вектора являются весьма существенными, они увидят и поймут лишь при изучении криволинейных движений. При переходе к криволинейным движениям происходит обобщение понятий перемещения, скорости, ускорения, ранее введенных в кинематике прямолинейных движений. Эти понятия, которые были полезны при изучении прямолинейных движений, оказываются применимыми и к криволинейным — в этом состоит обобщение этих понятий, причем операции над ними происходят по тем же правилам. При всяком обобщении должно быть строго удовлетворено одно требование: любое обобщенное понятие должно сводиться к первоначальному, когда выполняются первоначальные условия.

Кривая включает в это понятие и прямую. Если скорость и изменение скорости введены для движения по кривой, то они тем самым автоматически вводятся и для движения по прямой. Но этот результат не должен противоречить результатам, полученным ранее. Если кривая становится прямой, то все обобщенные понятия должны свестись к обычным понятиям, описывающим прямолинейное движение.

Именно так и вводятся эти понятия. Действительно, скорость в криволинейном движении есть вектор, направленный по касательной к криволинейной траектории в данной точке. Касательная к прямой есть сама прямая, следовательно, понятие скорости в криволинейном движении сводится к прежнему понятию, если криволинейная траектория становится прямолинейной.

Изменение скорости при движении вдоль прямой изображается вектором (рис. 11, пунктир), замыкающим

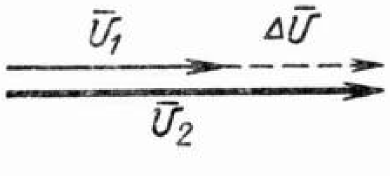


Рис. 11

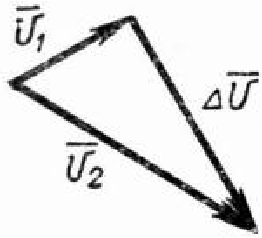


Рис. 12

концы векторов, изображающих скорости в начальный и конечный моменты времени. Второй вектор переносится вдоль прямой так, что оба имеют одну и ту же начальную точку. (Векторы скорости изображены параллельными отрезками, чтобы на чертеже они не сливались.) Но так же находится и изменение скорости в криволинейном движении, когда направление скоростей составляет некоторый угол друг с другом (рис. 12). Таким образом, все понятия, относящиеся к прямолинейным движениям, оказываются частным случаем обобщенных понятий.

К началу изучения динамики необходимо, чтобы учащиеся владели этими обобщенными понятиями скорости и ускорения, знали те случаи, когда вектор ускорения не совпадает по направлению с вектором скорости, составляет с ним некоторый угол (в частности, прямой). Тогда им легче будет понять, что тело вовсе не обязательно движется в том направлении, куда направлена сила.

Нельзя недооценивать трудности которая возникает у учащихся при усвоении основной руководящей идеи в анализе механических движений, заключающейся в том, что силы ответственны за ускорения, а не за скорости. Не так легко происходит уяснение учащимися, что не движения, а изменения движений связаны с действиями сил, не скорости, а ускорения имеют то же направление, что и силы, действующие на тело.

Учащимся свойственно то интуитивное мышление, которое отличало аристотелевский период науки и поддерживалось его авторитетом.

Наша интуиция связывает движение с такими действиями, как толчок или тяга. Кажется естественным заключение, что, чем сильнее действие, оказываемое на тело, тем больше будет его скорость. Интуиция говорит о том, что скорость существенно связана с внешним воздействием.

Однако метод рассуждений, навязанный интуицией, неверен и приводит к ложным идеям в понимании движения, которые (поддерживаемые авторитетом Аристотеля) сохранялись в течение столетий. Он писал: «Движущееся тело останавливается, если сила, его толкающая, прекращает свое действие».

Именно этот образ мышления очень характерен для многих учащихся, и это понятно, так как весь их жизненный опыт, все повседневные наблюдения, которые они не пытаются глубоко осмыслить, не противоречат динамике Аристотеля. Динамика Ньютона не так очевидна, она требует более глубокого проникновения в явления.

Помочь в преодолении этой трудности нужно уже в кинематике, при формировании обобщенных понятий о скоростях и ускорениях как о векторных величинах. Вот почему так существенно совместное изучение кинематики прямолинейных и криволинейных движений до динамики.

Рассмотрим этапы формирования основных кинематических понятий и последовательность изучения вопросов этого раздела механики.

Путь и перемещение. В определение векторной величины должно входить не только то, что она характеризуется как размером, так и направлением, но также и то, что операции с векторами, в частности сложение, производятся геометрически (по правилу параллелограмма или треугольника). Именно это определяет векторный характер величин. Если только ограничиться указанием на их направленность, то не всегда учащиеся поймут, почему, например, такая величина, как сила тока, имеющая определенное направление, не является векторной величиной.

Нагляднее всего вводится понятие о векторной величине и операции с ней при введении понятия о перемещении на первых уроках кинематики.

В учебниках для средней школы и в практике преподавания, к сожалению, не всегда разграничивают понятия пути и перемещения, а последнее иногда вовсе не вводят. Между тем легко их разграничить и показать, что одна из них — величина скалярная (путь), а вторая — векторная (перемещение). Если движущаяся точка в некоторый момент времени находилась в A (рис. 13) и за время Δt перешла в B, то ее перемещение характеризуется отрезком AB, имеющим определенное направление в пространстве (относительно избранной системы отсчета). Путь же точки, представляющий собой отрезок траектории между начальным и конечным ее положениями, зависит от формы траектории: двигаясь по траектории I, она проходит меньший путь, чем при движении по траектории II. Перемещение — вектор, имеющий направление от A к B. При прямолинейном движении вектор перемещения $\bar{s}$ по величине совпадает с пройденным путем.

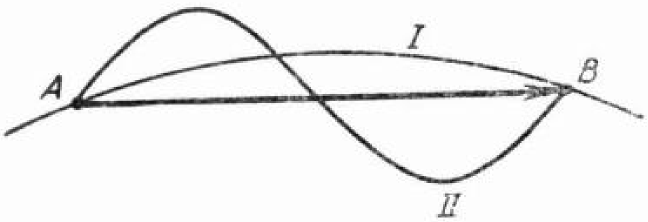


Рис. 13

Из определения понятия перемещения сразу же вытекает правило сложения перемещений. Если точка переходит из A в B, а затем в C, то ее второе перемещение есть отрезок BC. Результирующее перемещение выражается отрезком AC (рис. 14), AC — замыкающая двух составляющих перемещений, или, что то же, диагональ параллелограмма, построенного на составляющих перемещениях.

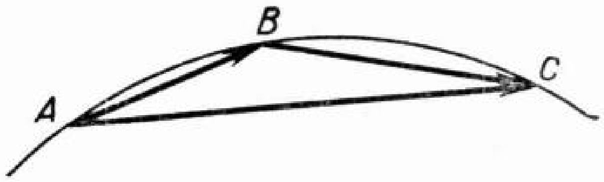


Рис. 14

Так впервые для учащихся возникает, причем с полной очевидностью, правило параллелограмма (или треугольника) для сложения векторных величин. Это правило сложения величин, характеризующихся не только числом (размером), но и направлением, должно быть введено в определение векторной величины: такие *величины, которые,* подобно перемещениям, *характеризуются не только размером, но и определенным направлением в пространстве и складываются геометрически, называются векторными величинами.*

Интересно отметить, что в книге Л. Ландау и А. Китайгородского[1] в определение векторной величины входит только последнее — геометрическое сложение. Показав, что перемещения нельзя складывать алгебраически, и выведя из рассмотрения чертежа метод нахождения результирующего перемещения, авторы пишут: «Сложение описанным способом называется геометрическим, а величины, складываемые этим способом, называются векторами».

Вектор скорости. Векторный характер скорости непосредственно вытекает из того, что перемещение является вектором. Скорость определяется как отношение перемещения ко времени, в течение которого оно произошло. Именно отношение вектора перемещения ко времени, а не скалярной величины пути ко времени, как часто определяют скорость в учебниках для средней школы. Правда, как всякое обобщенное понятие, оно справедливо и для частного случая: в прямолинейном движении вектор перемещения совпадает с пройденным путем. Однако векторный характер скорости непосредст-

[1] Л. Д. Ландау и А. И. Китайгородский, Физика для всех, Физматгиз, М., 1963, стр. 18.

венно вытекает из обобщенного определения понятия скорости.

Поскольку перемещение — вектор, то и скорость — вектор, направленный в ту же сторону, что и перемещение.

Чтобы узнать направление вектора скорости в криволинейном движении, следует взять настолько малый отрезок времени, чтобы в течение его можно было считать отрезок траектории прямолинейным, а движение по этому отрезку равномерным. Направление этого отрезка, практически совпадающего с касательной к траектории, можно принять за направление вектора скорости. Итак, существенно, что для определения скорости в криволинейном движении необходимо брать очень короткий интервал времени, точно так же как при определении мгновенной скорости неравномерного прямолинейного движения. Скорость в криволинейном движении есть мгновенная скорость в данной точке траектории.

Известно, что строгий анализ таких понятий, как «очень короткий интервал времени», «очень малый отрезок траектории» и т. д., привел в свое время Ньютона и Лейбница к открытию дифференциального исчисления. Однако учащиеся средней школы не владеют аппаратом исчисления бесконечно малых величин.

Методическое решение вопроса о предельных переходах, целесообразное для средней школы, дано в элементарном учебнике физики под редакцией акад. Г. С. Ландсберга [1].

Сущность этого метода заключается в том, что вместо математического понятия бесконечно малой величины (промежутка времени в данном случае), строгое определение которого затруднительно дать учащимся VIII класса, вводится понятие физически малой величины. Это значит, что при определении мгновенной скорости берется такой малый промежуток времени, в пределах которого изменение скорости уже перестает улавливаться физическими приборами. Этим ставится естественный предел стремлению получить все более точное определение мгновенной скорости. Дальнейшее уменьшение промежутков времени теряет смысл, и среднюю скорость

---

[1] «Элементарный учебник физики», под ред. акад. Г. С. Ландсберга, т. I, «Наука», М., 1966.

за такой малый промежуток времени можно принять за мгновенную скорость с той степенью точности, которая имеет практический смысл.

Пользуясь этим понятием о пределе уменьшения физических величин, который естественным образом ставится приборами, используемыми для их измерения, вводится понятие о мгновенной скорости (или, что то же, скорости в данной точке траектории) прямолинейного движения и о мгновенной скорости в криволинейном движении. Поэтому переход от изучения этого понятия в прямолинейном движении к криволинейному будет совершенно естествен и не вызовет затруднений учащихся. Учащиеся получают сразу обобщенное понятие скорости применительно к прямолинейным и криволинейным движениям.

Понятие ускорения. Так же как и скорость, понятие ускорения должно быть развито у учащихся как обобщенное, имеющее смысл для всех видов движений. В прямолинейном движении изменение скорости имеет то же направление, что и скорость, или противоположное ей. Поэтому при сложении изменений скорости за некоторый промежуток времени векторный характер ускорения не проявляется, сложение производится алгебраически. В том, что ускорение в прямолинейном движении всегда направлено по линии скорости, кроется одна из причин того, что учащиеся часто связывают направление силы с направлением скорости, а не ускорения. Со случаями, когда ускорение направлено под углом к скорости и когда, следовательно, гораздо ярче могут быть связаны направления сил и ускорений, они встречаются уже после изучения динамики прямолинейных движений. В этом состоит недостаток существующей систематики учебного материала. Отсюда вытекает необходимость такого введения ускорения, которое показывает справедливость этого понятия и для криволинейных движений.

Методика введения понятия ускорения при изучении прямолинейных движений хорошо разработана и общеизвестна. Отметим лишь следующее:

а) Кроме среднего ускорения переменного движения желательно ввести понятие мгновенного ускорения. Отсутствие в программе этого понятия является большим недостатком. Ведь равнопеременные движения в природе так же редки, как и равномерные. Поэтому учащиеся должны понимать, что ускорение при движении может изменяться, и, следовательно, они должны иметь понятие о мгновенном ускорении. Это значительно облегчит в дальнейшем усвоение понятия о центростремительном ускорении, поможет понять, почему при выводе формулы центростремительного ускорения нужно рассматривать изменения скорости именно в малый промежуток времени. Непонимание учениками того, что при равномерном движении по окружности не только скорость, но и ускорение — переменный вектор (направление его в каждой точке траектории меняется) и что, определяя центростремительное ускорение, мы определяем мгновенное ускорение, приводит к тому, что весь вывод представляется учащимся несколько надуманным и искусственным. В дальнейшем понятие мгновенного ускорения будет совершенно необходимо при изучении колебательного движения.

Проверка знаний большого числа учащихся различных школ показала хорошее усвоение того факта, что скорость при равномерном движении по окружности — величина переменная. Но, как правило, никто не уясняет себе того, что и ускорение в этом движении — переменная величина (если на это специально не обращает внимания учитель).

Методика введения понятия мгновенного ускорения такова же, как и мгновенной скорости. Разъясняют, что $\frac{\Delta v}{\Delta t}$ является средним ускорением в течение времени Δt. Среднее ускорение в течение малого промежутка времени называется мгновенным ускорением в том месте пути, в котором находится тело в рассматриваемый промежуток времени. Понятие о «малом промежутке времени» дается в таком понимании, как было разъяснено выше.

б) При введении понятия ускорения в прямолинейном движении вектор изменения скорости за данный промежуток времени полезно изобразить на чертеже (рис. 11). Для этого векторы скоростей в начальный и конечный моменты времени представляем исходящими из одной точки, так как начальная точка не имеет значения. Для того чтобы векторы не слились, изображаем их параллельными отрезками. Тогда пунктирный вектор, замыкающий концы векторов скорости, изображает изменение скорости за данный промежуток времени. Такой чертеж полезен при переходе к изучению ускорения в криволинейном движении. Он поможет понять, что изменение скорости при любом криволинейном движении (обобщенное понятие) сводится к частному при изменении условий, а это приведет к лучшему пониманию того, как изображается вектор изменения скорости в криволинейном движении. Если такая связь не устанавливается, то учащиеся воспринимают изображение этого вектора, особенно при равных по величине скоростях, как некоторый искусственный прием.

Учащиеся уже знают, как направлена скорость в криволинейном движении (рис. 15, *а*). Для того чтобы изо-

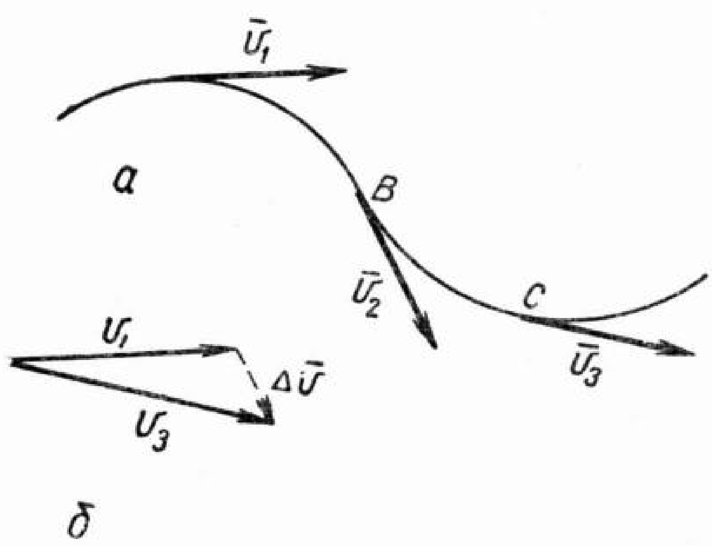


Рис. 15

бразить изменение скорости в криволинейном движении, применяют такой же прием, как и при прямолинейном движении: изображают векторы скорости в различные моменты времени исходящими из одной точки (рис. 15 *б*). Тогда пунктирный вектор, замыкающий концы векторов скорости, изображает изменение скорости. Из чертежа ясно видно, что обобщенное понятие изменения скорости переходит в частное, если движение по кривой переходит в движение по прямой. Смысл изображения вектора изменения скорости и ускорения становится яснее, теряется впечатление искусственности, которое невольно может создаться у учащихся.

Итак, вектор изменения скорости в любом криволинейном движении изображается замыкающей стороной треугольника или стороной параллелограмма, построенного на начальной и конечной скоростях движений.

Вывод формул ускорения в прямолинейном движении и всех формул равнопеременных движений не вызывает обычно затруднений. Отметим лишь, что для усвоения их учащимися необходимо соблюдение следующих условий:

а) Обеспечить демонстрацию записи как равномерных, так и неравномерных движений (в частности, и равнопеременных). Демонстрации такого рода обеспечиваются прибором Румянцева, записью с помощью капельниц и т. д. Описание их имеется в методической литературе[1].

б) При изучении равноускоренных движений, в частности свободного падения тел, кроме измерений ускорения в известных опытах, например с падающим цилиндром, полезно использовать стробоскопические снимки падающих тел. По таким снимкам (рис. 16) можно предложить учащимся рассчитать ускорение свободного падения.

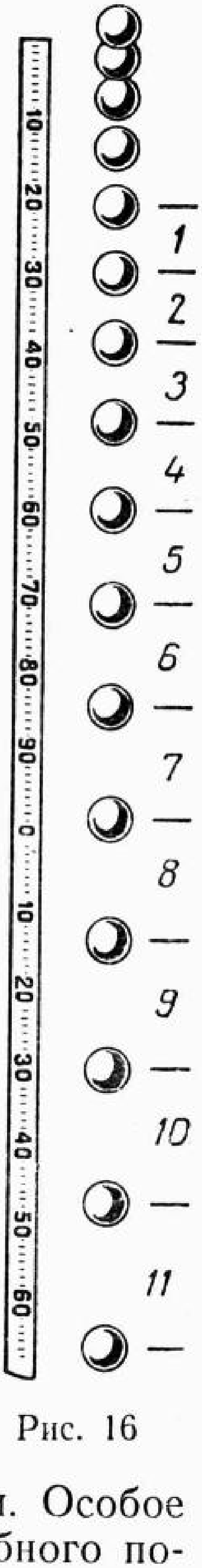


Рис. 16

в) Формирование понятий о функциональных зависимостях требует широкого привлечения в преподавание графиков движений. Изучение равнопеременных движений необходимо сопровождать решением графических задач и упражнений. Здесь одинаково важны как задачи, требующие для своего решения вычерчивания графиков, так и упражнения в чтении готовых графиков различных движений.

г) При рассмотрении равнопеременного движения необходимо особенно внимательно отнестись к применению формул пути и скорости этого движения. Приступая к решению задач, учащиеся должны четко представить себе описанные в них физические явления и наметить общий план решения задачи. Особое внимание нужно уделить выбору наиболее удобного положительного направления координатной оси и договориться об общем начале отсчета времени движения и пу-

[1] Л. И. Резников, Э. Е. Эвенчик, В. Ф. Юськович: Методика преподавания физики, т. I, изд. АПН РСФСР, М., 1958.

тей, проходимых телами. Это значительно облегчает решение задач в том случае, если в задаче рассматривается движение нескольких тел, например брошенных вертикально вверх в разные моменты времени (или из различных пунктов). Если ось h направлена вверх, а за начало отсчета времени выбирается момент бросания одного из тел, то, очевидно, начальные скорости следует считать положительными, а ускорение g отрицательным. Высоты поднятия обоих тел в какой-то момент времени t (например, в момент встречи этих тел) выразятся аналогичными формулами $h_1 = v_0 t - \frac{gt^2}{2}$ и $h_2 = v_0(t-\tau) - \frac{g(t-\tau)^2}{2}$, в которых время движения одного тела t, а второго $(t-\tau)$.

Общий случай криволинейных движений, так же, впрочем, как и общий случай переменных прямолинейных движений, в средней школе не изучается. Из криволинейных движений рассматриваются два частных случая—равномерное движение по окружности и параболическое движение брошенных тел. Необходимо отметить, что параболическое движение брошенного тела и движения по окружности являются двумя различными видами криволинейного движения и ни одно из них не включает в себя другое как частный случай. Так как общие виды криволинейного движения не изучаются, а оба указанных движения не сводятся одно к другому, нет необходимости следовать принятому до сих пор порядку изучения этих вопросов—сначала изучать движения брошенных тел, а затем равномерное движение по окружности. Можно поступить как раз наоборот, и кинематику более простого равномерного движения по окружности, в котором скорость изменяется только по направлению, изучать раньше, вслед за кинематикой равномерных прямолинейных движений.

Что касается движения тел, брошенных горизонтально и под углом к горизонту, то этот более сложный случай движения мы рассматриваем после изучения законов динамики и принципа относительности Галилея. Вместе с тем не исключается возможность такого подхода к анализу параболических движений, при котором они изучаются сразу же после равнопеременных прямолинейных движений.

Центростремительное ускорение. Выводы формулы центростремительного ускорения, применяемые в учебниках для средней школы и анализируемые в методической литературе, можно разбить на 3 группы:

а) вывод, основанный на представлении движения по окружности как сложного;

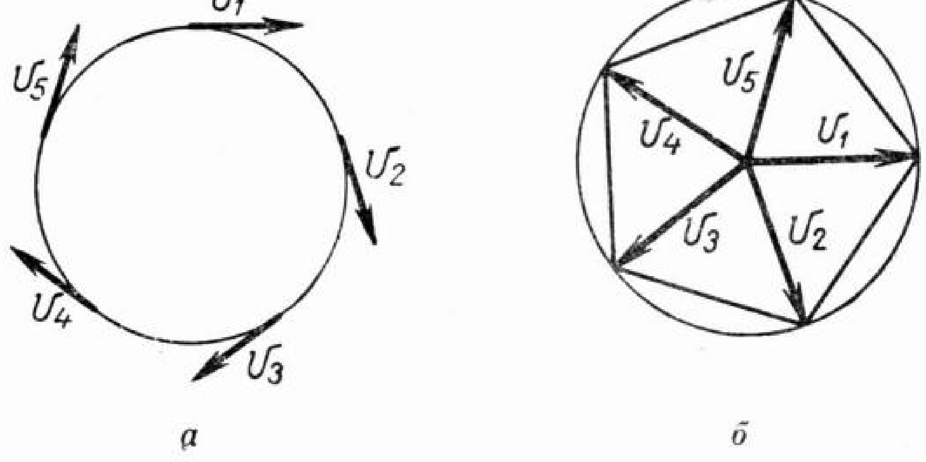
б) вывод, основанный на понятии годографа скорости;

в) вывод, основанный на рассмотрении изменения скорости в течение малого промежутка времени.

Первый способ неприемлем потому, что в нем движение по окружности трактуется как сложное. Причем, так как система отсчета при этом не указывается, а, следовательно, имеется в виду одна система отсчета, то такой способ вообще неправомерен. Конечно, любое движение, в частности и движение по окружности, можно истолковать как сложное и задавать двумя движениями. Но формально-математический метод разложения на составляющие не утверждает, что эти составляющие движения являются одновременными движениями в одной системе отсчета.

В основе координатного метода лежит введение условной (а в некоторых случаях реальной) системы отсчета, и одно из составляющих движений является движением именно в этой системе. Введение такой условной системы отсчета при изучении кинематики движения по окружности нецелесообразно. Поэтому указанный метод неприемлем.

Вывод, основанный на понятии годографа вектора, можно применить, однако и он не избавляет от необ-



а *б*

Рис. 17

ходимости пользоваться понятием предельного перехода. Изобразив векторы скорости в различных точках окружности (рис. 17, *а*) исходящими из одной точки (рис. 17, *б*), можно обосновать вывод о том, что дуга годографа скорости — в данном случае длина окружности — является полным изменением скорости только в том случае, если ее рассматривают как сумму бесконечно большого числа бесконечно малых изменений вектора скорости. Так как понятием годографа вектора учащиеся не владеют, нет смысла вводить его для вывода формулы центростремительного ускорения.

Наиболее целесообразным остается вывод, основанный на рассмотрении отношения $\frac{\Delta v}{\Delta t}$[1]. Введение понятия мгновенного ускорения, а также последовательное рассмотрение вектора изменения скорости, начиная с прямолинейных движений, позволяет устранить основные затруднения, которые обычно возникают при изучении этого вывода.

Напомним еще об одном положении, существенном для усвоения понятия ускорения, которое необходимо разобрать с учащимися уже в кинематике до изучения принципа относительности Галилея: в отличие от скорости, ускорение является величиной абсолютной (инвариантной) по отношению ко всем системам отсчета, движущимся равномерно и прямолинейно друг относительно друга. Доступные учащимся рассуждения, приводящие к этому выводу, приведены в § 1 этой главы.

---

[1] «Элементарный учебник физики», под ред. акад. Г. С. Ландсберга, т. I, изд. «Наука», М., 1966, стр. 68—69.

Глава II

ЗАКОНЫ ДИНАМИКИ

§ 1. Развитие идеи относительности движения в преподавании динамики. Инерциальные и неинерциальные системы отсчета

Вопросы методики преподавания динамики, как наиболее сложные из всего раздела механики, всегда привлекали к себе внимание методистов и учителей физики. Многие методические проблемы, связанные с формированием основных понятий (массы, силы и др.) и с изложением законов динамики, исследовались в ряде диссертационных работ; им посвящены также многие страницы в руководствах по методике физики.

Мы не ставим перед собой задачи касаться всех этих проблем, так как многие из них нашли уже достаточно хорошее методическое решение. В данном случае нас будут интересовать лишь те, которые так или иначе связаны с поставленной проблемой современного изложения механики, в том его понимании, как это было сформулировано выше.

В связи с этим в данной главе ставится задача обсудить, как могут быть развиты при изучении динамики некоторые основные идеи, которые мы пытались заложить в преподавании кинематики. Среди них важное место занимает идея относительности движения.

В практике преподавания часто забывают об относительности движения, когда приступают к изучению динамики. Формулируя законы динамики как обобщения опытных фактов, перед учащимися даже не ставят вопроса о том, в каких системах отсчета справедливы эти законы и существуют ли такие системы, в которых эти законы не действуют. В качестве единственной системы отсчета при этом молчаливо подразумевается земля или тела, жестко связанные с ней.

Абсолютизация земли в качестве системы отсчета неудачна не только в силу тех причин, которые обсуждались выше. В современную эпоху космических полетов земля потеряла свое исключительное значение как система отсчета. Кроме того, она не является строго инерциальной, и целый ряд явлений, рассматриваемых в школе, со всей очевидностью это показывают.

При изучении кинематики уже разбирались случаи, когда соображения удобства требовали применения иных систем отсчета. Однако в рамках кинематики все системы отсчета равноправны и не обладают преимуществами одна по отношению к другой. И лишь в динамике выявляется класс систем отсчета, обладающих определенными преимуществами.

Идея относительности движения, развитию которой в кинематике мы придавали такое значение, требует, чтобы сразу же при изучении законов динамики был поставлен вопрос о том, в каких системах отсчета они действительны.

В самом деле, если при изучении кинематики учащиеся усвоили, что движение тела описывается по-разному в различных системах отсчета, что траектория, скорость, ускорение относительны, т. е. зависят от выбора системы отсчета, то естественно возникает вопрос: в каких системах отсчета мы будем изучать движения и выяснять законы, управляющие ими?

Здесь выясняется, что разумнее всего в качестве системы отсчета выбрать такую, в которой тела, не подвергающиеся воздействию со стороны других тел, сохраняют состояние покоя или равномерного прямолинейного движения. Другими словами, такие системы, в которых выполняется закон инерции.

Таким образом, понятие об инерциальных системах отсчета возникает сразу же при изучении первого закона Ньютона. Возникает, однако, далеко не простой вопрос: как дать четкое определение инерциальных систем отсчета?

Если мы определяем эти системы как такие, в которых тела, не взаимодействующие с другими, сохраняют состояние покоя или равномерного прямолинейного движения, то как-то необходимо установить, что на тела не действуют внешние силы. Непротиворечивый ответ на этот вопрос заключался бы в следующем: увести наше тело настолько далеко от всех других тел, чтобы они не могли на него подействовать. Однако, не говоря уже о том, что понятие «далеко» не является достаточно определенным, такой способ выбора системы отсчета не представляется практически достаточно интересным.

Можно считать, что тело не находится под действием сил, если сумма сил, действующих на него, равна нулю. Однако, для того чтобы убедиться в том, что равнодействующая всех сил, действующих на тело, равна нулю, необходимо опять-таки воспользоваться первым законом Ньютона. Из этого логического круга выбраться «без потерь» невозможно. По этому поводу В. П. Смилга пишет: «Инерциальность системы мы пытаемся установить, используя тело, свободное от воздействия сил, а свободу от воздействия сил устанавливаем, используя инерциальность системы отсчета. Нехорошо это? Конечно, и еще как.

Что же делать?

Математик не смирился бы с таким положением. Физик же в каком-то смысле просто отмахивается от вопроса.

Он использует сотни и тысячи косвенных соображений, позволяющих полагать, что сумма сил, действующих на данное тело, равна нулю, но в конечном итоге не дает, безусловно, четкого ответа. Порочный круг остается, идеальной аксиоматики нет, но, если бы физик пытался всегда добиться идеальной аксиоматики, физики, очевидно, не существовало бы...

...Возможность более или менее четко сказать, что же такое «инерциальная система», возможность дать хороший рецепт, как логически безупречным экспериментом определить эту систему, появилась только с возникновением общей теории относительности. И в классической механике, и в специальной теории относительности хорошего ответа не было» [1].

Итак, выход остается один, используя косвенные соображения, установить, что на данное тело не действуют внешние силы, а затем определить инерциальную систему как такую, в которой данное тело в отсутствие внешних сил сохраняет неизменным состояние покоя или равномерного прямолинейного движения, или, иначе,

---

[1] В. П. Смилга, О теории относительности. «Физика: близкое и далекое», изд. «Знание», М., 1963, стр. 23—24.

как такую, в которой все ускорения обусловлены действиями каких-либо тел.

Такое определение инерциальной системы отсчета мы встречаем в ряде курсов механики, например у С. Э. Хайкина: «Такие системы координат, в которых все ускорения обусловлены действиями каких-либо тел, носят название инерциальных систем координат» [1].

Но важно не столько определение инерциальной системы, сколько установление эталона такой системы, выяснение того, какую из известных нам систем отсчета можно считать инерциальной. Этот вопрос решается опытом.

Прежде всего выясняется, что система отсчета *земля* не является строго инерциальной системой. Тела, находящиеся на Земле и предоставленные самим себе, начинают перемещаться относительно нее. Это подтверждает известный опыт с маятником Фуко.

Действительно, согласно законам Ньютона маятник должен качаться в одной плоскости. Фактически же по отношению к Земле плоскость качаний маятника медленно поворачивается — это и доказывает, что Земля не является главной системой отсчета ньютоновской механики.

Опыт показывает, что практически достаточно строгой системой является система *звезды,* т. е. система координат, жестко связанная с неподвижными звездами. Одна из звезд принимается за начало координат, затем находят еще три такие звезды, направления на которые из начала координат взаимно перпендикулярны. Эти четыре звезды и представляют собой те тела, с которыми жестко связывается система отсчета *звезды.*

Для большого класса практически важных задач механики отступления системы отсчета *земля* от инерциальности незначительны, и ими можно пренебречь.

Понятие инерциальной системы отсчета не будет казаться надуманным, а предстанет как важная проблема, связанная со свойствами пространства, если мы покажем учащимся, что существуют системы отсчета, в которых закон инерции не соблюдается — изменение скорости в них не всегда является результатом действия

---

[1] С. Э. Хайкин, Физические основы механики, Физматгиз, М., 1963, стр. 121.

других тел на данное тело, т. е. существуют неинерциальные системы отсчета.

Для этого достаточно обратиться к ряду примеров, которые все достаточно часто наблюдали и наблюдают в окружающей нас жизни. Первый закон механики (закон инерции) утверждает, что тело, предоставленное самому себе, т. е. не испытывающее никаких воздействий со стороны других тел, сохраняет по отношению к системе *звезды* состояние покоя или равномерного прямолинейного движения.

Представим себе теперь поезд, начинающий свое движение от станции со все возрастающей скоростью. Останется ли справедливым внутри этого поезда закон инерции для любого тела, свободно лежащего внутри вагона? Конечно, нет. В этом поезде мы наблюдаем явления, которые никак не увязываются с законом инерции. Ведь если мы по-прежнему полагаем, что сила — проявление взаимодействия тел, то мы должны констатировать, что никаких новых тел при возрастании скорости поезда не появилось, а вместе с тем книга, покоившаяся на столике вагона, внезапно слетела с него, пассажиры отклонились назад и т. д. Т. е. внутри такого вагона происходит изменение покоя или равномерного прямолинейного движения тела не только под воздействием со стороны других тел. Следовательно, если системой отсчета мы выберем поезд, движущийся с ускорением, то законы динамики (и в частности, закон инерции) в ней должны формулироваться иначе. Причем их формулировка будет сложнее. Вот почему выше мы обращали внимание на то, что разумнее при формулировке законов динамики выбрать именно такую систему отсчета, в которой выполняется закон инерции, т. е. инерциальную систему отсчета.

Нужно ли в средней школе развивать далее знания о неинерциальных системах отсчета и вводить понятие о силах инерции?

По этому поводу в последнее время высказывались различные точки зрения. Мы по-прежнему придерживаемся той, которая была сформулирована в брошюре об изучении вращательного движения [1] и нашла

[1] Э. Е. Эвенчик, К изучению темы «Вращательное движение» в курсе физики средней школы, изд. АПН РСФСР, М., 1952.

отражение в редакционной статье журнала «Физика в школе»[1].

Если введение понятия о неинерциальных системах отсчета вызывается необходимостью, так как без них не получает достаточной ясности и убедительности понятие инерциальных систем (а формулировка законов динамики без введения систем отсчета физически бессодержательна), то во введении сил инерции такой необходимости нет.

Конечно, в смысле возможности расчетов инерциальная и неинерциальная системы отсчета совершенно равноправны, так как любую задачу можно решить, пользуясь и той и другой системами. Более того, в ряде случаев применение неинерциальной системы быстрее и проще приводит к необходимому результату. Однако методическая ценность этих подходов неодинакова.

Во-первых, силы инерции не являются силами взаимодействия. При их введении в преподавание значительно затрудняется процесс формирования у учащихся понятия о силе. Анализируя механические процессы в инерциальной системе координат, учащиеся всегда могут указать другое тело, которое взаимодействует с данным телом и сообщает ему ускорение. Вводя же силы инерции в неинерциальной системе координат, этого сделать нельзя.

Во-вторых, понимание возможности пользования различными системами отсчета и того обстоятельства, что выбор системы отсчета произволен, уже само по себе предъявляет достаточно высокие требования к уровню развития учащихся. Предъявлять же требования к учащимся, чтобы они умели производить анализ механических явлений с точки зрения наблюдателей в различных системах и производить в том или ином случае выбор такой системы отсчета, неразумно, так как это превосходит возможности учащихся массовой средней школы. Поэтому мы считаем необходимым при изучении закона инерции ограничиться рассмотрением с учащимися вопроса о том, в какой системе отсчета справедлив этот закон, и введением понятий об инерциальных и неинерциальных системах отсчета, используя для этого анализ ряда явлений, которые были разобраны выше.

---

[1] «Физика в школе», 1960, № 3.

§ 2. К вопросу об изучении первого закона динамики

Постановка перед учащимися вопроса о системе отсчета, в которой справедлив закон инерции,— это то принципиально новое, что отличает изучение этого закона в старших классах от его изучения в VI—VII классах.

Мы не касались при этом вопроса о том, какова методика изложения первого закона Ньютона, каким путем учащиеся подводятся к его формулировке. Этот вопрос достаточно хорошо разработан и освещен в методической литературе.

Остановимся лишь еще на одном вопросе. Каждый из законов Ньютона имеет самостоятельное значение, в частности и первый. Иногда приходится слышать утверждение, что первый закон целиком вытекает из второго. Оно основано на том, что при отсутствии внешних воздействий, т. е. когда $F=0$ и $a=0$, тело будет двигаться равномерно и прямолинейно либо находиться в покое. Это, конечно, справедливо. Однако значение первого закона динамики к этому не сводится.

Известно, что движения происходят в пространстве и времени, свойства которых проявляются в законах движения. В основе классической механики Ньютона заложены определенные представления о свойствах пространства и времени, которые выражены в сформулированных им законах.

Некоторые из этих представлений являются общими для классической механики и для специальной теории относительности. Как классическая механика, так и специальная теория относительности пользуются представлением о пустом, однородном и изотропном пространстве.

Первый закон Ньютона как раз и содержит в неявном виде это представление об однородности и изотропности пространства. Вернее, формулировка этого закона эквивалентна утверждению об однородности и изотропности пространства относительно инерциальной системы отсчета.

В самом деле, однородность пространства означает, что в нем нет выделенных точек, которые отличались бы от других. Изотропность пространства означает равноправие его свойств по всем направлениям. Это значит, что если некоторое тело, свободное от внешних воздействий, покоится в какой-то момент времени относительно инерциальной системы и сохраняет состояние покоя во все остальные моменты, то пространство однородно относительно этой системы. Если тело, свободное от внешних воздействий, в начальный момент движется с некоторой скоростью и сохраняет эту скорость неизменной (по величине и направлению) во все последующие моменты, то пространство изотропно. Сами свойства пространства таковы, что они не вызывают изменения величины или направления скорости. Это и выражено в первом законе Ньютона, в котором говорится, что, когда нет внешних воздействий (или сумма их равна нулю), ничто не может изменить скорости тела относительно инерциальной системы. Пространство, как таковое, не может изменить эту скорость.

Это легко понять из такой аналогии. Если на идеальной гладкой горизонтальной поверхности лежит шар, то, в какую бы точку его ни поместили, он будет сохранять состояние покоя. Или если он движется с какой-то скоростью, то свойства этой поверхности (если в ней нет выбоин) сами по себе не могут изменить направления или величины его скорости.

Именно эти представления об однородности и изотропности пространства относительно инерциальной системы отсчета выражены в законе инерции. Поэтому нельзя считать, что он является всего лишь частным случаем второго закона.

Рассуждая об аксиоматике классической механики, мы не предполагаем необходимым и возможным доводить эти рассуждения до учащихся. Не следует думать, что учащимся можно давать, например, определение инерциальных систем отсчета как таких, относительно которых пространство однородно и изотропно, или рассказывать им о том, что существуют такие системы — неинерциальные,— относительно которых пространство и неоднородно, и неизотропно.

По-видимому, об инерциальной и неинерциальной системах отсчета нужно говорить лишь в том плане, как это было показано выше. Однако сам учитель, обучая учащихся законам динамики, должен иметь в виду этот неявно выраженный смысл, скрывающийся в формулировках этих законов. Это поможет ему утвердиться в следующем методическом выводе.

В связи с тем, что понятие *пространство* не имеет никакого содержания, пока не определена система отсчета, мы тем самым еще раз убеждаемся в том, что нельзя говорить с учащимися о первом законе Ньютона, не поставив сейчас же при этом вопроса о системе отсчета, в которой он выполняется.

В заключение обратимся вновь к некоторым вопросам аксиоматики классической механики.

Представления классической механики об однородном и изотропном пространстве существенным образом отличаются от старой, доньютоновой концепции абсолютного пространства.

В древности пространство считали неоднородным, некоторые его точки наделяли особыми свойствами и, поместив в этих точках начало координат, получали привилегированную систему отсчета.

Таким был центр мироздания — неподвижная Земля. «Естественное место» тяжелых тел — центр Вселенной. В таком случае пространство неоднородно; одни места в пространстве располагают тела к покою, другие — к движению. Абсолютное движение — это движение относительно земли. Поэтому можно было непосредственно увидеть абсолютное движение, наблюдая движущиеся тела и абсолютно неподвижное тело отсчета — землю.

«Нужна была колоссальная смелость мысли, чтобы отказаться от такой, казавшейся очевидной, системы мира в пользу нового взгляда, исходившего из понятия бесконечного пустого пространства, без выделенных «естественных мест», не оказывающего влияния на тела, скорость которых меняется лишь в силу взаимодействия с другими телами, а без такого взаимодействия остается постоянной. Идея однородности пространства означала переворот в мировоззрении» [1].

Однородное постранство Ньютона является также абсолютным. Однако абсолютное пространство Ньютона не содержит абсолютно неподвижного материального тела, к которому можно было бы прикрепить абсолютные оси координат. Ньютон писал в «Математических началах натуральной философии», что абсолютное

---

[1] Б. Г. Кузнецов, Беседы о теории относительности, изд. АН СССР, М., 1964, стр. 62.

пространство не может быть предметом наблюдения, наблюдаемы лишь относительные положения тел. Однако появление сил инерции в системах, движущихся с ускорениями, он считал тем динамическим эффектом, который позволял зарегистрировать абсолютное движение в абсолютном пустом пространстве.

Абсолютный характер ускоренного движения отмечается не сопоставлением положения движущегося тела с положением другого абсолютно неподвижного тела — невозможность этого была ясна,— а внутренними динамическими эффектами, возникающими при таком движении, т. е. появлением сил инерции. В абсолютном пустом пространстве нужно было видеть причину реальных процессов — появление сил инерции.

Ньютон смог построить свою систему классической механики без понятия абсолютно неподвижного тела, допуская мгновенное действие одного тела на другое через пустоту. Законы динамики были сформулированы Ньютоном относительно абсолютного пустого пространства.

Однако «пространство, в котором не существует ни одного места, которое могло бы быть фиксировано при помощи каких бы то ни было фактических средств, представляется по крайней мере весьма смутной и абстрактной идеей, а не просто ящиком, наполненным материальными объектами» [1].

Нам нет необходимости вводить в рассмотрение эту абстракцию — абсолютное пустое пространство. Именно поэтому в качестве системы отсчета, в которой выполняются законы динамики, мы ввели систему *неподвижные звезды,* как пример инерциальной системы, в которой они выполняются достаточно точно.

Далее при изучении принципа относительности будет показано учащимся, что существует бесконечное множество эквивалентных систем, совершающих равномерное прямолинейное движение относительно друг друга, в которых законы динамики выполняются в своей классической форме.

Развитие физики показало, что проблема пространства тесно связана с механикой. Не пространство сущест-

---

[1] М. Борн, Эйнштейновская теория относительности, изд. «Мир», М., 1964, стр. 91.

вует и отпечатывает свою форму на вещах, но вещи и физические законы, управляющие ими, определяют пространство. Эта точка зрения получила свое полное обоснование в общей теории относительности Эйнштейна.

§ 3. Второй закон динамики. Понятие о массе

Масса является одним из основных понятий механики. В основе классической механики Ньютона лежит понятие о массе как об абсолютной величине, т. е. как о величине неизменной, не зависящей от скорости движения относительно той системы отсчета, в которой ведется измерение, и от выбора системы отсчета.

Относительность понятия массы, ее зависимость от скорости раскрыты в теории относительности и экспериментально обнаружены на движении быстрых электронов.

Вывод формулы этой зависимости возможен в средней школе. Однако целесообразно его проводить не в курсе механики, а значительно позднее, например после изучения оптики, где желательно ввести отдельную тему программы — «Вопросы специальной теории относительности». Вместе с тем уже при изучении классического понятия массы в механике мы имеем возможность показать границы применимости этого понятия, представить его как частный случай более общего понятия. Эта задача предъявляет определенные требования к методике формирования понятия массы при изучении механики.

Понятие о физической величине никогда не может рассматриваться в отрыве от тех основных законов, которым подчиняется рассматриваемая физическая величина и которые устанавливают ее взаимосвязь с другими физическими величинами. К представлению о массе пришли, исследуя явление инерции. Было установлено, что все тела обладают тем объективным свойством, что каждое из них под влиянием определенного внешнего воздействия приобретает совершенно определенное ускорение, т. е. совершенно определенным образом меняет свою скорость. Это свойство каждого физического тела может быть охарактеризовано физической величиной, называемой инертной массой. Различные тела обладают одинаковой по величине массой, если оказывается, что при одних и тех же условиях под влиянием одинакового внешнего воздействия они приобретают одинаковое ускорение.

К представлению о массе ведет изучение и другой группы явлений — явлений тяготения или гравитации. Сила тяготения между телами определяется объективным свойством тел, которое характеризуется физической величиной — гравитационной массой.

Если закон всемирного тяготения рассматривать изолированно от второго закона динамики, то вытекающее из него понятие гравитационной массы будет являться новой физической величиной.

Однако, исходя из факта одинаковости для всех тел ускорения, приобретаемого ими у поверхности земли под влиянием силы притяжения, обе массы отождествляются, так как этим доказывается, что обе массы не только всегда строго пропорциональны, но и всегда существуют совместно. Нет тела, обладающего только гравитационной массой или только инертной массой.

Совокупность большого числа разнообразных фактов приводит нас к представлению о физической величине, массе, проявляющейся как в инерционных явлениях, так и в явлениях гравитации.

Тождественность гравитационной и инертной масс полностью выясняется в теории тяготения Эйнштейна. В уравнениях этой теории фигурирует одна физическая величина, проявляющаяся и в качестве массы инертной, и в качестве массы гравитационной.

Формирование понятия о массе, таким образом, можно начинать либо с изучения инерционных явлений, либо с явлений гравитации. Однако структура современного курса физики в школе складывается более рационально, если изучение инерционных явлений предшествует изучению тяготения. Кроме того, поставленная нами задача разъяснения учащимся относительности понятия массы решается в том случае, если основным является его определение из явлений инерции. Полное представление о массе составляется на основе всей совокупности фактов, включающих в себя и инерционные, и гравитационные явления.

Способ обоснованного введения и измерения массы при изучении механики связан с изучением второго закона динамики. Принципиальное значение второго закона Ньютона заключается в том, что он устанавливает прямую пропорциональность между ускорением и силой [1].

Методика установления этой зависимости известна. Она устанавливается опытным путем. На одном из применяемых в школе приборов, например на приборе Румянцева (рис. 18), проводят ряд опытов с движением

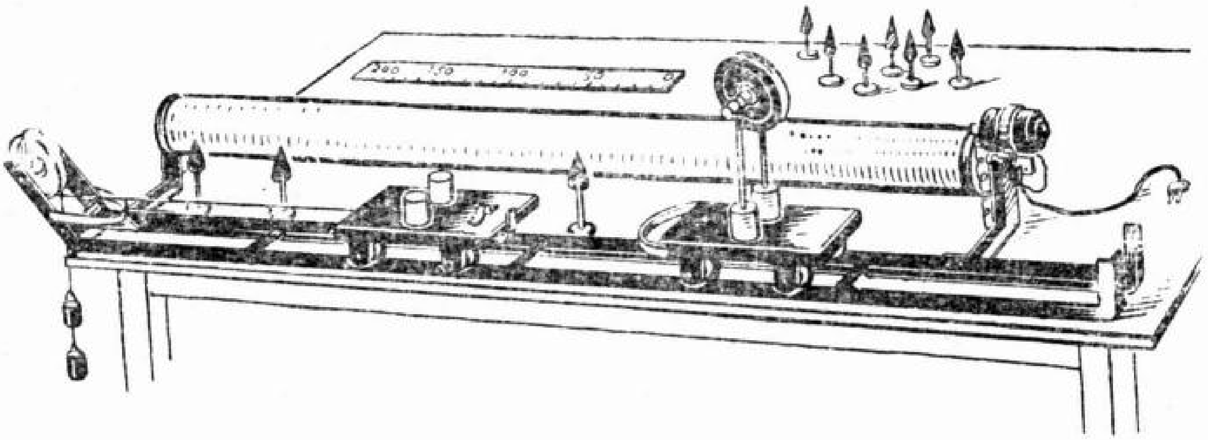


Рис. 18

тележки под действием различных сил. Изменение сил, действующих на тележку, производится путем изменения веса грузов, натягивающих нить. Ускорения, приобретаемые тележкой, легко вычисляются по пройденному пути (из записи движения на барабане) и времени движения.

Из этих опытов устанавливают, что ускорение, приобретенное телом, изменяется пропорционально действующей на него силе, или, иными словами, отношение $\frac{F}{a}$ для данного тела является величиной постоянной.

Это записывается в виде:

$$\frac{F}{a} = m,$$

где через m обозначается некоторая постоянная для данного тела величина.

---

[1] Отметим, что в формулировке второго закона, данной Ньютоном, в явной форме не содержится понятия массы.

Не выясняя пока, что собой представляет эта величина, проделывают подобные опыты с другим телом (например, с нагруженной тележкой) и находят, что отношение $\frac{F}{a}$ опять остается величиной постоянной, пока мы прикладываем различные силы к одному и тому же телу, но оно уже для этого тела имеет иную величину, чем для первого.

Таким образом устанавливают, что отношение силы F к вызываемому ею ускорению a, обозначенное нами через m, зависит только от того, к какому телу приложена эта сила. Следовательно, величина $m = \frac{F}{a}$ характеризует какое-то динамическое свойство данного тела.

Остается выяснить, какое именно. Для этого ставится на том же приборе ряд опытов: на два разных тела — пустую и нагруженную тележку — действуют одинаковыми силами. Одно тело при этом приобретает большее ускорение, второе — меньшее.

Если вначале обе тележки покоились, то через один и тот же промежуток времени первое тело успеет набрать значительно бо́льшую скорость.

Про второе тело говорят, что оно инертнее первого, так как требуется большее время для того, чтобы оно приобрело под действием той же силы ту же скорость, что и первое, или, иначе, нужна большая сила, чтобы сообщить ему такое же ускорение.

Всякое тело инертно, т. е. всегда требуется какой-то промежуток времени для разгона его до определенной скорости (или для торможения) под действием силы. Никакая сила не может мгновенно изменить скорость тела. Чем больше этот промежуток времени разгона (или торможения) под действием данной силы, т. е. чем меньшее ускорение оно приобретает под действием данной силы, тем инертнее тело.

Количественной мерой инертности служит, таким образом, постоянное для данного тела отношение $\frac{F}{a}$, которое обозначается буквой m и называется массой.

Масса есть мера инертности, равная отношению любой приложенной к телу силы к вызываемому ею ускорению.

Отсюда для второго закона Ньютона получается выражение:

$$F = ma, \text{ или } a = \frac{F}{m},$$

т. е. *ускорение любого тела совпадает по направлению с приложенной к нему силой, а по величине прямо пропорционально силе и обратно пропорционально массе этого тела.*

При такой методике основное содержание второго закона динамики — зависимость ускорения от приложенной к телу силы — устанавливается до введения понятия массы. Последнее выясняется уже на основе установленного опытом соотношения.

В некоторых учебниках и пособиях по курсу физики поступают иначе. Опираясь на понятие массы как количества вещества, устанавливают на опыте зависимость между ускорением и силой для одного и того же тела, а затем между ускорением и массой разных тел под действием одной и той же силы. Соединяя полученные два вида зависимостей, получают выражение для второго закона Ньютона.

Этот путь представляется неприемлемым по следующим причинам.

Определение массы как количества вещества ничего, по существу, не определяет. Оно подвергается справедливой критике в научной и педагогической литературе. В самом деле, как можно сравнить «количество вещества», например, электрона и протона?

Макс Борн по этому поводу пишет: «В бытовом смысле слово *масса* означает нечто вроде количества вещества или материи; эти понятия сами по себе не определяются далее. Понятие вещества считается самоочевидным. В физике, однако,— и мы должны это подчеркнуть самым решительным образом — слово *масса* не имеет иного смысла, кроме того, которое ему придает формула» [1]. (Здесь имеется в виду формула $m = \frac{Ft}{\Delta v}$.)

«Количество вещества» не является определенным физическим понятием. Мы не располагаем ни особыми

---

[1] М. Борн, Эйнштейновская теория относительности, изд. «Мир», М., 1964, стр. 48.

единицами, ни специальными приборами, ни способами для его измерения. Для измерения «количества вещества» мы должны воспользоваться какими-то определенными физическими величинами. В некоторых случаях это может быть объем; более общей мерой является масса.

Масса является вполне определенной физической величиной, измеряющей наиболее общие свойства тел. Она, в отличие от «количества вещества», имеет вполне определенные способы измерения.

В рамках классической механики по величине массы можно судить о количестве вещества, исходя из того, что согласно классическим представлениям увеличить массу тела или уменьшить ее можно лишь путем присоединения к нему или отделения от него некоторой его части.

Таким образом, о «количестве вещества» можно судить по массе, но невозможно обратное: пытаться массу определять через весьма неопределенное понятие «количество вещества». Отмечая неопределенность понятия «количество вещества», мы имеем в виду то, что это понятие не отражает каких-либо определенных свойств материи, оно непосредственно не входит ни в какие физические закономерности. Не приходится при этом ссылаться на применение этого термина самим Ньютоном. Независимо от того, как он пользовался этим термином, понятие массы он связывал лишь с инертными и гравитационными свойствами тел.

К понятию инертной массы можно было бы прийти из второго закона Ньютона, установленного в форме $\frac{Ft}{\Delta v}=m$, полученной из опытов, до его вывода в форме $F=ma$.

Такой путь введения понятия инертной массы в средней школе методически менее разработан и не изложен ни в одном из элементарных учебников физики.

Один из возможных вариантов методики такого подхода можно извлечь из книги М. Борна[1], тем более интересного, что он принадлежит одному из крупнейших физиков современности.

---

[1] М. Борн, Эйнштейновская теория относительности, изд. «Мир», М., 1964, стр. 46—50.

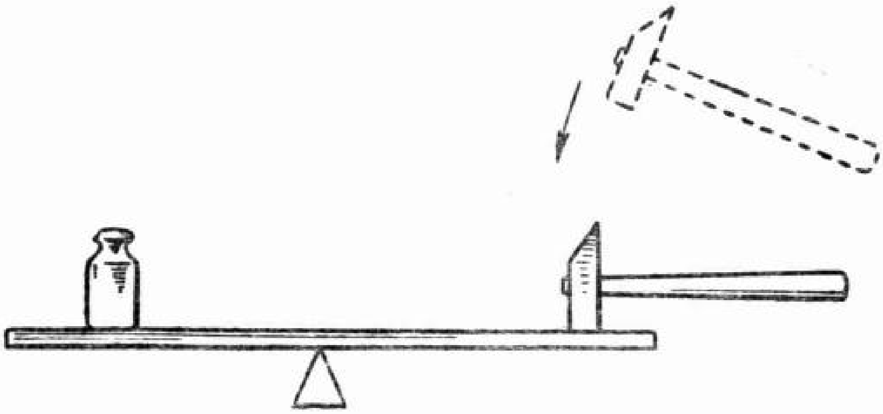


Рис. 19

Последовательность изложения в этом случае такова. Вначале при помощи эксперимента с импульсными весами (рис. 19) вводится понятие импульса силы.

Опыт показывает, что равновесие балансира сохраняется тогда, когда постукивание молотком по балансиру производится слабее, но чаще или сильнее, но реже. Следовательно, если для удержания равновесия приходится производить n коротких ударов в секунду (каждый из которых длится $\tau = \frac{1}{n}$ *сек*), то они вместе производят такое же действие, как сила F, равная весу груза, действующая в течение всей секунды.

Поэтому физическая величина, характеризующая действие каждого такого короткого удара и называемая импульсом силы, равна n-й части F:

$$\text{импульс силы} = \frac{F}{n} = F\tau.$$

Введя понятие импульса силы и получив метод его измерения, можно перейти к определению тех изменений скорости, которые получают различные тела под влиянием одинаковых импульсов.

Для этого ставится эксперимент, в котором гладкий шар на горизонтальном столе приобретает определенную скорость (из состояния покоя) под влиянием ударов молотка, вращающегося вокруг горизонтальной оси (рис. 20). Если удары мо-

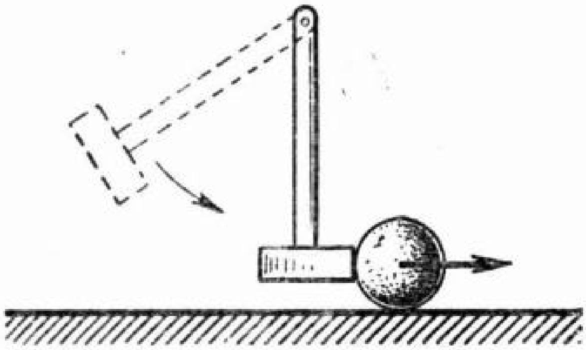


Рис. 20

лотка предварительно прокалиброваны на импульсных весах, то легко установить, что между импульсом силы и изменением скорости шара существует прямо пропорциональная зависимость. Если же этот эксперимент проделать с разными шарами (например, деревянными шарами равного объема, но сплошным и полым), то под действием одинаковых импульсов они будут приобретать разные скорости из состояния покоя или по-разному изменять скорости, если они их имели до удара.

Отношение импульса к изменению скорости $\frac{Ft}{\Delta v} = m$ будет для этих шаров различным, оставаясь постоянным для каждого из них. Отсюда следует тот же смысл инертной массы, как и из отношения $\frac{F}{a} = m$.

Завершением изучения вопроса о массе является рассмотрение границ применимости классического понятия массы и выяснение того, что в теории относительности, где рассматривают движения со скоростями, близкими к скорости света, масса не является постоянной величиной.

§ 4. Методика введения понятия силы

Введение понятия инертной массы из второго закона Ньютона (в любой его форме) требует, чтобы до его изучения были независимым от него путем введены понятия ускорения и силы.

Понятие ускорения формируется у учащихся уже при изучении кинематики. Несколько сложнее обстоит дело с введением понятия силы. Обсудим этот вопрос.

Понятие о силе вытекает уже из первого закона Ньютона. В самом деле, в этом законе утверждается, что тело сохраняет неизменной свою скорость, если оно не взаимодействует с другими телами. Но если на него действуют другие тела, то оно изменяет скорость. Следовательно, изучение первого закона Ньютона приводит нас к необходимости изучать взаимодействия тел, в результате которых изменяются их скорости, т. е. появляются ускорения.

Ряд наблюдений и самых простых опытов показывает, что ускорения тел всегда вызываются действием на данное тело каких-либо других тел, если производят измерения ускорения и весь анализ явления в инерциальной системе отсчета. Причем действия тел носят взаимный характер — характер взаимодействия.

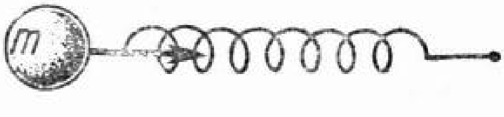


Рис. 21

Термин «сила» — это есть обобщенное обозначение меры взаимодействия, в результате которого взаимодействующие тела сообщают друг другу ускорения. Таков смысл понятия силы в механике Ньютона.

Однако этого мало. Кроме такого определения силы, необходимо указать способ ее измерения. Только после этого можно пользоваться понятием силы для экспериментального вывода второго закона Ньютона.

И здесь мы встречаемся с определенной логической (а следовательно, и методической) трудностью: нужно дать способы измерения сил до изучения второго закона динамики и независимо от него, т. е. когда динамического метода измерения сил мы еще учащимся сообщить не можем.

Во всех наиболее известных курсах механики для высшей школы [1], а также в ряде элементарных учебников [2] этот вопрос решается следующим образом.

Для измерения сил устанавливается эталон силы и затем дается способ сравнения других сил с этим эталоном. В качестве эталона может быть выбрана сила, с которой вполне определенная пружина, растянутая до некоторой длины, действует на прикрепленное к ней тело (рис. 21).

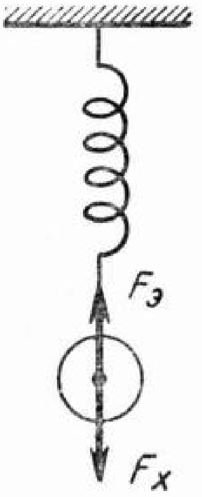


Рис. 22

Способ сравнения других сил с этим эталоном состоит в следующем: допустим, что к телу приложены одновременно две силы, направленные противоположно. Например, сила притяжения к земле тянет его вниз, а растянутая пружина — вверх (рис. 22). В этом случае либо одна из двух сил перетянет и тело начнет двигаться с ускорением в ее сторону, либо же обе силы уравновесят друг друга и тело

---

[1] С. Э. Хайкин, Физические основы механики, Физматгиз, М., 1963, стр. 77—79; С. П. Стрелков, Механика, Гостехиздат, М., 1956, стр. 48—55.

[2] «Элементарный учебник физики», под ред. акад. Г. С. Ландсберга, т. I, изд. «Наука», М., 1966, стр. 80—89.

останется в покое. В последнем случае говорят, что силы равны по величине.

Итак, принцип, который используется здесь для сравнения некоторой силы с эталоном, состоит в том, что при равновесии все силы взаимно уравновешиваются; в этом состоит ньютоновский принцип равенства действия и противодействия.

Приведенным способом можно лишь установить, равна ли измеряемая сила F_x эталону силы $F_э$, но нельзя измерить любую силу.

Возможность измерения сил любой величины методом сравнения вытекает из следующего рассуждения. Силу-эталон можно воспроизводить в любом числе экземпляров (описанным выше методом, которым было установлено равенство двух сил). Располагая несколькими эталонами силы $F_э$, можно измерять силы, величина которых не равна эталону силы.

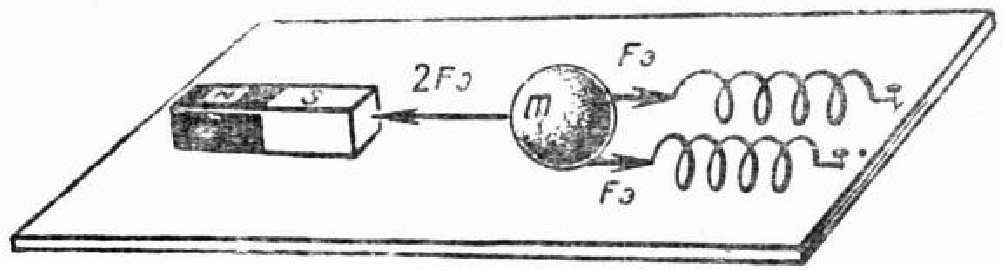


Рис. 23

Например, если сила притяжения магнита уравновешивает одновременно силы, с которыми действуют две или три пружинки-эталона, расположенные параллельно, то считают, что она вдвое или соответственно втрое больше любой из них (рис. 23). Таким путем можно воспроизводить эталоны $2F_э$, $3F_э$ и т. д.

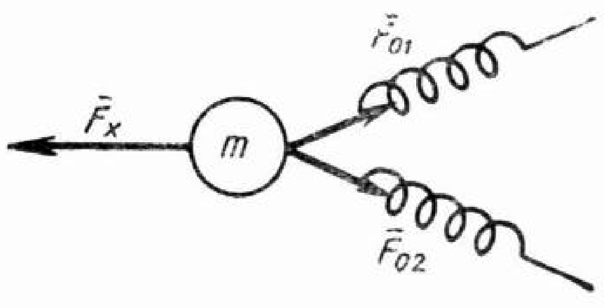


Рис. 24

Для воспроизводства эталонов, меньших $2F_э$, нужно пружинки расположить под углом друг к другу (рис. 24). Тогда $\bar{F}_x = -(\bar{F}_{01} + \bar{F}_{02})$ [1].

[1] Практически, конечно, поступают иначе. Любую подходящую пружину калибруют при различных ее растяжениях.

Однако в этих последних рассуждениях имеется некоторая логическая брешь, на которую указал академик И. К. Кикоин в своих выступлениях на заседаниях программной комиссии по физике.

В самом деле, аддитивность сил (две пружинки-эталона, расположенные параллельно, действуют с силой вдвое большей, чем одна) не вытекает непосредственно из законов Ньютона. Это положение является некоторым дополнительным постулатом, который приходится вводить при указанной выше методике изложения вопросов динамики.

В связи с этим возможна иная методика введения понятий о массе и силе, при которой эта логическая трудность отсутствует. Далее мы изложим кратко предложенный И. К. Кикоиным путь формирования понятий о массе и силе. Забегая несколько вперед, укажем, что по этой методике вначале, до силы и второго закона Ньютона, вводится понятие о массе — на основе явления отдачи. Затем дается понятие об импульсе (mv) и аддитивности импульса, а сила вводится как скорость изменения импульса $\left(F = \frac{\Delta mv}{\Delta t}\right)$.

В этом случае, конечно, аддитивность сил вытекает из установленной опытом аддитивности импульса и указанная выше трудность отпадает.

Критика принятого метода введения понятия о силе и способа ее измерения (до второго закона Ньютона), безусловно, справедлива, так как в этом случае приходится пользоваться дополнительным постулатом, правда, безусловно, справедливым и совершенно очевидным. Но нельзя не признать, что приучать учащихся доверять очевидным положениям нежелательно. Эйнштейн говорил, что здравый смысл — это тот груз предрассудков, который человек приобретает до 18 лет.

Вместе с тем в защиту принятой методики можно высказать ряд аргументов. Понятие силы, безусловно, ближе и понятнее учащимся, чем понятие массы. Оно проистекает из субъективного чувства напряжения, которое мы испытываем, поднимая тяжелое тело или растягивая пружину. «Мы говорим, что из двух людей сильнее тот, который может поднять более тяжелый камень или растянуть более тугой лук. Эта мера силы, с помощью которой Улисс (Одиссей) завоевал свое право среди соперников и которая, несомненно, играет большую роль в историях о древних героях, сама уже содержит зерно объективизации субъективного понятия усилия. Следующим шагом был выбор единицы силы и измерение всех сил в терминах их отношений к этой единице, т. е. релятивизация понятия силы» [1].

Поэтому представляется гораздо более доступной учащимся такая методика изучения динамики, когда вначале развивается близкое учащимся из их жизненного опыта понятие силы, дается измерение ее из принципа равновесия (с тем, чтобы после изучения второго закона динамики дать и динамический способ ее измерения как скорость изменения импульса), а затем на понятии силы уже строится понятие массы, которое получается из второго закона. Поэтому от описанной методики мы не считаем целесообразным отказываться.

Вместе с тем справедливость критических замечаний к указанной линии развития понятий заставляет нас обратиться ниже (§ 8) и к другой возможной методике изложения основных понятий динамики.

§ 5. Границы применимости классического понятия массы. Зависимость массы от скорости

Одно из отличий релятивистской механики от механики Ньютона заключается, как известно, в пересмотре классического понятия массы как абсолютной величины.

В релятивистской механике приписывается разная масса совершенно тождественным между собой телам, единственное физическое различие между которыми заключается в том, что одно из них в данной системе отсчета движется с малой скоростью, а другое — с околосветовой.

На протяжении значительного времени обучения учащихся мы приучаем их к тому, что масса — одно из наиболее важных свойств тел — всегда остается неизменной, в частности она не зависит от скорости.

---

[1] М. Борн, Эйнштейновская теория относительности, изд. «Наука», М., 1964, стр. 26.

Откуда следует это представление? Оно вытекает из того, что скорость тела при действии на него постоянной силы растет прямо пропорционально времени действия этой силы, т. е. ускорение, приобретаемое данным телом под действием постоянной силы, постоянно на протяжении всего времени действия силы. Это ускорение не зависит от того, в каких пределах меняется скорость, подействовала ли сила на тело, уже имевшее скорость, или на покоящееся тело.

Таковы известные учащимся экспериментальные факты классической механики, имеющей дело со скоростями, далекими от световых, лежащие в основе представления о постоянстве инертной массы. Ведь если ускорение постоянно, не зависит от скорости тела, то и отношение $\frac{F}{a}$, измеряющее инертную массу, является величиной постоянной, не зависящей от скорости. Именно так и было введено понятие инертной массы.

Однако формирование понятия об инертной массе на этом не должно закончиться. Уместно поставить перед учащимися вопрос, заставляющий проанализировать, откуда следует исходное представление о том, что скорость тела растет прямо пропорционально времени действия на него силы. Это утверждение основано на обычном правиле сложения скоростей. Ведь для того, чтобы получить значение скорости в конце второй, третьей, четвертой и т. д. секунды, мы должны сложить скорость, которую тело имело в конце предшествующей секунды, с изменением скорости за последующую секунду. Причем это сложение производится по классическому закону сложения скоростей.

При изучении кинематики было уже выяснено, что классический закон сложения скоростей имеет определенные границы применимости; им можно пользоваться лишь до тех пор, пока приобретаемые телом скорости не станут сравнимы со скоростью света.

Складывая скорости по релятивистскому закону, всегда получают результат несколько меньший, чем при применении классического правила сложения. Отсюда следует, что при достижении больших значений скорость уже будет расти не пропорционально времени, а медленнее и тем медленнее, чем ее величина будет ближе к скорости света.

Замедление возрастания скорости под действием постоянной силы при больших значениях скорости показывает, что ускорение не остается постоянным — оно уменьшается. Следовательно, отношение $\frac{F}{a}$ по мере приближения скорости тела к скорости света увеличивается. А это значит, что масса тела растет с ростом скорости, стремясь к бесконечности, когда скорость тела приближается к скорости света.

Такой анализ вполне доступен учащимся. Уяснение его обеспечивается тем, что в кинематике достаточно подробно анализируется релятивистский закон сложения скоростей.

Объяснение зависимости массы от скорости не требует вывода количественной зависимости релятивистской массы от скорости. Однако учащимся желательно показать графически зависимость массы тела от скорости (рис. 25), указав им на то, что эта зависимость количественно была подтверждена прямыми экспериментами. В современных экспериментальных установках есть возможность разгонять элементарные частицы до очень больших скоростей. В специальных ускорителях электроны разгоняются до скоростей, отличающихся от скорости света меньше, чем на 30 *км/сек*. Так, например, масса быстрого электрона, вылетающего из синхротрона, превышает массу покоящегося протона.

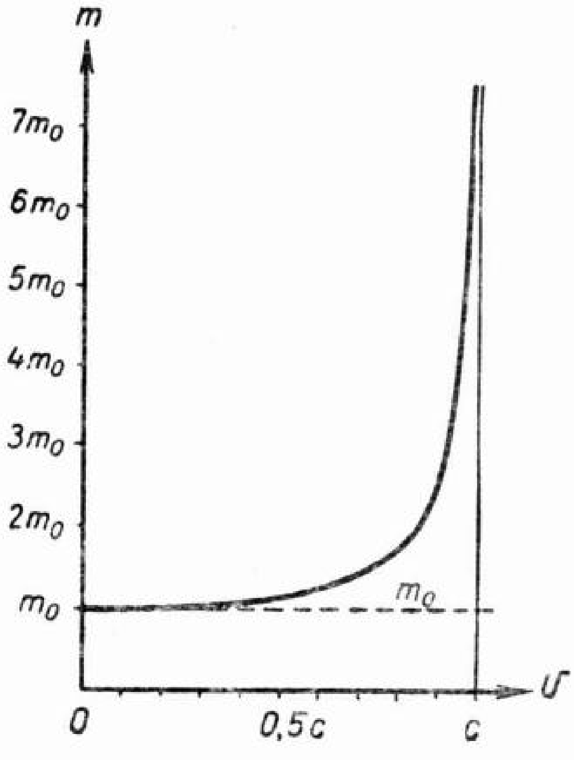


Рис. 25

Тело, движущееся со скоростью 240 000 *км/сек* относительно данной системы отсчета, имеет массу в $^{10}/_{6}$ раза большую, чем в том случае, если оно покоится в этой системе отсчета. Однако со всей определенностью учащимся нужно показать, что при обычных скоростях, с какими движется современный транспорт и детали работающих машин, зависимость массы от скорости практически совсем не сказывается. Так, например, при скорости порядка 1000 *км/ч* (скорость реактивного самолета) масса увеличивается всего лишь на 0,0000000005%.

Обсуждение с учащимися полученного вывода поможет им глубже понять относительность ряда научных понятий, в частности и классического понятия массы. Тот факт, что при малых скоростях это понятие является достаточно точным и позволяет правильно производить все инженерные расчеты, показывает, что это понятие имеет объективное содержание. Это дает возможность раскрыть учащимся соотношение между относительной и абсолютной истинами в историческом процессе развития знаний.

В заключение необходимо остановить внимание еще на одном вопросе. При объяснении понятия инертной массы, учащимся иногда говорят, что этой величиной можно пользоваться как мерой количества вещества. Но эта возможность обеспечивается лишь тем, что массу можно было рассматривать как постоянную величину, изменять которую можно было, лишь отделяя или присоединяя к ней какую-то часть.

Обнаруженная зависимость инертной массы от скорости показывает, что использование этого понятия как меры количества вещества также имеет границы применимости. Ведь иначе пришлось бы признать, что увеличение скорости тела, в том числе и в результате перехода к другой системе отсчета, равносильно добавлению к нему некоторого количества вещества. А это, конечно, абсурдно.

Одно и то же тело по отношению к разным системам отсчета ведет себя более инертно или менее инертно. Относительно той системы отсчета, в которой оно движется с большей скоростью, оно обладает большей массой, ускорить его в этой системе отсчета труднее, чем относительно той системы, где оно покоится или движется медленно. Однако в обоих случаях речь идет об одном и том же теле, в котором никаких различий в строении не произошло.

Таким образом, при больших скоростях, когда зависимостью массы от скорости уже пренебрегать нельзя, исключается возможность использования ее в качестве хотя бы условной меры количества вещества.

§ 6. Принцип относительности Галилея

Понятие относительности механического движения в преподавании вопросов динамики находит свое особенно яркое выражение и развитие в изучении механического принципа относительности (принципа относительности Галилея). Подготовка к его изучению была проведена в кинематике, когда была раскрыта относительность ряда кинематических понятий (координаты точки, траектория, скорость), а также абсолютность других понятий, таких, как расстояние между телами, промежуток времени, ускорение (последнее только в системах, движущихся равномерно и прямолинейно друг относительно друга).

Дальнейшая подготовка к изучению классического принципа относительности проводится уже в динамике, когда при изучении закона инерции ставится вопрос о том, по отношению к какой системе отсчета справедлив этот закон, т. е. по отношению к какой системе отсчета тело, предоставленное самому себе, сохраняет состояние покоя или равномерного и прямолинейного движения.

Оказывается, что этот закон точно выполняется по отношению к системе отсчета *звезды,* а также почти точно, с небольшими отклонениями, по отношению к системе *земля.* Именно в этих системах отсчета — инерциальных — законы динамики, в частности первый, формулируются наиболее просто, и именно по отношению к ним они и были сформулированы. Что же касается такой системы отсчета, как, например, останавливающийся или ускоряющий свое движение поезд, то по отношению к такой системе этот закон не имеет места. Пользуясь этими системами отсчета, мы должны были бы утверждать, что тело, предоставленное самому себе, в какой-то момент времени начинает двигаться с некоторым ускорением без всякой видимой причины, так как мы не можем указать при этом действующих на него тел, которые вызвали изменение движения. Налицо, таким образом, явное нарушение первого (а значит, и второго) закона Ньютона.

Постановкой вопроса о системах отсчета при изучении законов динамики и выяснением того, что они справедливы лишь в определенным образом выбранных системах, заканчивается подготовка к изучению принципа относительности.

Дальше логически вытекает вопрос, который может быть поставлен перед учащимися: существует ли лишь одна инерциальная система, в которой справедливы законы динамики, или имеется множество таких систем, в которых эти законы формулируются совершенно тождественно?

Учащиеся уже знают, что законы динамики выполняются точно в главной системе — системе *звезды* и почти точно в системе *земля*. Кроме того, они знают, что в системе *останавливающийся поезд* эти законы не имеют места. Поэтому выясняем, как будут формулироваться эти законы, т. е. как будут протекать все механические явления в системе, которая движется равномерно и прямолинейно относительно указанной выше инерциальной (или почти инерциальной) системы *земля*, например в равномерно и прямолинейно движущемся поезде, теплоходе и т. д.

Жизненный опыт, имеющийся у учащихся, помогает нам подготовить их к правильному ответу: в поезде, который движется равномерно и прямолинейно, никаких отступлений от законов динамики мы не замечаем. Лежащая на полке вагона книга сохраняет состояние покоя относительно поезда, продолжая равномерное прямолинейное движение по отношению к земле. А оба эти утверждения одинаково хорошо согласуются с законом Ньютона.

Если под действием силы тело приобретает некоторое ускорение в системе *поезд*, то это ускорение остается тем же в системе *земля*, так как сам поезд движется с постоянной скоростью. В любой из указанных систем можно с одинаковым успехом провести все рассуждения, измерения и вычисления, необходимые для определения массы, ускорения и действующих сил; результаты получатся одни и те же. А это значит, что второй закон Ньютона одинаково точно выполняется в системе *земля* и в системе *равномерно и прямолинейно движущийся поезд*, лишь бы эта скорость сохранялась постоянной. Силы в указанных системах отсчета одинаковы, поэтому одинаково хорошо выполняется и третий закон.

Можно привести учащимся выдержку из диалога Галилея, в которой красочно описываются наблюдения, подтверждающие то, что все механические явления в таких системах, движущихся равномерно и прямолинейно друг относительно друга, протекают одинаково.

«Заключите себя с каким-нибудь приятелем в зале под палубой какого-нибудь большого корабля... и заставьте привести в движение корабль с какой угодно быстротой. И вот (если только движение будет равномерное) вы не заметите ни мельчайшей перемены во всех явлениях и ни по одному из них не в состоянии будете судить — движется ли корабль или стоит на месте: вы, прыгая, будете проходить по полу те же самые пространства, как и при покое корабля, то есть вы не сделаете — оттого что корабль движется весьма быстро — бо́льших прыжков к корме, чем к носу корабля, хотя в то время, когда вы находитесь в воздухе, пол, находящийся под вами, бежит в сторону, противоположную вашему прыжку, и, бросая какую-нибудь вещь товарищу, вам не нужно будет с большей силой кидать ее, если он будет около носа корабля, вы же около кормы, чем если бы вы стояли наоборот; капельки из подвешенной к потолку кружки с водой будут падать вертикально на пол и ни одна не упадет по направлению к корме, хотя, покуда капля находится в воздухе, корабль уходит вперед... Мухи будут продолжать свои полеты безразлично во все стороны, и никак не случится, чтобы они (как будто уставши следовать за быстрым бегом корабля) собрались к той стороне, которая ближе к корме» [1].

Эти рассуждения об опытах в закрытых лабораториях (движущейся и покоящейся относительно земли) Галилей приводил для того, чтобы объяснить, почему обитатели Земли совершенно не ощущают ее очень быстрого движения вокруг Солнца. Ведь именно на то, что мы совершенно не замечаем движения Земли, опирались церковники в борьбе против гелиоцентрической системы мира.

Эту выдержку из диалогов Галилея достаточно хорошо понимают учащиеся, так как она опирается на их жизненный опыт. Все знают, что, когда поезд идет действительно прямолинейно и равномерно (без толчков и качаний), пассажиры этого движения не ощущают. Они могут производить в вагоне любые механические опыты (играть в мяч, бильярд), не принимая во внимание движение самого поезда, т. е. точно так, как они делали бы это на земле.

Одинаковость протекания механических явлений во всех системах, движущихся равномерно и прямолинейно

---

[1] Выдержка из диалогов Галилея цитируется по книге К. А. Путилова, Курс физики, т. I, Учпедгиз, М., 1962, стр. 75.

друг относительно друга, означает и тождественность законов динамики в них, их абсолютность для всех таких систем. Поскольку величина вектора скорости движения системы никак не сказывается на протекании явлений в ней, то отсюда следует логический вывод — инерциальных систем можно построить бесконечное множество.

Законы Ньютона справедливы не в одной инерциальной системе (*звезды* или *земля*), а в множестве таких систем, в целом классе инерциальных систем отсчета. Любая система отсчета, движущаяся равномерно и прямолинейно относительно инерциальной системы отсчета, тоже является инерциальной.

Итак, из всего многообразия различных систем отсчета физически выделяется группа инерциальных систем, так как в них, и только в них, выполняются законы Ньютона. Но между собой все инерциальные системы физически равноценны; ни одна из них не имеет какого-либо принципиального преимущества перед другими.

В этих рассуждениях, проводимых в форме беседы с учащимися и вполне доступных их пониманию, уже содержатся все возможные формулировки классического принципа относительности.

Итак, физический смысл принципа относительности заключается в том, что результаты всех механических экспериментов, производимых в двух лабораториях — в инерциальной системе *звезды* или в любой другой, движущейся равномерно и прямолинейно относительно нее,— будут совершенно тождественны. Название «принцип относительности» указывает на то, что тождественность законов движения во всех инерциальных системах отсчета исключает возможность признать движение относительно одной из них абсолютным, и тем самым утверждает принципиальную неразличимость покоя и равномерного прямолинейного движения, т. е. относительность движения. Из него непосредственно вытекает, что в мире не существует абсолютно неподвижного тела — всякий покой относителен.

Как известно, в курсах физики высшей школы и в научной литературе можно встретить следующие формулировки принципа относительности:

законы механики формулируются одинаково относительно всех инерциальных систем отсчета;

никакие механические опыты и наблюдения, произведенные внутри инерциальной системы, не дают возможности решить вопрос, имеет ли вся система в целом прямолинейное и равномерное движение или же она покоится;

любая система отсчета, равномерно и прямолинейно движущаяся относительно инерциальной, тоже инерциальна.

Совершенно ясно, что все эти формулировки совершенно равноправны и каждая из них может привести к остальным.

В самом деле, если любая система, движущаяся равномерно и прямолинейно относительно инерциальной, тоже инерциальна (III формулировка), то в ней должны выполняться все законы динамики, а следовательно, все механические явления протекают внутри этих систем одинаково и не дают возможности судить о том, движется эта система равномерно и прямолинейно или покоится (II формулировка).

Однако, несмотря на равноправие всех формулировок, учащиеся значительно лучше уясняют себе физический смысл принципа относительности из первых двух, особенно из первой.

Опыт преподавания этого вопроса показал, что принцип относительности усваивается учащимися достаточно глубоко. Они отчетливо уясняют, что полностью тождественны во всех инерциальных системах именно законы динамики, а не кинематические величины, характеризующие движение. Они дают обстоятельные ответы на вопрос о том, как будет выглядеть какое-либо явление, например траектория падения мяча в движущемся поезде, по отношению к различным системам отсчета. В движущемся равномерно поезде траектория падения будет вертикальной прямой, в точности такой же, как если предмет уронить в покоящемся поезде. Но относительно земли траектория падения предмета в движущемся поезде совсем не будет прямой — она будет представлять собой часть параболы. Это и понятно, так как для наблюдателя на станции и в вагоне начальные условия опыта различны: в вагоне к скорости мяча относительно вагона прибавляется скорость самого поезда относительно земли. В то же время для наблюдателя, изучающего падение мяча в вагоне и на земле, они будут совершенно одинаковы. Следовательно, форма траектории, координаты точки, скорость зависят от системы отсчета, а законы механики формулируются независимо от нее, они тождественны или абсолютны для всех инерциальных систем.

Помогают усвоению этого важнейшего принципа механики некоторые упражнения в анализе механических явлений в различных системах отсчета, которые учащиеся выполняют самостоятельно. Например, внутри движущегося ускоренно (или замедленно) вагона наблюдаются явления, которые в покоящемся поезде наблюдаться не могут,— без видимой причины отклоняется маятник, вода выплескивается из стакана. Предлагается описать эти явления в системе *земля* и показать, что при таком описании они вполне согласуются в законами Ньютона.

Далее будет показано, как усвоенный учащимися принцип относительности применяется к анализу и объяснению ряда других вопросов механики, в частности при изучении параболического движения тела (брошенного горизонтально и под углом к горизонту).

Для проверки усвоения учащимися принципа относительности им следует предложить вопросы, требующие не только сформулировать этот принцип, но и применить его к анализу ряда явлений, получить на его основе некоторые самостоятельные выводы.

Приведем некоторые из этих вопросов.

а) Мы находимся в закрытой со всех сторон лаборатории, например на космическом корабле, которая движется равномерно и прямолинейно. Можно ли каким-либо образом, не выглядывая за пределы этой лаборатории, измерить скорость, с которой она движется?

Обсуждение этого вопроса всегда бывает очень живым, причем учащиеся обоснованно, со ссылками на принцип относительности Галилея, утверждают, что при любой скорости лаборатории все явления в ней происходят совершенно одинаково, подчиняясь одним и тем же законам. Поэтому принципиально невозможно создать такой прибор, который был бы измерителем абсолютной скорости.

б) Является ли космический корабль-спутник Земли инерциальной или неинерциальной системой отсчета?

В доказательство неинерциальности системы *корабль-спутник* учащиеся приводят примеры самых разнообразных явлений, которые на этом корабле происходят не так, как в инерциальной системе: лишенные опоры тела не падают; вода не выливается из бутылки; маятник не совершает колебаний и т. д. Все эти отклонения поведения тел от законов механики приводились как доказательства неинерциальности этой системы отсчета.

в) Можно ли в закрытой со всех сторон лаборатории, движущейся с ускорением, создать измеритель ускорения?

Предложений по идеям создания таких измерителей ускорений поступает обычно от учащихся несколько. Например, предлагается поместить какое-либо тело в ящик, содержащий упругую среду. Тогда, при движении системы с ускорением, эта среда по одну сторону тела будет сжата, а по другую — разрежена — тело несколько сместится от середины ящика. От этого указателя наличия ускорения системы учащиеся приходят к более удобной конструкции (рис. 26): тело укреплено в ящике при помощи двух пружин, из которых одна несколько сожмется при движении с ускорением, а другая растянется. По величине результирующей силы и массе тела определяется ускорение системы.

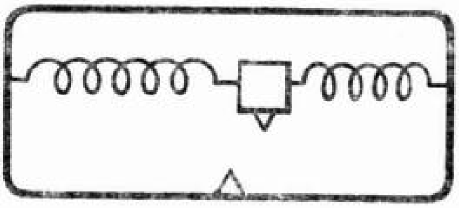


Рис. 26

В качестве измерителей ускорений учащиеся предлагают определять углы отклонения маятников, перегрузки и т. д.

Такого рода беседы с учащимися позволяют проверить усвоение ими принципа относительности Галилея.

§ 7. Силы в природе

Каждый учитель физики знает, какие трудности возникают часто у учащихся при применении законов динамики к анализу различных частных случаев прямолинейных и особенно криволинейных движений.

Многие трудности возникают из-за того, что мы не раскрываем перед учащимися в достаточной степени вопроса о единстве сил природы.

Картина царящих в природе взаимодействий на первый взгляд кажется бесконечно сложной. Однако, несмотря на удивительное разнообразие, по современным данным, имеется всего лишь четыре типа сил. Это всемирное тяготение, или гравитационные силы, электромагнитные силы, ядерные силы и так называемые слабые взаимодействия. Причем только два первых типа сил рассматриваются как силы в смысле ньютоновской механики.

Если учащиеся не получают представления о том, какова природа сил, не видят единства в многообразии воздействий тел друг на друга, то они начинают вводить в рассмотрение силы центростремительные, центробежные, реакции, ускоряющие и т. д., относясь к ним как к силам особой природы, которые действуют наряду с тяготением или с трением и упругими силами, т. е. с силами электромагнитной природы.

Нередко можно слышать, как учащиеся, анализируя движение тел по окружности, складывают силу тяжести или упругую силу деформации связи с центростремительной силой, не понимая, что эти первые силы или их равнодействующая и сообщают телу центростремительное ускорение (т. е. являются тем, что принято называть центростремительной силой). К сожалению, даже в литературе, особенно в научно-популярной, можно встретить такое объяснение, например, эффектов в центробежной петле: на обращающееся по окружности тело действуют сила тяжести и центробежная сила, уравновешивающие друг друга. При этом явление анализируется в инерциальной системе отсчета, где нет никаких сил инерции, в частности и центробежной, которые бы действовали на движущееся по окружности тело [1].

Опыт показывает, что устранению этого заблуждения в большой мере способствует прежде всего разъяснение того, что в инерциальной системе отсчета ускорения возникают только под действием других тел на данное тело. Значит, всегда, когда учащиеся приступают к анализу движения или его изменения, они должны искать те реальные физические тела, которые взаимодействуют с данным телом. Тогда сразу отпадут всякие

---

[1] Такое объяснение пришлось однажды слышать на уроке, причем один из вдумчивых учащихся спросил, за счет чего же создается в этом случае центростремительное ускорение, если тяготение и центробежная сила уравновешивают друг друга.

центростремительные и центробежные силы, не являющиеся действиями других тел на данное тело.

В проекте новой программы эти термины (центростремительная, центробежная) вообще изъяты — именно из указанных выше соображений. Однако это лишь первый шаг к устранению указанного недостатка в понимании учащимися механических явлений.

В средней школе при изучении механики мы имеем дело лишь с гравитационными силами и с силами упругости и трения как проявлениями электромагнитных сил.

Для того чтобы учащиеся это усвоили, в проект новой программы по механике введен специальный вопрос «Силы в природе», который изучается сразу же после законов динамики.

Начинается этот раздел с изучения закона всемирного тяготения, т. е. с гравитационных сил. Затем повторяется с некоторым углублением изученное в восьмилетней школе понятие о силах упругости и силе трения. Только после этого, вооруженные пониманием природы сил, учащиеся приступают к изучению применений законов динамики к анализу частных случаев движения — прямолинейных и криволинейных.

Закон всемирного тяготения. Гравитационные силы. Методика изучения закона всемирного тяготения хорошо известна, мы не будем ее рассматривать. Новым в проекте программы является лишь то, что закон всемирного тяготения и гравитационные силы изучаются в теме «Силы в природе», а их применение к расчетам, например космических скоростей, несколько позднее, там, где рассматривается применение законов динамики к криволинейным движениям.

Однако это новое место закона всемирного тяготения в структуре раздела механики никак не сказывается на методике его изучения. Учащимся сообщается, что Ньютон его сформулировал как обобщение известных астрономических данных, и рассказывается, как гравитационная постоянная определяется из лабораторных измерений.

В связи с применением системы **СИ** указывают значение гравитационной постоянной:

$$\gamma = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \frac{м^3}{кг \cdot сек^2}.$$

Отметим то, на что не всегда обращается должное внимание учащихся. Направление силы всемирного тяготения всегда совпадает с линией, соединяющей центры тяжести взаимодействующих объектов. Поэтому гравитационные силы называют центральными.

В форме $F = \gamma \cdot \frac{m_1 m_2}{r^2}$ этот закон справедлив не только для материальных точек, но и для однородных тел сферической формы. Любое однородное тело сферической формы притягивает все, что находится вне его, совершенно так же, как материальная точка, находящаяся в центре шара и обладающая массой этого сферического тела, т. е. оно создает также поле центральных сил.

В то же время тела другой формы притягивают совсем иначе, чем сферическое, даже если центры тяжести этих тел занимают одно и то же место в пространстве.

Неоднородный шар, составленный из некоторого числа однородных слоев, также дает поле сил, близкое к центральному. К этому случаю относится наша Земля.

Нецентральность земного притяжения сказывается на движении спутников, космических аппаратов и даже Луны, и она учитывается в расчетах. И наоборот, отклонения спутников от «правильного» движения в центральном поле тяготения позволяет уточнить форму нашей планеты.

И еще одно положение, на которое обращают внимание учащихся,— малость гравитационных взаимодействий. Поэтому гравитационными взаимодействиями между телами сравнительно малой массы, даже близко расположенными, мы пренебрегаем. Если подсчитать силу притяжения между двумя телами с массами по 100 *т*, расстояние между которыми равно 10 *м*, то получится значение порядка 0,006 *н*.

Сила тяжести и вес. Изучение гравитационных сил приводит к понятиям веса и силы тяжести.

До недавнего времени в школьных учебниках и в практике преподавания разграничивались обычно лишь сила тяготения, направленная к центру Земли, и ее составляющая — сила тяжести, которая, вследствие вращения Земли вокруг оси, зависит от широты местности и не совпадает с силой тяготения. Вес тела не всегда разграничивался с силой тяжести: часто эти понятия отождествлялись. Однако необходимо четко разграничивать эти понятия, особенно в связи с объяснением невесомости.

Естественнее всего начать изложение этих вопросов с объяснения понятия веса, так как он измеряется непосредственно, например, пружинными весами. Все тела притягиваются к земле, поэтому они производят давление на опору или растягивают подвес. Отсюда определение веса — *сила, с которой притягиваемое землей тело давит на горизонтальную опору или растягивает подвес, называется весом.*

Отметим сразу же, что в ряде учебников весом называют силу, с которой тело давит на опору или растягивает подвес, неподвижные относительно земли. На наш взгляд, вводить условие неподвижности опоры в определение веса не следует. Удобнее считать весом силу, которая действует на опору во всех случаях, и тогда, когда опора движется с ускорением. Тогда можно будет говорить об изменении веса тела в зависимости от ускорения опоры или подвеса. О равенстве веса и силы тяжести при этом можно будет говорить лишь в том случае, когда тело находится в равновесии относительно земли.

Введя вес как давление на опору, мы должны сразу же, на основе третьего закона Ньютона, ввести равную ему и противоположно направленную силу упругости опоры (рис. 27), приложенную уже к самому телу.

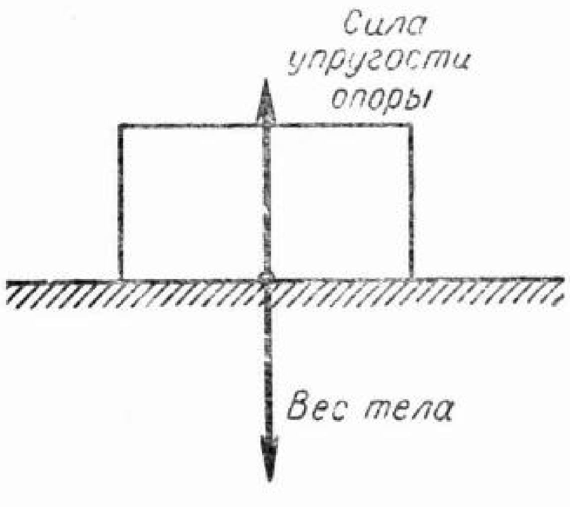


Рис. 27

Далее перед учащимися ставится вопрос: тело находится в равновесии на поверхности Земли, какие силы обеспечивают его равновесие? Другими словами, какую силу уравновешивает сила упругости опоры?

Если бы Земля не вращалась вокруг оси, тогда ответ был бы прост: неподвижное относительно Земли тело находилось бы в равновесии под действием силы тяготения, направленной к центру Земли, и силы упругости опоры.

Рассмотрим тело с массой m, лежащее на поверхности Земли (или на опоре, связанной с ней) в точке,

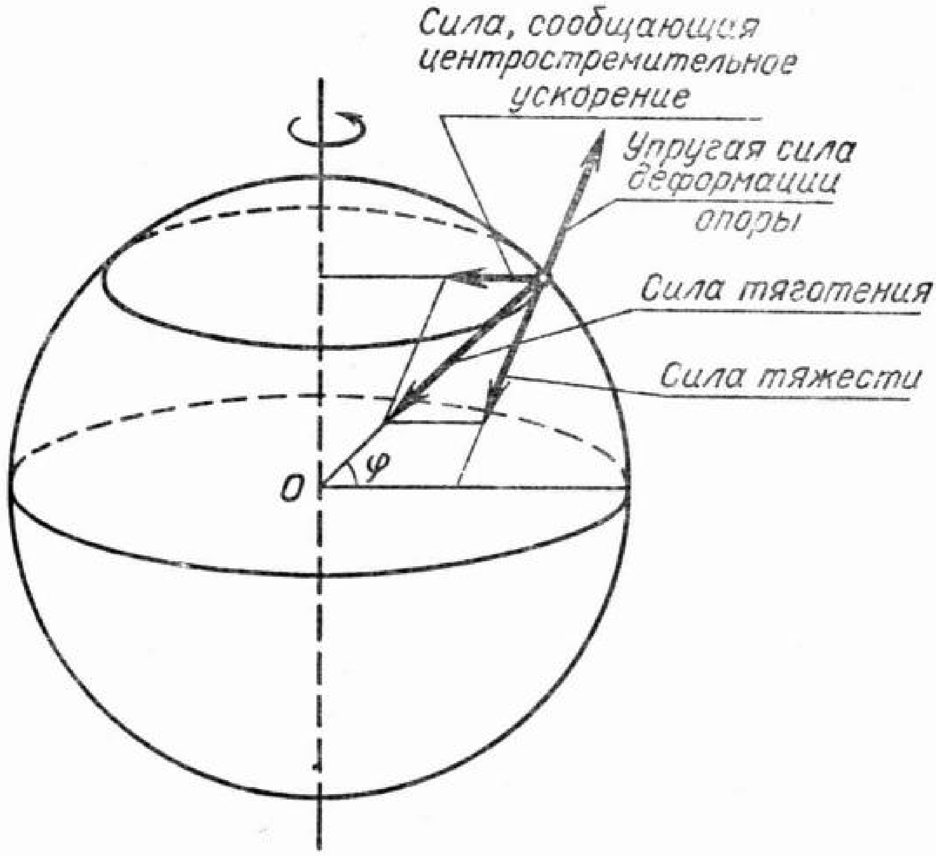


Рис. 28

находящейся на широте φ (рис. 28). Для простоты будем считать форму Земли правильной сферой с радиусом $R_з$.

Наблюдатель, находящийся на земле, себя и поверхность земли считает телами неподвижными. Поэтому равновесие тела в указанной точке он объясняет равенством противоположно направленных радиальных сил тяготения и упругости опоры.

Однако известно, что земля не является строго инерциальной системой отсчета, она вращается вокруг своей оси. Точка зрения наблюдателя, со стороны связанного с инерциальной системой отсчета *звезды*, позволяет уточнить все понятия. Каждое тело на земной поверхности движется вместе с ней равномерно вокруг земной оси по окружности, совпадающей с географической параллелью. Такое движение, как уже известно учащимся из изучения кинематики криволинейных движений, совершается с ускорением, направленным к центру окружности (центростремительным).

Следовательно, на него должна действовать сила, которая сообщает ему это ускорение. Если бы такая сила не действовала на тела, свободно лежащие на земной поверхности, то они, подчиняясь первому закону Ньютона, двигались бы только равномерно и прямолинейно и отрывались бы от вращающейся земли.

Какая же сила сообщает телам это ускорение, удерживает их на поверхности земли, заставляет их двигаться с нею? Ведь если бы сила упругости опоры уравновешивала силу тяготения, то их равнодействующая должна была бы равняться нулю, и мы не могли бы указать такую силу.

Значит векторная сумма силы тяготения и силы упругости опоры не равна нулю и создает центростремительное ускорение в этой точке земной поверхности. Эта сила направлена к центру окружности, совпадающей с географической параллелью. Упругая сила деформации опоры уравновешивает не силу тяготения, а ее составляющую, которая называется силой тяжести (рис. 28).

Итак, относительно земли равновесие тела обеспечивается действием силы упругости опоры и составляющей силы тяготения, которая называется силой тяжести.

Сила тяжести во всех точках земной поверхности, кроме полюсов и экватора, не совпадает по направлению с силой тяготения и меньше ее (везде, кроме полюсов) по величине. Она находится векторным вычитанием из силы тяготения $F=\gamma\cdot\frac{Mm}{R_з^2}$ силы $F_ц=\frac{mv^2}{r}$, которая сообщает телу центростремительное ускорение.

Остается напомнить учащимся, что вес тела и упругая сила деформации опоры равны и противоположны (по третьему закону динамики).

Так как равновесие тела относительно земли обеспечивается силой тяжести и упругостью опоры, то в этом случае (покой или равномерное движение) сила тяжести равна весу тела. Напоминаем при этом учащимся, что сила тяжести, как составляющая тяготения, приложена к телу, а вес — к опоре или подвесу.

Однако далее, при разборе, например, явлений в ускоренно движущемся лифте и в других случаях, когда опора движется с ускорением относительно земли, эти силы — вес и сила тяжести — могут как угодно отличаться друг от друга, в зависимости от ускорения опоры относительно земли.

Вообще говоря, силу тяжести можно было бы не вводить и рассматривать лишь силу тяготения и вес, которые для опоры, неподвижной относительно земли, отличаются незначительно (на величину силы, сообщающей телу центростремительное ускорение), а при движении опоры с ускорением могут сколь угодно отличаться друг от друга в зависимости от ускорения. Так делается во многих курсах механики. Однако это лишает рассмотрение вопроса необходимой четкости.

Как видно из изложенного, разграничение понятий силы тяжести и силы тяготения заставило уже в этой части курса применить законы динамики к криволинейному движению, выяснить необходимость учета действия силы, обеспечивающей центростремительное ускорение[1].

В качестве первого примера этот случай не самый простой. Поэтому подробно на вопросе о зависимости силы тяжести от широты места здесь можно не останавливаться, количественное рассмотрение этого вопроса произвести несколько позднее, при изучении применений законов динамики к различным случаям прямолинейных и криволинейных движений. Там же можно будет рассмотреть вопрос о невесомости. Здесь же полезно сосредоточить внимание учащихся на понятии весомости. Это тоже поможет им далее лучше понять состояние невесомости.

В состоянии весомости находятся тела, которые подвержены одновременно действию сил тяжести и уравновешивающих их сил упругости опоры. Под влиянием этих сил тела деформируются.

Чтобы обратить внимание учащихся на характер деформаций, возникающих при этом в телах, показывают им мягкую пружину, свитую из толстой проволоки и подвешенную на нити или опирающуюся одним концом о стол.

Подвешенная пружина оказывается растянутой, причем вверху сильнее всего, книзу растяжение постепенно уменьшается. Опирающаяся о стол пружина деформируется сильнее всего внизу и совсем слабо у верхнего конца.

---

[1] Отсутствие термина «центростремительная сила» делает довольно громоздким и тяжеловесным объяснение. Утешает лишь то, что тяжело тем, кто объясняет, но легче тем, кому эти объяснения предназначены — учащимся!

Наше тело, находясь на какой-либо опоре, также испытывает действие этих двух видов сил — тяжести и упругости опоры. При этом органы нашего тела оказываются в известной мере деформированными, что и создает привычное нам ощущение весомости.

Если в классе представляется возможность рассмотреть вопрос о весомости несколько подробнее, то можно разобрать различия во внутренних напряжениях, возникающих, например, в пружине под действием силы тяжести и упругой силы опоры, по сравнению с теми напряжениями, которые возникают, когда она сжимается или растягивается руками. Во втором случае пружина деформирована на всем ее протяжении одинаково.

Разница в распределении напряжений объясняется тем, что при деформации пружины руками действующая сила распределялась по поверхности ее торца. В случае деформации под действием силы тяжести и упругости опоры первая сила распределена по всей массе тела (объемная сила), а уравновешивающая ее упругая сила действует лишь на поверхность одного торца. Поэтому напряжения в первом случае одинаковы на всем его протяжении, а во втором они возрастают от нуля на одном конце до максимума на нижнем.

В этом проявляется характерная особенность весомости тел, которая объясняется тем, что притяжение пропорционально массе, т. е. объему тела. Обязательным условием существования состояния весомости является одновременное действие на тело и массовых сил тяжести и поверхностных сил упругости, возникающих при деформациях опор, на которых находятся тела.

Этот вопрос с большей степенью подробности может быть рассмотрен только с наиболее интересующимися учащимися. Можно воспользоваться для этого книгой В. И. Левантовского [1], в которой удачно разобраны все эти вопросы.

Сила упругости. Сила трения. С упругими силами и силами трения учащиеся начинают знакомиться еще в восьмилетней школе. В VI классе они изучают закон Гука; усваивают понятия о силах трения при скольже-

---

[1] В. И. Левантовский. Тяжесть, невесомость, перегрузка, изд. «Знание», М., 1964.

нии и качении, коэффициенте трения скольжения. В старших классах эти вопросы кратко повторяются и несколько углубляются.

Учащимся показывают, что упругие силы возникают в результате их деформации при непосредственном соприкосновении тел. Попробуем привести в движение тело при помощи прикрепленной к нему пружины. Мы увидим, что тело будет увеличивать свою скорость только в том случае, если пружина растянется. Значит, только деформированная пружина действует с некоторой силой на тело. При этом деформируется и само тело, но так мало, что это удается обнаружить лишь с помощью специальных приборов.

К этой же категории сил относятся и силы, действующие на любое тело, лежащее на опоре, со стороны опоры и со стороны самого тела на опору (или силы, действующие со стороны веревки на привязанный к ней вращающийся груз и со стороны груза на веревку). При этом деформации тел, вызвавшие возникновение упругих сил, часто бывают настолько малы, что обнаружить их без специальных приборов трудно.

Обязательность наличия деформации для возникновения упругих сил особенно важно разъяснить учащимся, причем нужно показать, что деформируются оба взаимодействующих тела.

Итак, мы создаем у учащихся достаточно ясное представление о том, что упругие силы определяются характером деформации.

Далее, обращаемся к примеру сил, которые тоже возникают при непосредственном соприкосновении тел, но зависят от других факторов — от состояния поверхности соприкасающих тел, от скорости относительного движения этих тел. К этому типу относятся силы трения, действующие между соприкасающимися телами вдоль поверхности соприкосновения, когда должно возникнуть или уже возникло скольжение одного тела по поверхности другого.

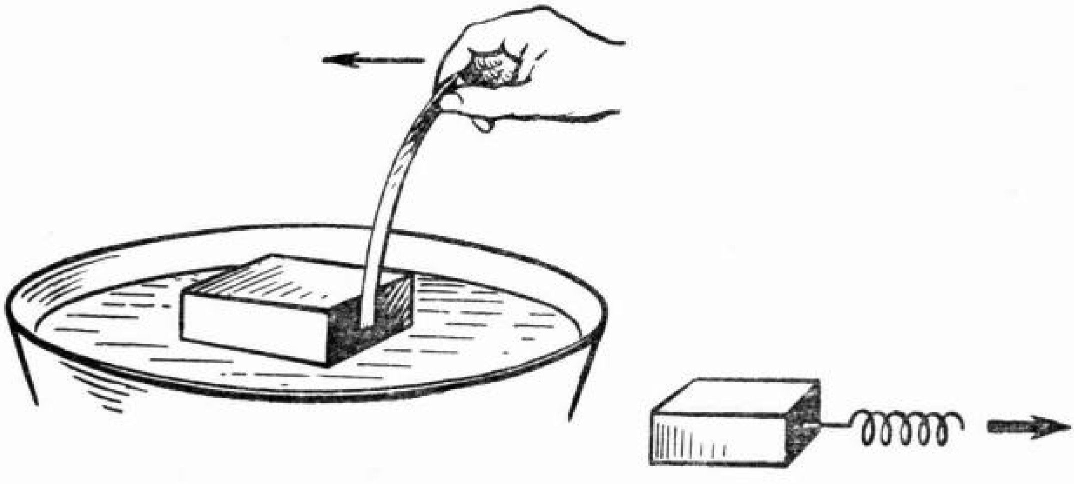
Известно, что силы трения по своему характеру существенно отличаются от упругих сил и сил всемирного тяготения. Отличие состоит в том, что силы трения в той или иной мере зависят не только от конфигурации тел (от их координат), но и от относительной скорости тех тел, между которыми силы трения действуют.

Как измеряются силы трения, учащиеся уже знают к этому времени. Измеряя силы трения, возникающие при различных движениях, обнаруживают сразу, что эти силы зависят от относительной скорости соприкасающихся тел уже по одному тому, что при изменении направления относительной скорости изменяется и направление силы трения. Даже этого одного факта достаточно, чтобы учащиеся узнали об этой характерной особенности сил трения, хотя и величина силы трения всегда в большей или меньшей степени зависит от величины относительной скорости.

Интересно отметить еще одно обстоятельство, которое понадобится в дальнейшем при изучении криволинейных движений. Если какое-либо тело увлекается за счет одного лишь трения в ускоренное движение, то сила трения покоя (увлекаемое в движение тело покоится по отношению к увлекающему) будет всегда направлена вдоль ускорения. Поэтому сила трения покоя может являться силой, сообщающей центростремительное ускорение.

Различие между сухим и жидким трением не входит в программу средней школы как самостоятельный вопрос. Но вместе с тем преподавание механики не обходится без того, чтобы не упоминался в какой-то мере вопрос о том различии, которое существует в проявлении тех и других сил трения при малых скоростях. В случае соприкосновения твердых тел, как бы ни мала была относительная скорость, силы трения всегда имеют конечную величину и сохраняют ее, даже когда эта скорость убывает до нуля. В случае же соприкосновения твердого тела с жидкостью или газом силы трения с уменьшением скорости уменьшаются и падают до нуля, когда скорость тела относительно среды падает до нуля.

Это существенное различие между силами трения легко продемонстрировать. Если деревянный брусок плавает в сосуде с водой, то его можно заставить прийти в медленное движение сколь угодно малыми силами — достаточно подуть на него или подействовать полоской бумаги (рис. 29, *а*). Значит, эта малая сила все же больше, чем сила трения между ним и водой. Но если тот же брусок лежит на столе, то его можно привести в движение только значительной силой, уравновешивающей трение покоя (рис. 29, *б*). Эти дополнительные сведения углубляют знания учащихся о силах трения. Все эти



а *б*

Рис. 29

знания будут закрепляться и усваиваться при применении к решению конкретных задач.

Заметим попутно, что правильное применение понятия о силе трения покоя устраняет одно довольно распространенное в преподавании заблуждение. Нередко можно встретить неправильное утверждение о том, что тела оказывают сопротивление действию силы, что они «пассивны», «неподатливы» и т. п. Именно в этом якобы и заключается инертность тела. При этом иногда еще различают инерцию покоя и инерцию движения, понимая под инерцией покоя то сопротивление, которое приходится преодолевать для того, чтобы сдвинуть тело с места.

Это толкование глубоко ошибочно. Оно связано с неправильным пониманием и инертности и трения или, точнее, различия между жидким и сухим трением, наличия в последнем случае силы трения покоя.

Инертность проявляется, как известно, в том, что различные тела в зависимости от их массы — меры инертности — по-разному меняют скорость под действием одинаковых приложенных к ним сил. Чем больше масса тела, тем медленнее растет его скорость под действием заданной силы. Однако любое тело «послушно» изменяет скорость, как только на него подействует сила.

То, что в ряде случаев мы испытываем сопротивление действию силы, например, когда хотим с места сдвинуть тяжелый предмет, объясняется не «инерцией покоя», а наличием трения покоя. В этом можно легко убедиться, если тело такой же массы мы попробуем сдвинуть с места не по суше, а по воде. В этом случае трение покоя отсутствует (жидкое трение). Поэтому любая сколь угодно малая сила оказывается достаточной, чтобы сообщить телу пропорциональное этой силе ускорение.

Остается обсудить еще один вопрос. В какой части курса физики учащиеся должны получить представления о единой электромагнитной природе упругих сил и сил трения? Мы думаем, что при изучении механики учащимся можно лишь сообщить об этом, не вдаваясь ни в какие объяснения этого вопроса.

Не говоря о том, что этот вопрос не свойствен механике, выходит за ее пределы, он требует многих конкретных знаний об электромагнитных силах. Учащиеся же в младших классах не изучают даже закона Кулона. Поэтому объяснение вопроса о том, что и упругие силы, и силы трения являются лишь проявлениями электромагнитных сил, может быть дано учащимся в дальнейшем при изучении основ электродинамики.

Особо интересующихся учащихся можно отослать к интересно и живо написанной книге В. И. Григорьева и Г. Я. Мякишева [1].

§ 8. Второй путь введения понятий о массе и силе

Как было уже отмечено, понятие о массе можно ввести до изучения второго закона динамики, не опираясь на понятие силы, а используя для этого явление отдачи. Опишем кратко логическую линию развития понятий о массе и силе при этом способе их введения [2].

Явление отдачи демонстрируют, например, с помощью прибора, основной частью которого служит сжатая пружина. Пружина, разворачиваясь, выталкивает из прибора вложенное в него тело, например стальной шарик.

Если шарик вылетает с какой-то скоростью v_1, то оказывается, что прибор откатывается с некоторой ско-

---

[1] В. И. Григорьев, Г. Я. Мякишев, Силы в природе, изд. «Наука», М., 1964.

[2] М. П. Бронштейн, Строение вещества, ОНТИ, 1935, стр. 17—19.

ростью v_2. Эти скорости могут быть измерены. Оказывается, что отношение скоростей $\frac{v_2}{v_1}$, приобретаемых этими двумя взаимодействующими телами — прибором с пружиной и шариком — постоянно. Оно зависит только от самих взаимодействующих тел, от некоторого присущего им свойства. Если в прибор закладывается другое тело, например стальной шарик большего диаметра, то отношение скорости отдачи прибора к скорости этого большего шара увеличится, но и для этих двух тел оно будет оставаться величиной постоянной. Пружина может быть сжата больше, или меньше. Скорости вылета шарика и отдачи прибора могут при этом быть разными — бо́льшими при бо́льшей деформации пружины и меньшими при меньшей деформации. Но отношение скоростей, приобретенных этими двумя взаимодействующими телами, будет всегда оставаться одним и тем же.

Заметим, что и шары, закладываемые в прибор, и сам прибор до взаимодействия покоились. Значит, определяя скорость отдачи прибора и скорость вылета шара, мы измеряем изменение скоростей тел, взаимодействующих друг с другом в течение некоторого промежутка времени. Это обстоятельство настолько важно, что на него необходимо обратить особое внимание учащихся.

Практически опыт легче осуществить при помощи двух тележек — одинаковых или порожней и нагруженной,— прижатых друг к другу и расталкиваемых буферными пружинами. Скорости, которые приобретают тележки при взаимодействии друг с другом, можно определить, измерив расстояния, пройденные ими за одинаковые промежутки времени. Эти расстояния пропорциональны скоростям, приобретенным тележками при взаимодействии, если движение происходит с ничтожным трением. Одинаковое время движения фиксируется одновременным ударом тележек об упоры, поставленные на соответствующих расстояниях.

Чтобы показать учащимся, что скорости, приобретаемые взаимодействующими телами (изменения их скоростей), могут быть самыми различными, а постоянно лишь их отношение для данных двух тел, опыт может быть поставлен в различных вариантах: а) одна из тележек, например нагруженная, вначале покоится, а вторая движется с некоторой скоростью и ударяется о нее; б) обе тележки движутся навстречу друг другу; в) вначале покоится порожняя тележка, а ударяется о нее нагруженная и т. п. Во всех случаях скорости, которые приобретают тележки, будут различны, но их отношение мы можем изменить лишь в том случае, если нагрузим одну из них или обе дополнительным грузом.

Итак, мы приходим к выводу, что все тела обладают свойством, проявляющимся в том, что при взаимодействии друг с другом они приобретают скорости, отношение которых остается всегда постоянным для данных двух тел.

Физическую величину, характеризующую это свойство тел, называют массой тела.

Чтобы лучше изучить эту величину, предлагаем учащимся продолжить исследование.

Если мы приводим во взаимодействие две одинаковые тележки, то они приобретают одинаковые по величине скорости v_1 и v_2, отношение которых равно единице. Если вторую тележку заменить двумя такими же, соединенными вместе, то они при взаимодействии с первой приобретут скорость v_2, вдвое меньшую, чем скорость первой тележки v_1, т. е. отношение скоростей $\frac{v_1}{v_2}$ увеличится вдвое. При трех тележках — втрое и т. д.

Обозначим массу одного тела через m_1, а другого через m_2. Тогда мы можем записать:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{v_2}{v_1}.$$

Это полученное из опыта соотношение выражает определенный закон природы. Его можно использовать для сравнения масс любых взаимодействующих тел, например при столкновениях.

Выберем какое-либо тело за единичную массу. Для сравнения массы другого тела с массой-эталоном необходимо измерить скорости, которые эти тела приобретают при взаимодействии, например при помощи расталкивающей их сжатой пружины. Масса второго тела будет равна эталонной, умноженной на обратное отношение абсолютных величин скоростей этих тел.

Итак, мы ввели понятие массы и дали способ ее измерения. Учащимся следует тут же пояснить, что практически массу измеряют другим способом, более простым и точным. Однако усвоить этот метод измерения массы они смогут лишь после изучения законов динамики и закона всемирного тяготения.

Вместе с тем описанный выше способ измерения массы в принципе является вполне возможным. Кроме того, он дает возможность показать замечательное свойство этой величины — аддитивность, благодаря которой понятие массы приобретает особый интерес (масса двух одинаковых тележек вдвое больше, чем одной, трех — втрое больше и т. д., что видно из отношения приобретаемых ими скоростей).

Выведенное из опыта соотношение

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{v_2}{v_1}$$

дает возможность ввести понятие импульса (mv) и показать, что импульсы, которые приобретают взаимодействующие тела, равны по величине и противоположны по направлению.

Дальнейший путь очевиден. Второй закон динамики, устанавливаемый на опыте, дает возможность измерять силы.

Сила определяется как действие на данное тело другого тела, измеряемое скоростью изменения импульса:

$$F = \frac{\Delta\, mv}{\Delta\, t}.$$

Изложенные в этом параграфе контуры методики введения понятий о массе и силе не проверялись нами в практике преподавания (в отличие от всех других вопросов). Указанный выше путь логически непротиворечив, не требует введения каких-либо дополнительных положений, не вытекающих из эксперимента. Однако его методические достоинства могут быть установлены лишь после проверки в практическом опыте многих учителей.

Глава III

ПРИМЕНЕНИЕ ЗАКОНОВ ДИНАМИКИ

§ 1. Движение тел по окружности

Вопросы кинематики криволинейного движения рассматривались нами совместно с кинематикой прямолинейных движений. Аналогично и динамику криволинейных движений не следует выносить в отдельную тему. Ее нужно изучать совместно с динамикой поступательных прямолинейных движений как приложение законов динамики к некоторым конкретным частным случаям движения. Методический эффект такого объединения заключается в следующем.

Как мы уже отмечали, типичные недостатки в знаниях учащихся и затруднения, которые они встречают при изучении динамики криволинейных движений (в частности, динамики движения материальной точки по окружности), сводятся к тому, что они рассматривают силы, действующие на тело, движущееся по окружности, как силы какой-то особой природы, не связанные с взаимодействиями тел.

Учащиеся обычно твердо усваивают, что равномерное движение по окружности — это движение с ускорением, направленным к центру окружности, и, следовательно, на движущееся по окружности тело действует сила, сообщающая ему это ускорение,— центростремительная сила. Однако они склонны рассматривать ее как некую особую силу, действующую помимо и независимо от сил, обусловленных взаимодействием данного тела с другими телами [1].

---

[1] Подробно об этом см.: Л. И. Резников, Э. Е. Эвенчик, В. Ф. Юськович, Методика преподавания физики в средней школе, т. II, изд. АПН РСФСР, М., 1960, стр. 11—12.

Причина этого заключается не только в том, что этой силе принято давать особое название — центростремительная. От этого термина, указывающего не природу силы, а лишь результат ее действия, в проекте новой программы отказались. Причина заключается в том, что учащиеся не всегда приучаются к тому, чтобы во всех конкретных случаях анализировать изучаемые движения с точки зрения взаимодействия данного тела с другими телами. Этот анализ должен выявить все силы, с которыми действуют на данное тело другие тела, определить составляющие этих сил, действующие в направлении радиуса окружности (перпендикулярно к скорости тела) и обеспечивающие тем самым центростремительное ускорение.

Если учащиеся недостаточно четко усвоили, что под силами, действующими на данное тело, всегда понимают воздействия на него других тел, приводящие к изменению его скорости, то они склонны к силам тяготения и электромагнитным (к которым сводятся силы трения и упругости), обеспечивающим в каждом отдельном случае движения по окружности, прибавлять еще центростремительную или центробежную силу. Как мы уже указывали, недостаточно четкое изложение этих вопросов приводит иногда учащихся к мысли, что эти силы имеют особую природу и обязаны своим возникновением именно движению тела по окружности.

Изучение динамики движения по окружности как частного случая приложения законов динамики к движению, при котором ускорение направлено к центру окружности, может помочь избавиться от этого недостатка. Переход от изучения динамики поступательного движения к динамике движения по окружности должен представлять собой логическое развитие и углубление известного уже учащимся знания о движении тел под действием неуравновешенных сил. При изучении динамики поступательного движения учащиеся рассматривают равнопеременные движения тел под действием нескольких сил, равнодействующая которых не равна нулю и имеет направление, совпадающее с направлением скорости или противоположное ему.

Решение целесообразно подобранных задач помогает учащимся овладеть важным методом исследования динамических явлений. Они усваивают, что необходимо

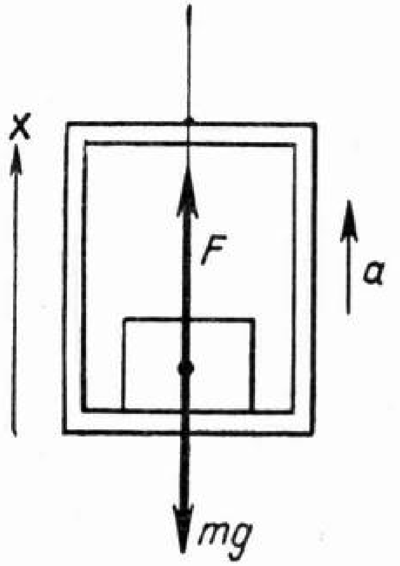


Рис. 30

всегда отыскивать те реальные физические тела, которые действуют на данное тело и сообщают ему ускорение. Таковы задачи на вычисление давления груза на пол лифта, натяжение нитей, связывающих несколько движущихся по горизонтальной поверхности или в вертикальном направлении тел, и др.

При решении этих задач прежде всего выясняют, какие тела действуют на данное тело и сообщают ему ускорение. В тех случаях, когда движения происходят в вертикальном направлении, силами, участвующими в создании ускорения, являются притяжение к земле и силы упругости нитей (рис. 30), деформации пола и т. д. Например, при подъеме кабины лифта с ускорением $\bar{a}$ на груз действуют: сила тяжести $P=mg$ и сила упругости пола лифта F, равнодействующая которых и сообщает ускорение этому телу.

Выбрав положительное направление координатной оси, составляют уравнение второго закона Ньютона для данного тела.

При движении связанных тел по горизонтальной поверхности (рис. 31) сила тяжести и сила упругости поверхности, по которой перемещаются тела, уравнове-

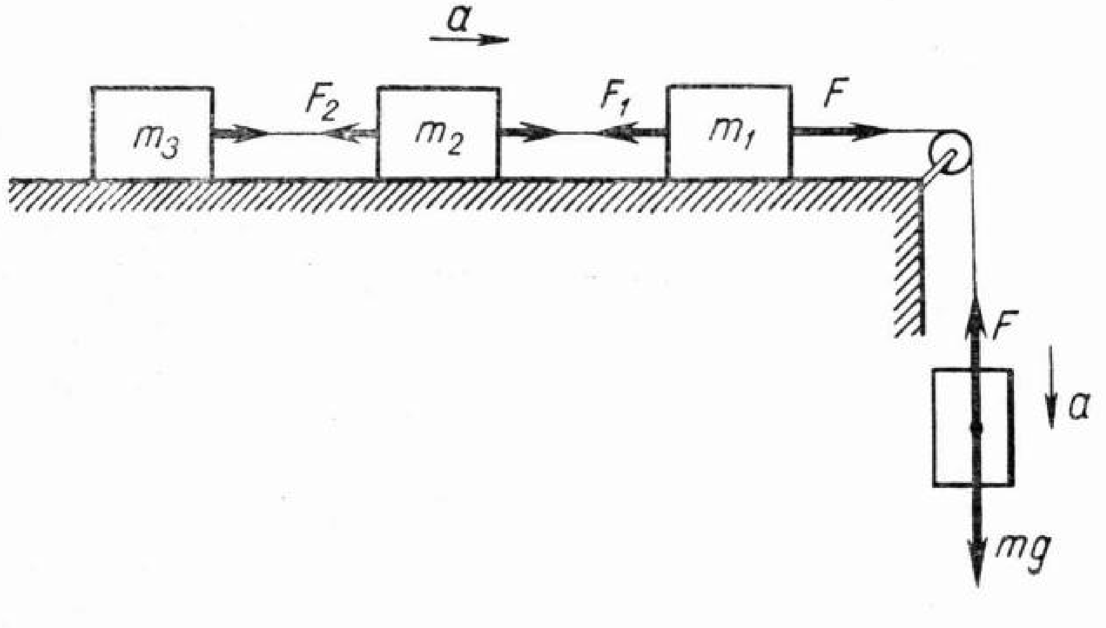


Рис. 31

шивают друг друга. Поэтому, если трением пренебрегают, то в уравнения движения, составляемые для каждого тела, входят лишь действующие на него силы натяжения нитей.

При решении такого рода задач в уравнение движения будет входить не искомая сила, действующая на канат, на дно лифта и т. д., а равная ей по величине сила упругости, участвующая в сообщении ускорения этому телу, для которого на основе второго закона Ньютона составляется уравнение.

Определение сил, действующих на тело, движущееся по окружности, представляет собой некоторое развитие этого метода; при определенных начальных условиях под действием сил, приложенных к данному телу, возникает ускорение, направленное перпендикулярно к направлению начальной скорости. Метод решения задач остается тем же.

Так же как в прямолинейном движении, в этих случаях необходимо вначале рассмотреть характер изменения вектора скорости, направление и величину вектора ускорения, представить себе картину взаимодействия тел, которыми создаются силы, действующие на данное тело, выбрать положительное направление координатной оси и применить второй закон Ньютона к движению каждого из взаимодействующих тел.

При этом нужно иметь в виду, что успех усвоения учащимися этого метода во многом зависит от того, усвоили ли учащиеся понятие центростремительного ускорения как величины, которая принципиально не отличается от ускорения в прямолинейном движении. Понимание одинаковой физической природы этих ускорений, из которых одно представляет собой изменение величины вектора скорости, а другое — только его направления, обеспечивает правильное применение законов динамики к расчету этих величин. Учащиеся усваивают, что для расчета центростремительного ускорения не существует каких-то «особых» сил, возникающих при взаимодействии тел.

Для того чтобы учащиеся достаточно хорошо усвоили, что силы, действующие на тело, равномерно движущееся по окружности, не имеют какой-то особой природы, чтобы не было неправильного противопоставления этих сил силам трения, упругим силам или силам тяготения, известным им из курса механики, необходимо в каждом отдельном случае выяснить происхождение этих сил. Недостаточно формальной констатации того, что при равномерном движении тела по окружности на него действует сила, сообщающая ему центростремительное ускорение. В каждом отдельном случае наблюдаемого движения необходимо не только находить величину этой силы, но и выяснять, как она возникает. Это значительно важнее, чем то, приписываем ли мы этой силе специальное название «центростремительная» или вообще (что, по-видимому, лучше) не будем ее называть.

§ 2. Системы отсчета при изучении движения по окружности

Как и при изучении любых вопросов механики, важным вопросом методики изучения динамики движения тела по окружности является вопрос о системе отсчета, относительно которой рассматривается это движение Тот путь рассмотрения, который указан выше, справедлив в том случае, если мы пользуемся только инерциальной системой отсчета.

Изучение законов динамики должно было привести учащихся к усвоению того, что эти законы наиболее просто формулируются именно в инерциальных системах отсчета. Лишь в этих системах ускорения, получаемые телами, всегда можно приписать силам, являющимся действиями тел друг на друга. В неинерциальных системах для объяснения ускорений требуется, кроме этих сил, вводить еще так называемые силы инерции, происхождение которых не связывается с взаимодействиями тел.

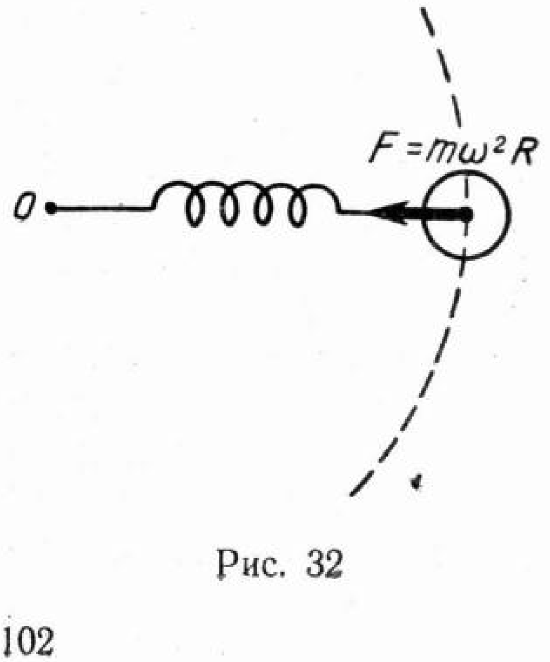


Рис. 32

Если, например, мы рассматриваем движение тела, прикрепленного к пружине, в горизонтальной плоскости (рис. 32) в инерциальной системе отсчета (например, с точки зрения наблюдателя, связанного с лабораторией), то мы можем утверждать следующее: центростремительное ускорение $\left(a=\frac{v^2}{r}\right)$ с которым движется тело относительно неподвижного наблюдателя, возникает вследствие того, что деформированная пружина с некоторой силой F действует на прикрепленное к ней тело и сообщает ему это ускорение.

Это же явление будет выглядеть иначе, с точки зрения наблюдателя, связанного с самим вращающимся телом, т. е. в неинерциальной системе отсчета. Относительно этого наблюдателя тело, прикрепленное к пружине, находится в состоянии покоя. Каким же образом наблюдатель может объяснить отсутствие ускорения у данного тела, несмотря на наличие силы упругости пружины, действующей на него? Желая сохранить для объяснения механических явлений первый и второй законы Ньютона, наблюдатель, движущийся ускоренно вместе с телом, должен прийти к выводу, что на тело действует еще одна сила, равная той, которая сообщает телу центростремительное ускорение в инерциальной системе координат, но направленная в противоположную сторону (рис. 33). Эту силу принято называть центробежной силой инерции. Благодаря действию на тело обеих сил — силы упругости пружины, играющей в данном случае роль центростремительной силы, и центробежной силы инерции,— равных по величине, противоположных по направлению и приложенных к одному и тому же телу, можно объяснить на основе закона Ньютона отсутствие ускорения в неинерциальной системе отсчета.

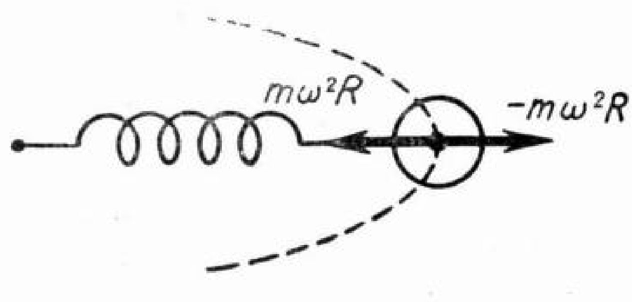


Рис. 33

Однако введенная таким образом сила инерции не является результатом действия тел на данное тело. Эту силу часто называют фиктивной. Это надо понимать только в том смысле, что она не связана с взаимодействием тел и потому в инерциальных системах, где силы всегда связаны с действиями тел друг на друга, отсутствует.

При изучении динамики поступательного движения мы не вводим неинерциальных систем отсчета и сил инерции. Точно так же при изучении криволинейных движений есть полная возможность обойтись без введения неинерциальных систем отсчета.

Приняв определенную точку зрения по поводу введения лишь одной системы отсчета, а именно инерциальной, мы не будем вводить силы инерции и при применении законов динамики к движению тела по окружности. Поэтому понятием центробежной силы инерции мы не будем пользоваться и этот термин не будем вводить.

Что касается термина «центробежная сила», которым часто пользуются для обозначения в инерциальной системе силы, действующей на связи, удерживающие тело на круговой траектории, то им пользоваться вообще не следует.

В самом деле, какой смысл может иметь понятие центробежной силы в инерциальной системе отсчета? Не возникает, конечно, никаких сомнений в том, что третий закон Ньютона применим полностью к движению тел по окружности. Следовательно, если центростремительное ускорение возникает благодаря взаимодействию тела со связями, удерживающими его на окружности, то можно говорить о силах, действующих не только на тело, но и на связи.

Однако имеет ли смысл называть эту силу центробежной? Ведь в это понятие вкладывается то, что это сила равна по величине центростремительной, но направлена в противоположную ей сторону, т. е. по радиусу от центра окружности. Вместе с тем анализ различных движений показывает, что мы такой силы вообще указать не можем.

Рассмотрим случай, когда центростремительное ускорение тела создается в результате действия на него нескольких тел (т. е. центростремительная сила, если пользоваться этим термином, является равнодействующей нескольких сил). В этом случае мы не можем указать такого тела, к которому была бы приложена сила, равная по величине и противоположная по направлению центростремительной силе.

В самом деле, рассмотрим силы, действующие на шарик, проходящий в «центробежной петле» ее верхнюю точку. Если скорость шарика такова, что центростремительное ускорение создается только силой тяжести, действующей на шарик ($v=\sqrt{gr}$), то связью, удерживающей тело на окружности, будет земля, а не полотно петли. В этом случае сила, противоположная той, которая сообщает центростремительное ускорение, и равная ей по величине, приложена к земле (стоит ли ее все же называть центробежной, мы обсудим ниже). Но если скорость шарика больше, чем $\sqrt{gr}$, то центростремительное ускорение создается не только притяжением к земле, но и упругой силой, действующей со стороны полотна петли, деформированного движением шарика. Центростремительная сила будет являться равнодействующей этих двух сил. При этом мы не можем указать тела, к которому была бы приложена сила, равная и противоположная центростремительной. В данном случае введение понятия о центробежной силе лишено физического смысла.

Отсутствие центробежных сил в инерциальной системе отсчета ясно выступает в следующем примере. Если надеть на шкив электродвигателя цепь, состоящую из ряда звеньев, и, приведя в быстрое вращение двигатель, столкнуть цепь со шкива, то вращающаяся цепь будет катиться по поверхности (рис. 34). На каждое звено цепи будет действовать равнодействующая двух сил F_1 и F_2 со стороны смежных звеньев, деформированных во время раскручивания. Эта равнодействующая сила направлена к центру кольца, т. е. является центростремительной. Сил, действующих в направлении от центра, здесь нет.

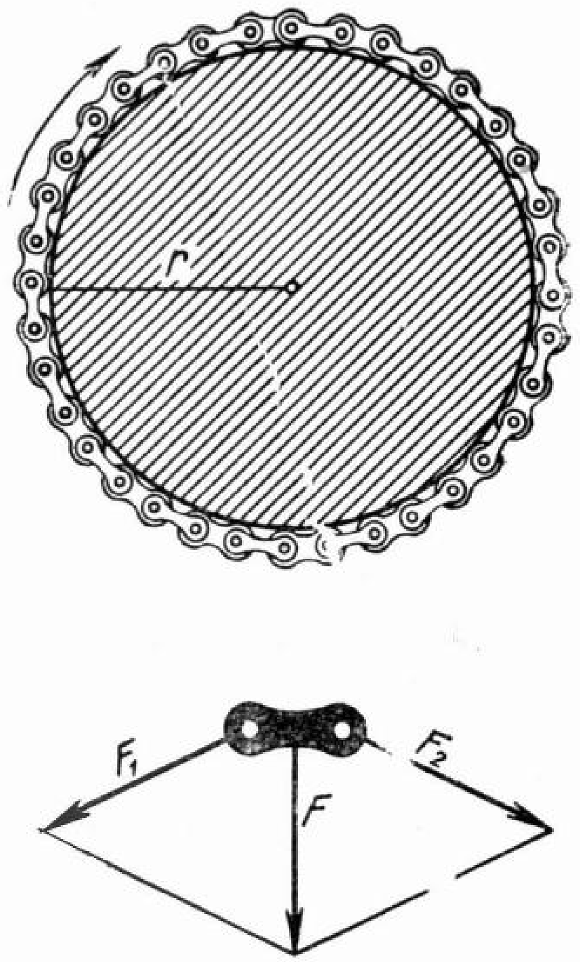


Рис. 34

Рассмотрим еще случай движения в горизонтальной плоскости тела, прикрепленного к нити, или движение Луны вокруг Земли. Во всех подобных случаях легко найти силу, действующую на связь (силу противодействия), равную и противоположную той, которая сообщает данному телу центростремительное ускорение. Однако эта сила направлена не от центра окружности, а всегда к общему для взаимодействующих тел центру масс, вокруг которого обращаются эти тела. Всегда движутся оба взаимодействующих тела. Если одно из взаимодействующих тел движется по окружности, то и второе тоже движется по окружности, причем центры этих окружностей совпадают. Движению по окружности тела, прикрепленного к нити, соответствует движение по окружности руки, держащей конец нити (рис. 35).

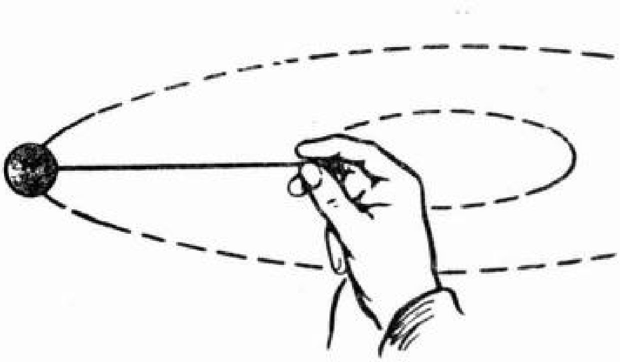


Рис. 35

Если масса одного из взаимодействующих тел во много раз больше массы другого, то при движении меньшего тела по окружности большее тело описывает окружность иногда столь малого радиуса, что кажется неподвижным. Камень и рука движутся по концентрическим окружностям большого (камень) и малого (рука) радиусов. Земля и Луна также движутся вокруг их общего центра масс.

Во всех этих случаях силы взаимодействия, которые действуют на оба обращающихся по окружности тела — на Землю и на Луну, на камень и на руку — направлены не от центра, а к центру окружности, обе создают центростремительные ускорения тел. Следовательно, ни одну из них нет никаких оснований называть центробежной.

Термин «центробежная сила» имеет смысл применять лишь в отношении силы инерции в неинерциальной системе отсчета: эта сила приложена к самому вращающемуся телу и направлена, действительно, по радиусу от центра окружности. Но так как этой системой мы не считаем целесообразным пользоваться в средней школе при анализе движений тел по окружности, то, следовательно, термин «центробежная сила» вообще нет смысла вводить.

Эту мысль всегда высказывал известный советский методист-физик Д. И. Сахаров. В его учебнике она нашла хорошее методическое воплощение [1].

Для того чтобы учащиеся научились правильно применять третий закон динамики к движению по окружности, прежде всего подчеркивается мысль, что движения тел взаимосвязаны и что изменению движения одного тела соответствует изменение движения другого тела. Это относится и к движению тел по окружности.

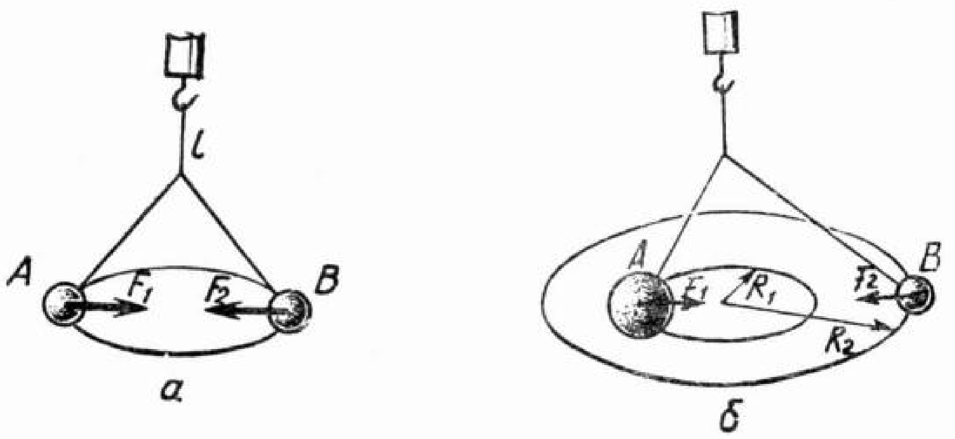


Рис. 36

На опыте показывают, как движутся оба взаимодействующих тела (рис. 36, *а* и *б*). Опыт показывает, что если массы взаимодействующих тел одинаковы, то оба они движутся по окружностям одинакового радиуса. Если же масса одного из тел больше, то они движутся по концентрическим окружностям разных радиусов. Обе силы F_1 и F_2, которые действуют на тела A и B, направлены к общему центру окружностей и сообщают телам центростремительные ускорения.

Опыт показывает, что эти силы равны, в противном случае нить l не оставалась бы вертикальной. При вертикальности нити горизонтальные составляющие F_1 и F_2 натяжений нитей равны, что лишний раз подтверждает справедливость третьего закона Ньютона.

---

[1] Д. И. Сахаров и М. И. Блудов, Физика для техникумов, Физматгиз, М., 1960, стр. 135—136.

Из равенства $F_1 = F_2$ вытекает:

$$m_A \omega^2 R_1 = m_B \omega^2 R_2, \text{ или } \frac{m_A}{m_B} = \frac{R_2}{R_1}.$$

То же самое можно показать на хорошо известном в школьной практике опыте с вращающейся скобой, на которой укреплены два шара разной массы (рис. 37). Силы F_1 и F_2 сообщают шарам центростремительные ускорения. Если расположить шары так, чтобы $m_A : m_B = R_2 : R_1$, то ни один из них не будет перетягивать другой. При этом стол, на котором стоит центробежная машина со скобой, не испытывает никаких толчков. На этом приборе интересно показать случай возникновения биений: если расположить шары так, что один из них перетягивает, то машина начинает «бить».

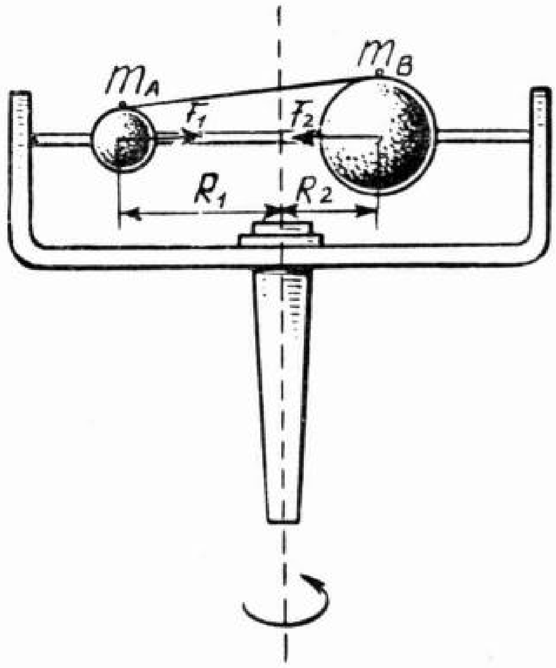


Рис. 37

Могут ли учащиеся сами объяснить это явление на основе тех знаний, которые им были сообщены? По-видимому, да. Если оба шара сдвигаются к одному концу скобы и обращаются по окружности с некоторым центростремительным ускорением, то машина получает импульс, имеющий противоположное направление. При этом ось вращения не проходит через центр тяжести всей системы. Это явление и воспринимается как биение машины.

§ 3. Центробежный эффект

Начинать изучение движения тела по окружности следует с того случая, когда это движение уже установилось. Только после того как учащиеся усвоят, что непременным условием движения тела по окружности является наличие силы, направленной к центру окружности, и изучат формулу для вычисления этой силы, следует перейти к вопросу о том, что предшествует установившемуся движению по окружности. Выясняют, что происходит, если сила, действующая на тело, меньше той, которая необходима, чтобы при данной скорости тела сообщить ему центростремительное ускорение. Удаление тел от центра окружности, наблюдаемое при этом, следует назвать центробежным движением или центробежным эффектом.

Этот эффект обусловлен наличием у тела скорости и тем, что действующая на тело по направлению к центру сила недостаточна, чтобы сообщить ему при данных условиях центростремительное ускорение.

Отсутствие понятия «центробежная сила» при применении инерциальной системы отсчета ни в коей мере не может создать трудностей при объяснении ряда известных явлений, связанных с обращением тел по окружности, которые обычно рассматриваются в средней школе (разрыв маховиков; нитей, на которых удерживаются вращающиеся тела; действие ряда так называемых центробежных механизмов).

Многих учителей часто беспокоит вопрос о том, как же пользоваться названием «центробежные механизмы», принятым в литературе, если понятие центробежной силы не вводится. Однако если мы введем понятие центробежного движения или центробежного эффекта, очень полезного для объяснения явлений, то от термина «центробежные механизмы» не будет необходимости отказываться.

В самом деле, рассмотрим, как можно объяснить возникновение движения по окружности в горизонтальной плоскости (рис. 38) тела, прикрепленного к пружине (или нити). Получив благодаря толчку некоторую скорость в направлении, перпендикулярном к нерастянутой пружине, тело начинает двигаться прямолинейно в направлении толчка. Это движение приводит к некоторому растяжению пружины.

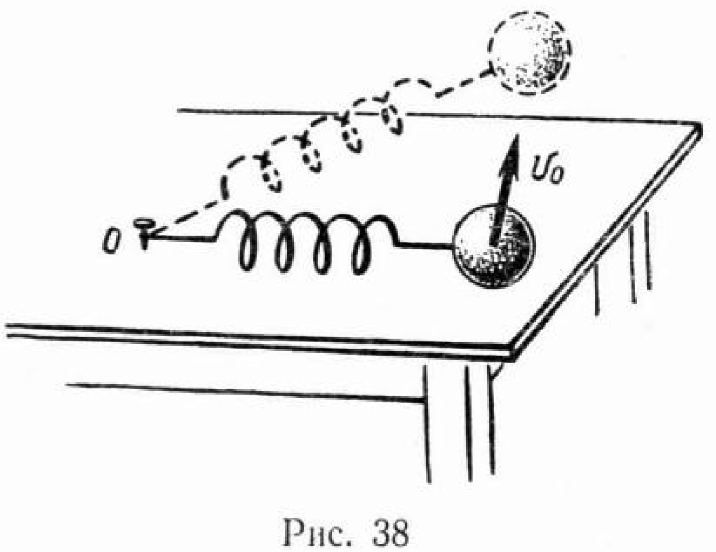


Рис. 38

Возникающая при деформации пружины упругая сила действует на тело в направлении к точке O, в которой закреплена пружина, и вызывает искривление его траектории. Упругая сила пропорциональна растяжению. Пока растяжение пружины мало, эта сила может быть недостаточна, чтобы при скорости нити v удержать его на окружности, радиус которой равен длине пружины. Поэтому тело будет продолжать удаляться от точки O, двигаясь по раскручивающейся спирали. Это движение вызывает дальнейшее растяжение пружины и, следовательно, увеличение силы упругости, действующей на тело.

Растяжение пружины прекратится, когда сила упругости, возрастающая с увеличением растяжения, станет равна $\frac{mv^2}{R}$, где m — масса тела, v — его линейная скорость, а R — расстояние от оси вращения. При этом сила упругости сообщит телу центростремительное ускорение, необходимое для его равномерного движения со скоростью v по окружности, радиус которой равен длине деформированной пружины.

Если увеличить скорость тела, то пружина должна будет создать большее центростремительное ускорение, т. е. развить бо́льшую упругую силу. До тех пор пока сила не достигнет нужной величины, тело будет продолжать удаляться от центра, пружина — удлиняться. Но деформация не может продолжаться сколько угодно, нить или пружина не могут удлиняться бесконечно. Если при наибольших допустимых для данного тела деформациях все еще не развиваются внутри них силы упругости, достаточные для сообщения ускорения $\frac{v^2}{R}$ или $\omega^2 R$, то деформация будет продолжаться, превзойдет наибольший допустимый предел и нить (пружина) разорвется. По этой же причине происходит иногда разрыв маховиков и других быстровращающихся тел.

Правомерна ли при этом постановка вопроса о том, какие силы рвут нить (пружину)? Очевидно, нет. Этот вопрос так же неправомерен, как и вопрос о том, почему тело, вращающееся в вертикальной плоскости, «не падает», находясь под действием силы натяжения нити и силы тяготения. Задавать такой вопрос нельзя, потому что тело именно падает; оно падает с ускорением, равным центростремительному, а потому оно движется не прямолинейно, а удерживается на окружности, т. е. оно падает с прямолинейной траектории, по которой оно двигалось бы при отсутствии действия на него силы, на круговую.

В данном случае вопрос о том, какие силы рвут нить, также неправомерен. Нить рвется тогда, когда развивающиеся силы недостаточны, чтобы удержать тело на окружности, чтобы всем его частям сообщить нужные ускорения.

«Причиной разрыва маховика являются не силы, а, наоборот, отсутствие сил, достаточных для того, чтобы сообщить внешним частям маховика нужные ускорения. Силы необходимы для того, чтобы маховик вращался как целое, и маховик разрывается, когда эти силы отсутствуют или их величина недостаточна» [1].

Итак, мы вводим понятие о центробежном движении, которое происходит в том случае, когда тело движется с некоторой скоростью и действующая перпендикулярно к ней сила (направленная к центру окружности) недостаточна для удержания этого тела на окружности данного радиуса.

Понятие о центробежном движении и его возникновении применяется далее для объяснения ряда известных центробежных механизмов (центробежный регулятор, центрифуга, центробежный насос, тахометр и др.). Объяснение их действия имеется в методической литературе и в ряде элементарных учебников физики.

§ 4. Последовательность изучения применений законов динамики. Подбор задач

Рассмотрев принципиальные вопросы изучения динамики движения материальной точки (тела) по окружности, остановимся на некоторых важных методических вопросах.

Прежде всего об отборе и последовательности изучения учебного материала. Поскольку динамика движения по окружности рассматривается как частный случай приложения законов динамики, то после решения задач по динамике прямолинейных движений следует выяснить

---

[1] С. Э. Хайкин, Физические основы механики, Физматгиз, М., 1963, стр. 172.

условия, при которых возникает криволинейное движение вообще (сила направлена под углом к начальной скорости) и движение по окружности в частности (сила перпендикулярна к начальной скорости).

Известны опыты, демонстрирующие искривление траектории движения стального шарика на стеклянной пластине под действием магнита, расположенного на некотором расстоянии от линии движения шарика.

При движении по окружности мы в любом случае можем указать силу, действующую на тело со стороны какого-либо другого тела и направленную к центру окружности,— сила натяжения растянутой нити, сила давления деформированного желоба и т. д.

Величина силы, сообщающей центростремительное ускорение, находится по второму закону Ньютона. В связи с тем что при изучении кинематики учащиеся должны были усвоить вывод формулы центростремительного ускорения, нет необходимости экспериментально проверять формулу $F=\frac{mv^2}{R}$ или $F=m\omega^2R$. В этом была необходимость, когда в программу не входил вывод формулы центростремительного ускорения. Однако показать на опытах подтверждение зависимости F от m, v и R имеет смысл. Это можно сделать на известном опыте, смысл которого ясен из рисунка 39.

Установив факт действия на обращающееся по окружности тело силы, направленной к центру и сообщающей ему центростремительное ускорение, необходимо выяснить происхождение этой силы.

Это можно сделать на разобранном выше примере движения шарика, прикрепленного к нити или пружине в горизонтальной плоскости. Здесь разбирается вопрос о происхождении деформации и выясняется, таким образом, возникновение силы упругости, действующей на тело. Разбор этого примера позволяет вместе с тем выяснить причину разрыва нитей, маховиков и т. д.

Далее открывается возможность на ряде задач проанализировать примеры движения тел по окружности, на которых можно показать, что центростремительное ускорение создается различными силами — тяготения, упругости, электрическими или магнитными. Трение покоя также может создавать нормальные ускорения.

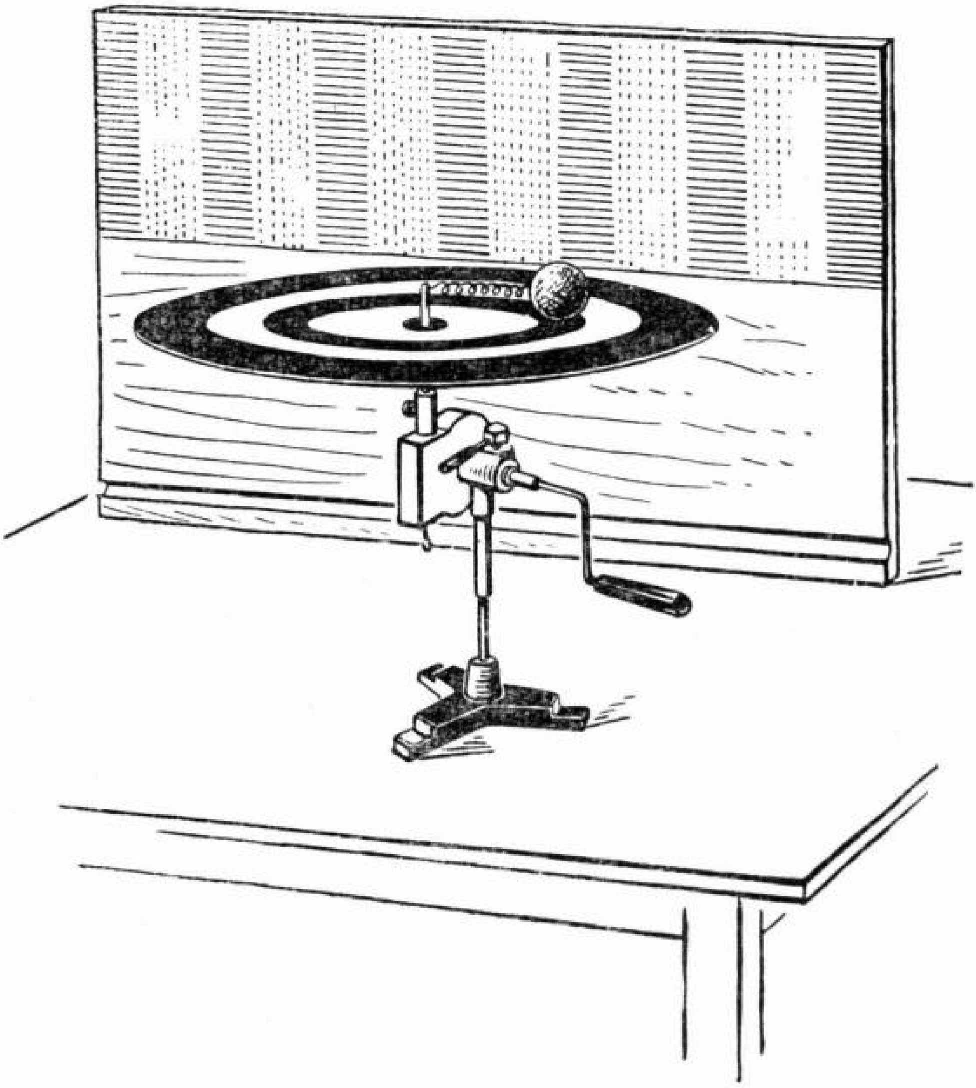


Рис. 39

Целесообразно так подобрать систему задач, чтобы вначале рассмотреть примеры движений, в которых центростремительное ускорение создается одной какой-либо из этих сил, затем двумя, действующими по одной прямой (вращение на нити в вертикальной плоскости, движение по выпуклому или вогнутому мосту), и лишь затем рассмотреть более сложные примеры, когда ускорение создается силами, действующими под углом друг к другу (конический маятник и его применения) [1].

Все эти вопросы рассматриваются на основе второго закона Ньютона. Поэтому вопрос о силах, действующих на связи, пока не ставится. Во всех случаях, когда требовалось определить силы, действующие на связи (дав-

[1] Подробно о подборе задач см.: Л. И. Резников, Э. Е. Эвенчик, В. Ф. Юськович (под ред. проф. Б. М. Яворского), Методика преподавания физики, т. II, изд. АПН РСФСР, М., стр. 38—49.

ление на мост, на полотно центробежной петли, силы натяжения нити), в уравнение, составленное по второму закону Ньютона, входила не эта сила, а равная ей, но противоположно направленная сила, действующая на само движущееся по окружности тело.

После овладения учащимися этим материалом вопрос о применении третьего закона Ньютона к движению по окружности также должен быть поставлен в той плоскости, как это было разобрано выше.

Переход к изучению ряда центробежных механизмов требует предварительного введения понятия о центробежном движении. Из механизмов имеет смысл рассмотреть центробежный регулятор, тахометр, центрифугу и центробежный насос.

§ 5. Космические скорости. Понятие невесомости. Перегрузки

а) Среди задач, решаемых на движение тел по окружности, особый интерес вызывают задачи на вычисление космических скоростей.

Вычисление первой космической скорости, т. е. той минимальной скорости, которая должна быть сообщена телу в горизонтальном направлении, чтобы оно стало спутником Земли, не вызывает никаких затруднений. Рассмотрим эту задачу.

Обозначим массу спутника через m. Так как размеры спутника значительно меньше радиуса орбиты, спутник может быть принят за материальную точку.

Чтобы двигаться равномерно по окружности вокруг Земли, тело должно обладать ускорением, направленным к центру Земли. Если пренебречь слабыми силами притяжения к Луне, Солнцу и другим небесным телам, а также малым сопротивлением при движении в околоземном пространстве на высоте H над земной поверхностью (H — заданная высота полета спутника), то останется только одна сила, действующая на спутник, которая сообщает ему это ускорение,— сила гравитационного притяжения Земли F. Скорость спутника на заданной орбите, радиус которой равен $R_з+H$, должна быть такова, чтобы сила $F_ц$, необходимая для создания центростремительного ускорения, была равна F. При меньшей скорости спутник будет падать на Землю;

при большей скорости действующая на тело сила тяготения будет недостаточна для сообщения спутнику центростремительного ускорения на орбите данного радиуса и спутник будет двигаться вокруг Земли, но не по круговой траектории, или покинет ее.

Для устойчивого движения по окружности должно выполняться равенство $F = F_{ц}$ или

$$\gamma \cdot \frac{mM_З}{(R_З + H)^2} = \frac{mv_{\mathrm{I}}^2}{R_З + H}; \quad \frac{\gamma M_З}{R_З + H} = v_{\mathrm{I}}^2,$$

где v_{I} — первая космическая скорость, которую можно вычислить из этого уравнения, так как γ, $M_З$ и $R_З$ — известные постоянные, а H — заданная высота полета.

Если пренебречь слабым эффектом вращения Земли, то выражение для первой космической скорости можно преобразовать, освободив его от величины массы Земли.

В самом деле, в этом случае силу тяготения к земле $F = \gamma \cdot \frac{mM_З}{R_З^2}$ и силу тяжести $P = mg$ можно считать равными не только для полюсов, но и в любой точке земной поверхности. Следовательно, $F = P$ и

$$g = \frac{\gamma M_З}{R_З^2}.$$

Тогда

$$v_{\mathrm{I}}^2 = \frac{gR_З^2}{R_З + H}; \quad v_{\mathrm{I}} = R_З \sqrt{\frac{g}{R_З + H}}.$$

Мы видим, что значение первой космической скорости зависит от высоты H полета спутника над поверхностью земли. В непосредственной близости от земной поверхности $v_{\mathrm{I}} = \sqrt{gR} \approx 7{,}93$ *км/сек.*

Вычисление второй космической скорости, т. е. той минимальной скорости, при которой орбита становится параболической и космическое тело (ракета) навсегда покидает Землю, представляет известные трудности и потому не включалось в программу средней школы.

Однако учащихся настолько интересуют все вопросы, связанные с освоением человеком космического пространства, что, если не на уроках, то во внеклассных занятиях, этот вопрос необходимо рассмотреть.

Трудности здесь связаны с тем, что учащиеся не владеют понятием потенциала поля тяготения. Поэтому изложение нужно строить так, чтобы можно было обойтись без этого понятия, используя лишь понятия кинетической и потенциальной энергии[1].

Прежде всего напоминают, что тела удерживаются возле Земли силой тяготения, причем энергия тяготения (потенциальная) определяет прочность этой связи. Для того чтобы брошенное с Земли тело не вернулось обратно, ему нужно придать достаточную скорость, т. е. достаточную кинетическую энергию. Минимальное значение этой скорости v_{II} (вторая космическая скорость) определится из равенства кинетической энергии у земной поверхности и потенциальной энергии тела на бесконечном удалении. Потенциальную энергию тела у поверхности земли примем равной нулю. Таким образом, для вычисления второй космической скорости мы приходим к задаче об определении потенциальной энергии тяготения.

Если высота подъема тела над поверхностью Земли h мала в сравнении с радиусом Земли, то энергия тяготения, как известно учащимся, измеряется величиной mgh.

Однако этой формулой нельзя пользоваться при h достаточно больших в сравнении с $R_З$, так как при этом g уже нельзя считать величиной постоянной; она изменяется в соответствии с формулой

$$g = \gamma \frac{M_З}{(R_З + h)}.$$

Итак, нужно рассмотреть более общий случай, когда тело удаляется на большое расстояние H от центра нашей планеты (или на $H - R_З$ от поверхности Земли). В этом случае сила тяготения будет уменьшаться обратно пропорционально квадрату расстояния от центра Земли.

Подсчитаем работу переменной силы на участке $H - R_З$ (рис. 40).

---

[1] Заметим, что задача о вычислении второй космической скорости, которую мы рассматриваем в данной главе вместе с вопросом о первой космической скорости, может быть разобрана с учащимися лишь в соответствующем месте курса — после изучения закона сохранения энергии в механических процессах.

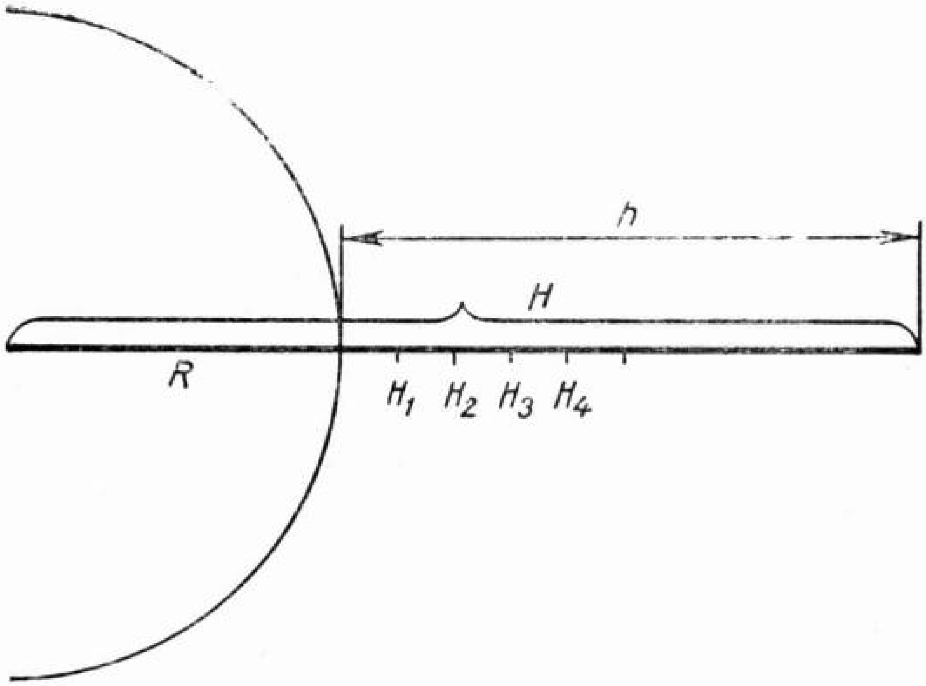


Рис. 40

Разделим расстояние h на большое число малых участков, на которых силу можно считать постоянной, и подсчитаем работу, произведенную на каждом участке отдельно. Полная работа, которую нужно совершить на всем пути, равна сумме элементарных работ.

В начале первого участка $F_{R З} = \gamma \cdot \frac{mM З}{R_З^2}$, в конце его $F_{H_1} = \gamma \cdot \frac{mM З}{H_1^2}$. Поскольку $R_З$ и H_1 мало отличаются друг от друга, то для вычисления силы в средней точке этого участка $F_{ср}$ можно $R_{ср}^2$ заменить произведением $R_З H_1$:

$$F_{ср} = \gamma \cdot \frac{mM З}{R З H_1}.$$

А работа на этом участке будет равна:

$$A_1 = \gamma \cdot \frac{mM З}{R З H_1} (H_1 - R_З) = \gamma m M З \left(\frac{1}{R_З} - \frac{1}{H_1}\right).$$

Аналогично работа на следующих участках будет:

$$A_2 = \gamma \cdot \frac{mM З}{H_1 H_2} (H_2 - H_1) = \gamma m M З \left(\frac{1}{H_1} - \frac{1}{H_2}\right);$$

$$A_3 = \gamma \cdot \frac{mM З}{H_2 H_3} (H_3 - H_2) = \gamma m M З \left(\frac{1}{H_2} - \frac{1}{H_3}\right).$$

Сложив полученные значения работы на отдельных участках, получим общую работу:

$$A = \gamma\, m M_З \left(\frac{1}{R_З} - \frac{1}{H}\right),$$

так как все промежуточные числа взаимно уничтожаются.

Для перенесения тела с массой m с поверхности Земли в бесконечность, т. е. для преодоления силы земного тяготения, должна быть совершена работа $A = \frac{\gamma m M_З}{R_З}$, так как при $H \to \infty$ $\frac{1}{H}$ равняется нулю.

Эта работа совершается за счет кинетической энергии тела; при этом скорость тела должна быть доведена до величины v_{II}, называемой второй космической скоростью.

$$\frac{m v_{II}^2}{2} = \frac{\gamma\, m M_З}{R_З},$$

откуда $v_{II} = \sqrt{2 \cdot \frac{\gamma M_З}{R_З}}$ или, заменив $\gamma M_З = g R_З^2$, получим $v_{II} = \sqrt{2 g R_З}$. Как мы видим, эта скорость в $\sqrt{2}$ раз больше первой космической скорости искусственного спутника, вращающегося около земной поверхности, т. е. $v_{II} = \sqrt{2}\, v_I$. Итак, для запуска космических кораблей с земной поверхности вторая космическая скорость $v_{II} \approx 11{,}2$ *км/сек.*

Разговор с учащимися о второй космической скорости интересно продолжить, выведя формулу для расчета этой скорости, если точка запуска будет находиться на высоте h от поверхности Земли. Легко показать, что в этом случае $v_{II} = R_З \sqrt{\frac{2g}{R_З + h}}$, т. е. опять в $\sqrt{2}$ раз больше значения первой космической скорости на этой высоте[1].

Можно предложить учащимся рассчитать значение второй космической скорости, на основе составленного уравнения, для различных значений h, например для $h = R_З$.

---

[1] Для этого нужно иметь в виду, что

$$g_h = g_0 \frac{R_З^2}{(R_З + H)^2}.$$

Им нужно разъяснить, что космические скорости не сообщаются телам вблизи земной поверхности, где они встречают огромные сопротивления. Плотные слои атмосферы преодолеваются со сравнительно малыми скоростями. И лишь на высоте разреженных слоев им сообщается вторая космическая скорость, которая может быть меньше 11,2 *км/сек* (в зависимости от h).

б) Понимание явления невесомости учащимися подготовлено при изучении понятия о весе тел и о состоянии весомости.

К выяснению понятия невесомости целесообразно подойти от рассмотрения вопроса об изменении веса тел в опускающемся с некоторым ускорением a лифте. Особо следует остановиться на случае падения лифта с ускорением g.

Задачи на изменение веса тел при их подъеме или опускании с ускорением решаются с учащимися при применении законов динамики к различным случаям прямолинейных движений. В задачах предлагается обычно такой вопрос: найти давление тела на пол лифта или натяжение троса, на котором висит груз, при ускоренном движении лифта вниз или подъеме вверх.

В связи с тем что вес тела мы определяем как вызываемое притяжением к земле давление тела на опору или натяжение подвеса, то мы можем и вопрос в таких задачах ставить непосредственно так: найти, чему равен вес тела в лифте при его движении с различными ускорениями.

Итак, разбираем вопрос о весе тела в лифте, движущемся вниз с ускорением a, т. е. о натяжении пружины, на которой оно подвешено. Под действием силы тяжести mg и направленной вверх силы упругости пружины F (рис. 41) груз, имеющий массу m, движется вместе с лифтом с ускорением a. Примем за положительное направление оси отсчета направление ускорения лифта. Тогда $ma = mg - F$ и $F = mg - ma$.

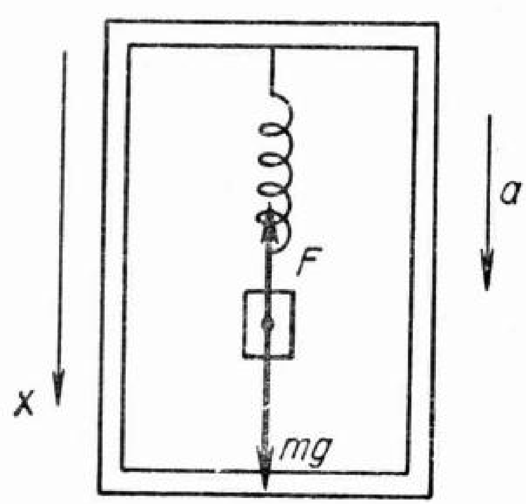


Рис. 41

Вес груза равен силе упругости, но направлен противоположно:

$$P = F = mg - ma.$$

Таково будет показание пружинных весов в лифте, опускающемся с ускорением a — оно меньше, чем в покоящемся или равномерно движущемся лифте, и зависит от величины ускорения. В покоящемся лифте показание динамометра было бы равно mg. Когда же лифт опускается с ускорением, то это показание, т. е. вес тела, может как угодно отличаться от mg. Это зависит от величины ускорения, с которым весы движутся относительно неподвижной системы координат.

Выделяем теперь особо случай, когда лифт падает с ускорением $a = g$. В этом случае $F = 0$; натяжение пружины исчезает, а следовательно, и вес тела $P = F = 0$.

К этому выводу можно подойти и непосредственно: падение лифта и находящегося в нем груза с ускорением g означает, что, кроме силы притяжения земли mg, никакие силы на тело не действуют — натяжение пружины отсутствует, $P = 0$.

Так мы приходим к понятию невесомости, особо подчеркивая, что оно заключается в отсутствии давления на опору (или натяжения подвеса) и соответственно упругих сил деформации опоры (или подвеса) и самого тела, но никак не связано с отсутствием силы притяжения к Земле. Наоборот, оно как раз наступает, как было показано, именно тогда, когда на тело действуют только силы тяготения.

В самом деле, если на тела действуют только силы тяготения, они всем телам системы, всем частицам каждого тела сообщают одинаковые ускорения. При этом ни одно из них не может быть опорой для другого; точно так же никакая часть каждого из этих тел не может служить опорой для других его частей. Поэтому в телах, находящихся под действием одних только сил тяготения, отсутствуют деформации и внутренние напряжения. Именно в этом и состоит явление невесомости.

Явление невесомости необходимо учащимся продемонстрировать на опытах. Среди множества описанных в последнее время в методической литературе опытов, демонстрирующих явление невесомости, нужно выбрать такие, которые наиболее убедительно демонстрируют явление «в чистом виде».

К таким опытам относятся, с нашей точки зрения, все многочисленные разновидности хорошо известных опытов Любимова. Напомним их. На легкой рамке (рис. 42), которая скользит вдоль вертикальных направляющих проволок, укреплены на одинаковых пружинах несколько грузов разной массы. При неподвижной рамке эти грузы по-разному растягивают пружины. Но если освободить рамку и предоставить ей возможность падать свободно, растяжения пружин исчезают и все грузы располагаются на одной высоте, соответствующей одинаковой длине нерастянутых пружин.

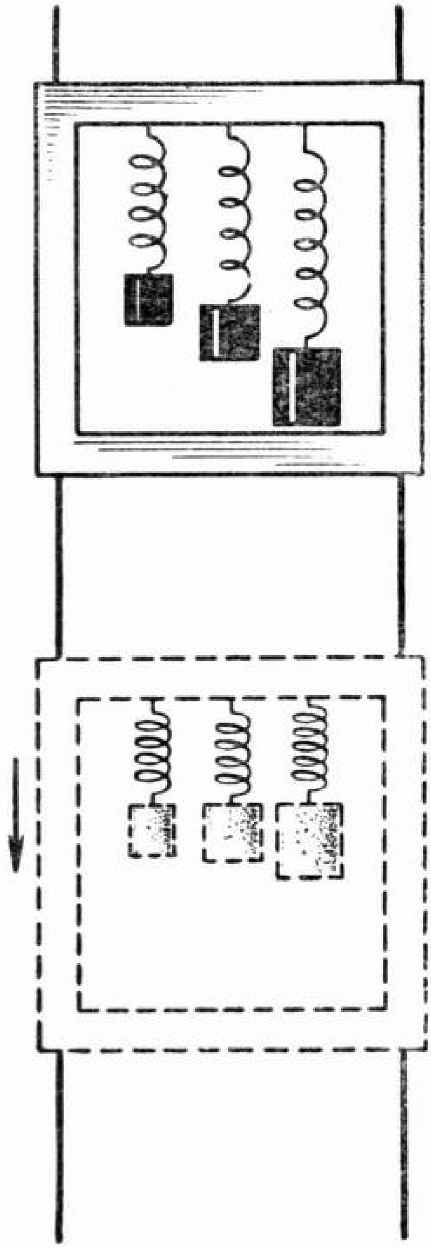


Рис. 42

Достоинством этих опытов является то, что в них демонстрируется исчезновение деформации [1]. Быстрота протекания опытов затрудняет наблюдение явления, это заставляет обратиться к другим опытам, которые могут быть основными в демонстрации данного явления.

Опыт, позволяющий демонстрировать явление невесомости, описан в книге Р. Гирке и Г. Шпрокхофа [2]

[1] Почему исчезает деформация пружины? Это не самоочевидно и не вытекает непосредственно из данного выше объяснения невесомости; оно требует специального пояснения. В самом деле, в первый момент рамка движется под действием не только силы тяжести, но и растянутых пружин, поэтому она движется с ускорением, большим g. Гири начинают падать с ускорением, меньшим g, так как, кроме силы тяжести, на грузы действуют натяжения пружин, направленные вверх. Поэтому рамка догоняет гири, и растяжения пружин уменьшаются. Так будет продолжаться до тех пор, пока все пружины не сократятся до нормальной длины.

[2] Р. Гирке и Г. Шпрокхоф, Эксперимент по курсу элементарной физики, Учпедгиз, М., 1959, ч. I, стр. 161.

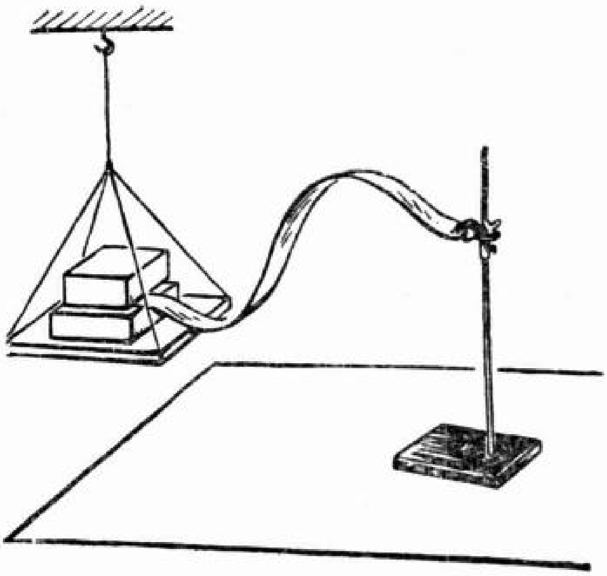


Рис. 43

и конструктивно усовершенствован Б. С. Зворыкиным. Пластинка из жести или фанеры (рис. 43) подвешивается при помощи шнуров, укрепленных по его краям. На пластинку кладут два куска металла с массами по 2 *кг*. Между ними зажимается конец длинной полоски газетной бумаги. Вытащить эту полоску бумаги из-под верхнего куска металла не удается, так как при первой же попытке она обрывается.

Однако если, держа второй конец бумажной полоски в руке, пережечь шнур подвеса, то падающий груз перестает ее прижимать и она свободно повисает в воздухе, оставаясь неповрежденной.

Итак, при свободном падении тел наступает невесомость[1]. Здесь важно разъяснить, что невесомость наступает не только при свободном падении, но и при любом движении, происходящем под действием одних только сил тяготения.

Рассмотрим движение космического корабля во время свободного полета по орбите, после того как уже в безвоздушном пространстве его двигатель прекратил свою работу и корабль отделился от ракеты-носителя. Во время «свободного» полета корабль совершает относительно земли криволинейное движение по орбите, близкой к круговой. Силой, которая сообщает кораблю и всем телам, находящимся в нем, ускорение, является сила тяготения к земле. Следовательно, при прекращении работы двигателей корабль-спутник, выведенный на орбиту со скоростью, равной первой космической скорости, «падает» с центростремительным ускорением под действием силы земного тяготения. Легко понять, что

[1] При этом не учитывается сопротивление воздуха, незначительное при малых скоростях. При больших скоростях (при падении с большой высоты) его нельзя не учитывать, поэтому нельзя говорить о полной невесомости.

в корабле-спутнике возникает при этом состояние невесомости так же, как и в лифте, который под действием силы тяжести падает с ускорением свободного падения.

Сила $F = \frac{\gamma Mm}{r^2}$ сообщает космическому кораблю и всем телам в нем одинаковые по величине ускорения. Поэтому корабль и все, что в нем находится, все частицы, из которых он состоит, совершают под действием сил тяготения абсолютно одинаковые движения, т. е. имеют одинаковые скорости и траектории. Поэтому совершенно исчезают обусловленные весомостью давление одной части корабля на другую, давление головы на плечи, ступней человека на пол; человек не чувствует тяжести предмета, который он держит; исчезает давление кресла пилота на опору. Все предметы, находящиеся внутри корабля, свободно парят в воздухе, т. е. возникают все явления, о которых учащиеся много слышали, читали и многие даже видели на экранах своих телевизоров.

Отметим, что все объяснения мы проводили с точки зрения неподвижного наблюдателя, связанного с землей. А то, что было видно на экранах телевизоров, мы наблюдали «глазами» телекамеры, находившейся на борту корабля. Для космонавта, связанного с кораблем, все предметы, выпущенные из рук, «не падают» на пол, как будто на них перестала действовать сила тяжести, хотя эти силы, конечно, не исчезли. Дело в том, что движения всех тел и самого космонавта происходят с одной и той же скоростью, и относительно него они находятся в покое. Проявление силы тяжести, удерживающей корабль и все, что в нем находится, на орбите, он не замечает.

Рассмотрение явлений с точки зрения наблюдателя в неинерциальной системе отсчета проводить в средней школе не приходится. Подробное изложение этих вопросов, которое может служить пособием для учителя, а также может быть с интересом прочитано учащимися, можно найти в книге В. И. Левантовского [1].

В заключение остановимся на объяснении явления перегрузки. Оно уже почти очевидно из изложенного выше. Начать объяснение можно опять-таки с явлений

---

[1] В. И. Левантовский, Тяжесть, невесомость, перегрузка, изд. «Знание», М., 1964.

в движущемся с ускорением лифте и показать, что если лифт поднимается, например, с ускорением a, то вес тела P будет больше силы тяжести на величину ma:

$$ma = -mg + F \quad \text{и} \quad F = mg + ma,$$

где F — сила упругости пружины. (За положительное направление оси отсчета снова выбираем направление ускорения лифта.) Значит, и вес P, определяемый натяжением пружины, больше, чем сила тяжести mg, на величину ma.

Перегрузкой называют отношение негравитационных сил, действующих на тело, к силе тяжести.

Отметим, что термин «перегрузка» неточно выражает смысл этого понятия. Приставка «пере» не означает избытка над весом. При равномерном подъеме лифта, т. е. при $a=0$, сила упругости F, с которой дно лифта действует на тело, равна силе тяжести P. Перегрузка при этом равна $\frac{F}{P}=1$. Если бы лифт подымался с ускорением $a=g$, $a=2g$,..., сила упругости была бы равна соответственно $F=2mg$, $3mg$,... и перегрузка была бы $\frac{2mg}{mg}=2$, $\frac{3mg}{mg}=3$ и т. п.

Аналогичная ситуация создается на борту космического корабля при его движении на активных участках траектории, т. е. когда работает двигатель, сообщающий ему ускорение,— при выходе на орбиту или при спуске с нее.

При включении ракетного двигателя на корпус корабля действует сила негравитационного происхождения. Она создается благодаря давлению стремительно расширяющихся газов — продуктов сгорания топлива. Дно кабины, получающей ускорение, направленное вертикально вверх, будет давить на космонавта, на все тела, находящиеся в кабине. Тела в кабине корабля будут прижаты к полу с некоторой силой F, которая при $a=g$, $a=2g$, $a=3g$ и т. д. будет равна соответственно удвоенной, утроенной, учетверенной и т. д. силе притяжения к земле. Аналогично и при спуске корабля с орбиты сила тяги двигателя изменяет движение, которое корабль имел под действием одних лишь гравитационных сил.

Состояние невесомости сменяется весомостью, тела вновь оказываются прижаты к полу кабины с силой, которая соответственно полученному кораблем ускорению может превосходить силу тяжести в несколько раз.

§ 6. Движение тел, брошенных горизонтально и под углом к горизонту

Кроме движения тела по окружности, которое происходит под действием центральных сил, в курсе физики средней школы обычно рассматривается еще один вид криволинейного движения — параболическое движение тел, брошенных горизонтально или под углом к горизонту. Эти движения происходят под действием силы тяжести, которая направлена под углом к начальной скорости тела.

Изучение этих движений в практике преподавания, а также и изложение этих вопросов в ряде элементарных учебников ведется следующим образом. Утверждается, что брошенное горизонтально тело участвует одновременно в двух движениях — равноускоренном под действием силы тяжести вертикально вниз и равномерном, по инерции, в направлении начальной скорости. Причем, так как о системе отсчета при этом ничего не говорится, то имеется в виду одна система — *земля*. Не будем повторять здесь того, что мы уже выясняли выше о возможности утверждения об одновременном существовании двух движений. Совершенно очевидно, что по отношению к одной системе отсчета тело совершает лишь одно движение. По отношению к земле это движение совершается по криволинейной (параболической) траектории. Однако его, как и любое криволинейное движение, можно представить как результат сложения двух перемещений по отношению к различным системам отсчета.

Представим себе, что с летящего равномерно и прямолинейно самолета падает груз. Движение падающего груза можно рассматривать в двух системах отсчета.

По отношению к самолету (продолжающему равномерное прямолинейное движение) груз совершает равноускоренное движение по вертикальному направлению. Это так называемое относительное движение (по отношению к движущейся равномерно и прямолинейно системе отсчета).

Такое заключение о характере движения тела по отношению к движущейся системе отсчета тела можно сделать на основе изученного учащимися принципа относительности Галилея. Этот принцип утверждает, что во всех системах, движущихся равномерно и прямолинейно по отношению друг друга, все механические явления протекают одинаково, т. е. законы этих движений тождественны, они не зависят от системы отсчета. Так, например, в движущемся равномерно и прямолинейно вагоне предмет, выпущенный из рук пассажира, падает по отношению к нему по вертикали равноускоренно, так же как он падает, когда мы находимся в покоящемся вагоне.

То же имеет место и с грузом, падающим с самолета. Если самолет продолжает полет с неизменной скоростью, то его можно принять за инерциальную систему отсчета, по отношению к которой падающий груз движется так, как если бы он был сброшен с неподвижного тела (например, горы), находящегося на той же высоте. Перемещение по отношению к движущейся равномерно и прямолинейно системе отсчета есть так называемое относительное перемещение.

Однако в системе отсчета *земля,* по отношению к которой движется самолет, поезд и т. д. (переносное перемещение), движение груза выглядит по-другому — оно имеет в каждый момент полета иную скорость и его траектория является кривой линией. Для того чтобы определить перемещение, скорость и траекторию тела относительно земли, нужно сложить эти величины в относительном и переносном движениях.

Задача сложения перемещений и скоростей состоит в том, чтобы по заданным относительному и переносному движениям определить движение относительно системы отсчета, условно принимаемой за неподвижную.

Нужно заметить, что самолет (поезд) динамически не связан с телами, падающими с него, т. е. изменение движения самолета после падения груза с него не может сказаться на движении падающего груза. В том случае, когда самолет изменяет скорость, он уже не может служить системой отсчета. Для анализа движения падающего тела в этом случае можно ввести условную подвижную систему отсчета, которая движется с той же по величине и направлению скоростью, которую имел самолет (поезд) в момент падения груза. Относительное движение рассматривается по отношению к этой условной системе отсчета.

На этом, собственно, и основан координатный метод разложения криволинейного движения точки на два прямолинейных. Допустим, что движущаяся точка M описывает в некоторой системе отсчета, изображаемой системой координатных осей Oxy, некоторую кривую линию

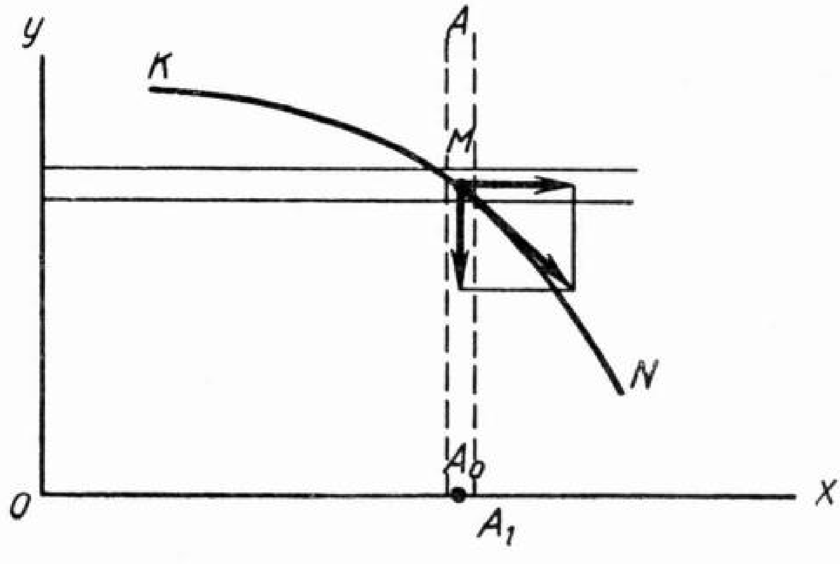


Рис. 44

KN (рис. 44). Представим себе, что через точку M проходит параллельная оси Oy прямая AA_1, движущаяся поступательно (в частном случае равномерно) так, что некоторая ее точка A_0 перемещается вдоль оси Ox. Мы можем считать, что точка M совершает относительное движение вдоль прямой AA_1, которая в свою очередь перемещается поступательно (в частности, равномерно и прямолинейно) вдоль оси Ox. Введенная нами прямая AA_1 является, таким образом, условной подвижной системой отсчета, совершающей переносное движение по отношению к системе отсчета Oxy.

Итак, мы можем определить криволинейное движение точки M как результат сложения двух прямолинейных движений — относительного по прямой AA_1 и переносного параллельно оси Ox.

Для задания обоих прямолинейных движений должны быть известны законы, по которым можно определить, как меняется для любого момента времени t расстояние y движущейся точки M от выбранной нами точки A_0 на оси Ox и расстояние x любой точки подвижной системы отсчета (например, A_0) от начала координат O:

$$y = f_1(t); \quad x = f_2(t).$$

В обоих равенствах под $f_1(t)$ и $f_2(t)$ понимают какие-то определенные зависимости, позволяющие для заданного значения t найти соответствующие значения x и y.

Для интересующего нас частного случая криволинейного движения — параболического движения под действием силы тяжести — относительное движение задается формулами равноускоренного движения с ускорением g, а переносное — формулами равномерного движения со скоростью v_0, полученной в момент бросания.

Если v_y — скорость точки в относительном движении, а v_x — скорость этой точки подвижной системы отсчета в переносном движении, то скорость движения относительно неподвижной системы отсчета Oxy мы найдем по правилу сложения скоростей, т. е. по правилу параллелограмма, построенного на скоростях v_x и v_y:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}.$$

Приведенный анализ помогает определить, какова должна быть методика изучения параболических движений в школьном курсе физики.

Здесь возможны два пути.

Первый из них может быть принят в том случае, если с координатным методом изучения механических движений учащиеся не знакомы. Изучение движения тел, брошенных горизонтально (или под углом к горизонту), желательно начинать в этом случае с рассмотрения падения тел в движущемся равномерно вагоне или с летящего равномерно самолета. Это позволит принять в качестве системы отсчета вагон или самолет и не вводить вначале в рассмотрение условную систему отсчета, что может показаться учащимся ничем не оправданным и потому искусственным.

Применив известный уже учащимся принцип относительности Галилея, утверждают, что относительно вагона (самолета) тело совершает движение так же, как и в неподвижной системе отсчета, т. е. падает с ускорением

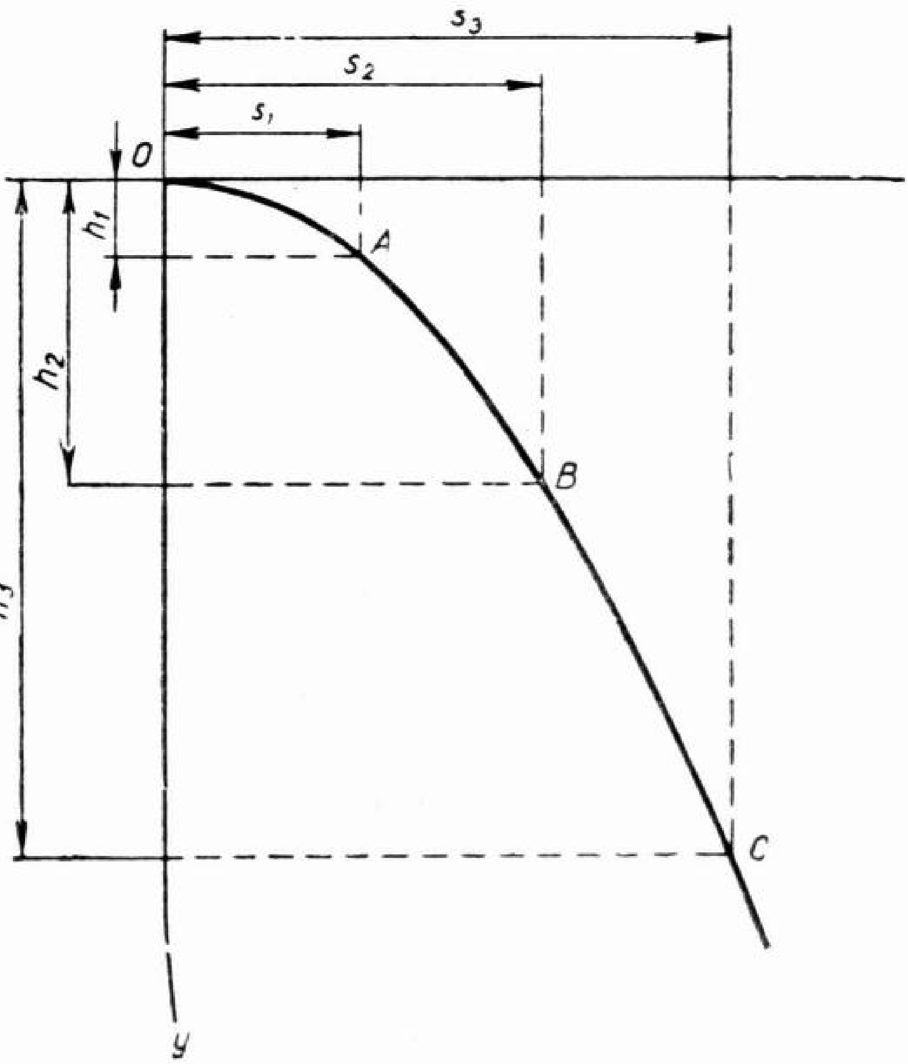


Рис. 45

свободного падения. Перемещение в этом направлении откладывается на вертикальной оси координат Oy, считая начало координат O точкой падения тела. Для пересчета перемещения по отношению к другой системе отсчета — поверхности земли — производим сложение относительного смещения тела в системе отсчета *поезд (самолет)* и переносного смещения самой системы отсчета *поезд (самолет)* относительно земли. Переносное смещение откладывается по оси Ox.

Таким образом строится параболическая траектория движения тела, брошенного горизонтально и происходящего под действием постоянной силы тяжести (рис. 45).

Далее необходимо указать учащимся, что самолет (поезд) можно рассматривать в качестве инерциальной системы отсчета только в том случае, если он продолжает и после падения тела двигаться прямолинейно и равномерно с той же скоростью, с которой он двигался в момент бросания.

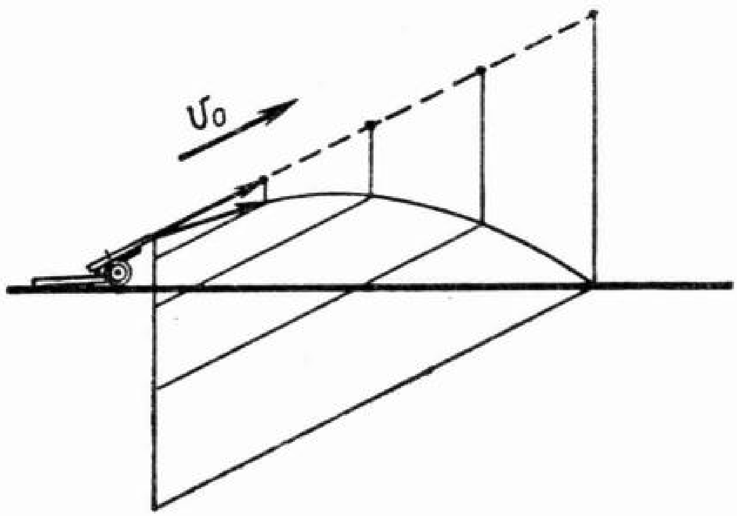


Рис. 46

Это обосновывает необходимость введения движущейся равномерно и прямолинейно условной системы отсчета. В этом случае введение этой системы отсчета не покажется учащимся искусственным и позволит перейти к рассмотрению того, как движутся тела, брошенные горизонтально или под углом к горизонту.

Движение тела, брошенного под углом к горизонту, анализируется таким же образом: принимаем, что в направлении бросания равномерно и прямолинейно движется условная система отсчета (рис. 46), и выполняем построение траектории движения тем же способом, что и для бросания в горизонтальном направлении.

Мы не будем останавливаться на хорошо известных демонстрациях построения и вычерчивания траектории параболического движения с помощью шариков, скатывающихся с желобов, струи воды (рис. 47 а и 47 б) и т. д. и моделирования траектории с помощью маятников, дли-

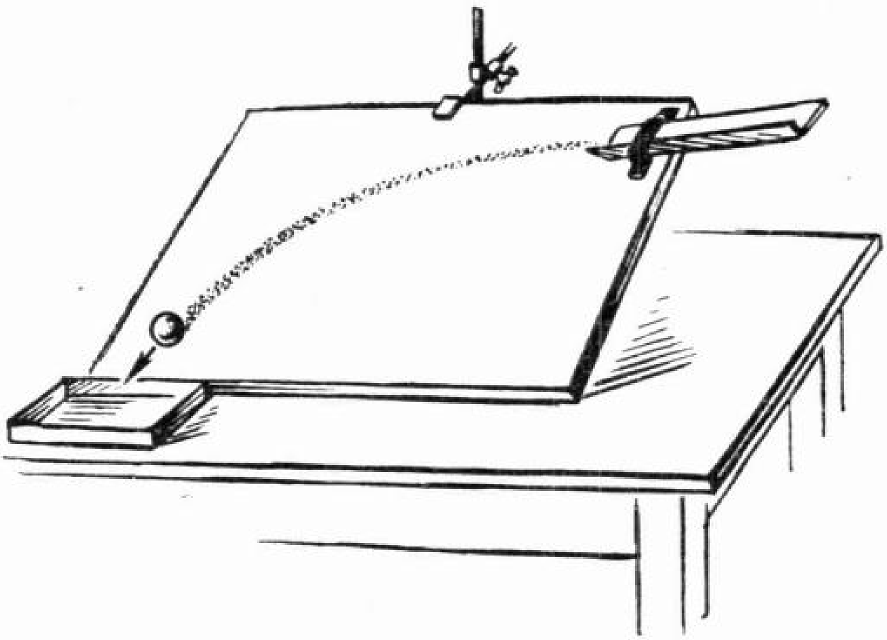


Рис. 47 а

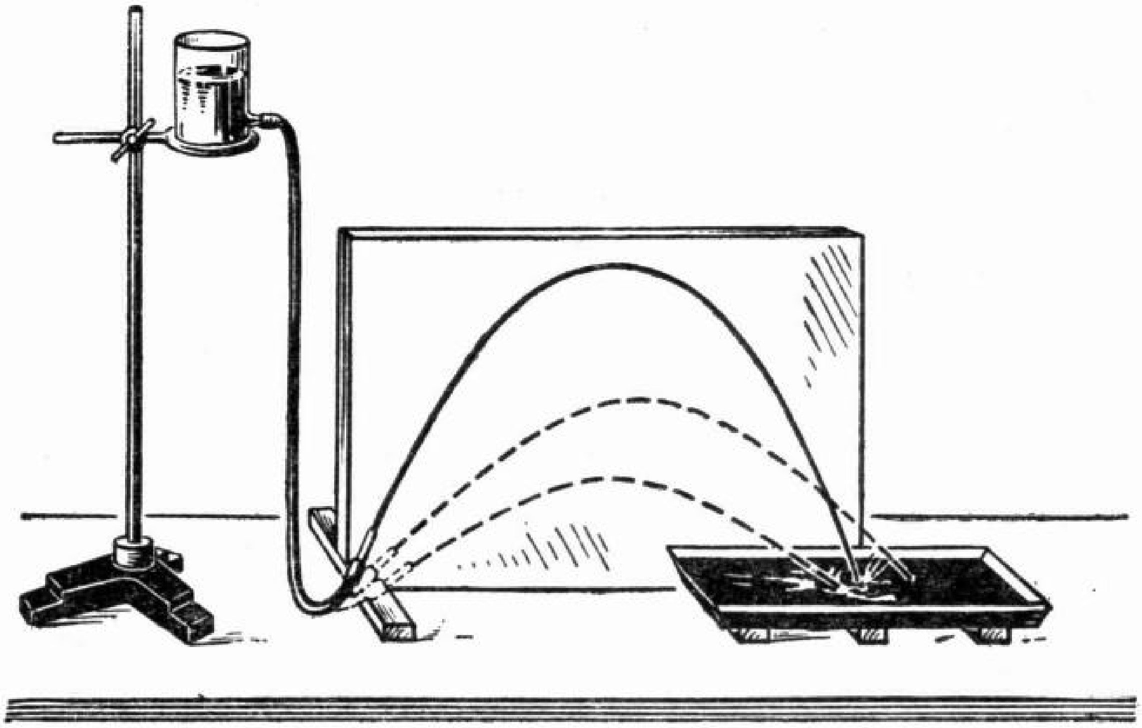


Рис. 47 б

ны которых пропорциональны квадратам целых чисел (рис. 48).

Второй путь изучения параболического движения под действием силы тяжести тел, брошенных под углом к горизонту, основан на координатном методе разложения криволинейного движения. Этот путь целесообразен в том случае, если и в начале раздела механики, при изучении кинематики, координатный метод уже применялся. В этом случае изучение движения тел, брошенных горизонтально или под углом к горизонту, следует начать с демонстрации этих движений.

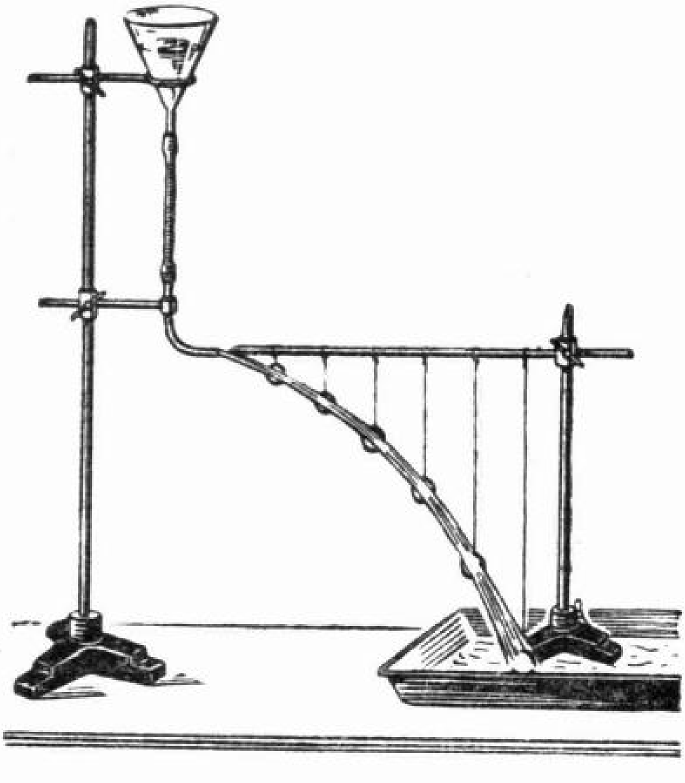


Рис. 48

На указанных выше опытах и моделях показывают учащимся, что траектория движения этих тел — кривая линия, не выясняя пока характера этой кривой.

После этого переходят к анализу того, как можно любое криволинейное движение, и в частности движение брошенных тел, представить в виде суперпозиции двух прямолинейных движений, совершающихся в двух различных системах отсчета, т. е. можно разложить перемещения и скорости криволинейного движения на составляющие — горизонтальную $v_г$ и вертикальную $v_в$.

В качестве исходного эксперимента, помогающего уяснению того, что в основе координатного метода разложения криволинейного движения на две составляющие лежит рассмотрение его в различных системах отсчета, можно воспользоваться установкой, состоящей из равномерно движущейся тележки, с которой падает груз, записывающий на доске движение — параболическую кривую.

После этого приводят чертеж, показывающий, что любое криволинейное движение может быть разложено на два прямолинейных движения (рис. 49).

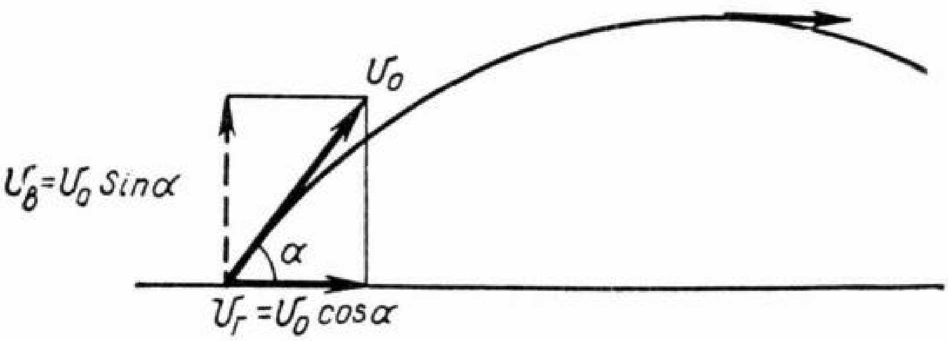


Рис. 49

Дальнейший путь изучения этих движений очевиден. Ход изложения примерно следующий. Устанавливают, что при движении тела, брошенного горизонтально, горизонтальная составляющая скорости не изменяется, а вертикальная изменяется под действием силы тяжести по закону свободного падения тел: $v_в=gt$. Поэтому для любого момента времени эти составляющие могут быть вычислены, а по ним определена скорость сложного движения (относительно земли) для любого момента времени.

Для построения траектории движения вычисляют горизонтальную и вертикальную составляющие перемещения для последовательных равных промежутков времени, по ним определяют координаты точки относительно земли, выполняют построение и выясняют, что полученная кривая — парабола.

Изучение движения тела, брошенного под углом к горизонту, проводят тем же методом. Если начальная скорость брошенного тела v_0 направлена вверх под углом α к горизонту, то в начальный момент тело имеет не только скорость в горизонтальном направлении $v_г = v_0 \cos\alpha$, но и вертикальную составляющую $v_в = v_0 \sin\alpha$ (рис. 49). И в этом случае горизонтальная составляющая скорости изменяться не будет, а вертикальная сначала будет убывать по закону равнозамедленного движения с ускорением $-g$, а затем, в тот момент, когда эта составляющая скорости обратится в нуль, тело начнет опускаться и скорость движения будет возрастать по тому же закону с ускорением g, причем время подъема тела равно времени падения тела.

При построении траектории движения тела, брошенного под углом α к горизонту, находят составляющие смещения тела в последовательные равные промежутки времени. Для этого нужно предварительно, зная вертикальную составляющую начальной скорости, определить время подъема:

$$t_{подъема} = \frac{v_в}{g}.$$

Вертикальные составляющие перемещения за одну, две, ..., t *сек* найдем по формуле:

$$s = v_в t - \frac{gt^2}{2} = v_0 \sin\alpha \cdot t - \frac{gt^2}{2}.$$

Горизонтальные составляющие перемещения находят по формулам равномерного движения. Далее по координатам тела относительно земли строят траекторию (рис. 50).

Анализ движения и построение траектории с помощью координатного метода несколько более громоздок. Однако он дает возможность легко решать задачи, касающиеся дальности полета, наибольшей высоты подъема, времени подъема, времени спуска и т. д.

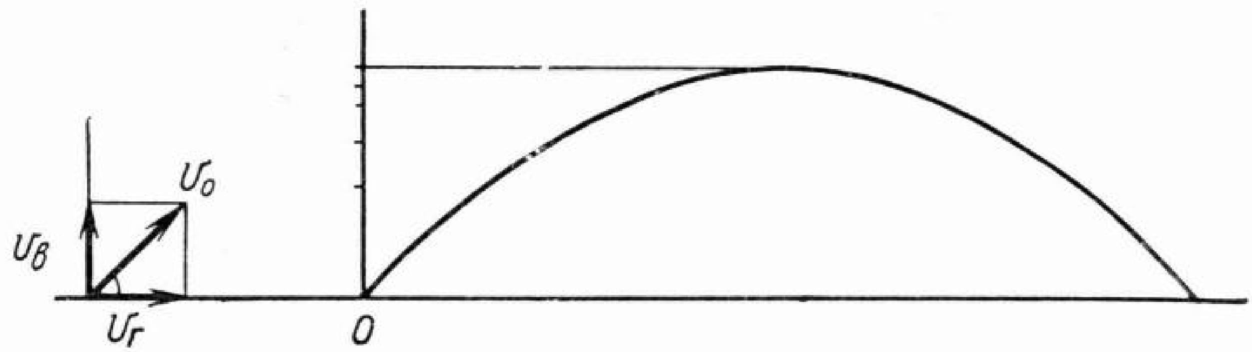


Рис. 50

Приведем примеры решения задач.

С башни высотой $H=25$ *м* бросили камень со скоростью $v_0=15$ *м/сек* под углом $\alpha=30°$ к горизонту. Найти: 1) Сколько времени камень будет в движении? 2) На каком расстоянии от основания башни он упадет на землю? 3) С какой скоростью он упадет? 4) Какой угол φ составит траектория камня с горизонтом в точке его падения на землю?

Горизонтальная и вертикальная составляющие начальной скорости будут (рис. 49):

$$v_в = v_0 \sin\alpha \quad \text{и} \quad v_г = v_0 \cos\alpha.$$

Максимальная высота подъема над уровнем башни:

$$h = \frac{v_0^2 \sin^2\alpha}{2g},$$

высота подъема над уровнем земли:

$$s = H + h = H + \frac{v_0^2 \sin^2\alpha}{2g}.$$

Общее время движения камня $t=t_1+t_2$, где t_1 — время подъема на высоту h и t_2 — время падения с высоты s:

$$t_1 = \frac{v_0 \sin\alpha}{g}; \quad t_2 = \sqrt{\frac{2s}{g}}.$$

Расстояние от основания башни до места падения:

$$l = v_0 \cos\alpha (t_1 + t_2).$$

Скорость падения камня $v=\sqrt{v_x^2+v_y^2}$, где $v_x = v_0 \cos\alpha$, а $v_y = gt$.

Угол, образованный траекторией камня с горизонтом, находится из выражения $v_y = v_x \operatorname{tg}\varphi$, откуда $\operatorname{tg}\varphi = \frac{v_x}{v_y}$.

Подставляя числовые значения получают:

1) $t_1 = 0{,}77$ *сек*; $t_2 = 2{,}39$ *сек* и $t = 3{,}16$ *сек*.
2) $l \approx 41$ *м*.
3) $v = 26{,}7$ *м/сек*.
4) $\operatorname{tg}\varphi = 1{,}8$ и $\varphi = 61°$.

Глава IV

ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В МЕХАНИКЕ

§ 1. Законы сохранения в курсе физики средней школы

Из трех законов сохранения, действующих в области механических явлений, в курсе физики средней школы подробно изучается лишь один — закон сохранения и превращения энергии. Этот закон не только изучается, но им пользуются (правда, не в достаточной степени) как определенным методом, позволяющим объяснять конкретные явления, выводить частные закономерности, решать разнообразные задачи.

Закону сохранения линейного импульса (количества движения) уделено значительно меньше внимания. С ним знакомят учащихся, но им очень мало пользуются в самой механике и почти совсем не применяют при изучении других разделов физики, например физики ядра, где, как известно, он очень важен, так как он лежит в основе одного из методов идентификации элементарных частиц.

Что касается последнего из законов сохранения в механике — закона сохранения вращательного импульса (момента импульса), то он до сих пор вообще не изучался в курсе физики средней школы.

Недостаточное внимание к изучению законов сохранения в средней школе, в частности при изучении механики, совершенно неоправдано. Законы сохранения в физике занимают особое место. Их исключительная общность определяет научное, методологическое и философское значение этих законов.

Законы сохранения являются пробным камнем любой физической теории. Непротиворечивость теории законам сохранения служит убедительным доказательством ее справедливости. Они являются основой важнейших расчетов в прикладной физике и технике.

Особенное значение они приобретают в тех случаях, когда возникает необходимость исследовать процессы, совершающиеся в телах, внутренние связи которых еще не известны. В этих случаях законы сохранения являются методом проникновения в структурные закономерности материи.

Глубокое проникновение в микромир не только показало выполнение классических законов сохранения — тех, которые были сформулированы в области механических движений, а также закона сохранения массы, электрического заряда, — но и позволило открыть специфические законы, действующие в мире микрочастиц. Это законы сохранения орбитального и собственного момента (спина) электрона в атоме, законы сохранения четности, барионного заряда, лептонного заряда, странности и т. д.

Все развитие физики убедительно показывает методологическое значение изучения законов сохранения, действующих как в области механики, так и в других областях природы.

Каждый из этих законов выражает сохранение некоторых фундаментальных свойств материи, характеризуемых соответствующими физическими величинами, а также связь материи с формами ее существования — пространством и временем. Основные принципы материализма получили в этих законах подтверждение и конкретизацию, например принцип неуничтожимости и несотворимости материи.

В последние годы была произведена тщательнейшая экспериментальная проверка известных в настоящее время законов сохранения. О результатах этих экспериментов, выполненных на пределе современных технических возможностей в отношении точности измерений, рассказано в статьях, опубликованных в журнале «Вопросы философии»[1]. Строгое выполнение законов сохранения, а вместе с тем и основных принципов материализма нашло свое полное подтверждение.

Задача формирования у учащихся средней школы научного диалектико-материалистического мировоззрения не может быть решена без раскрытия универсаль-

---

[1] Г. Фейнберг, М. Гольдхабер, Законы сохранения в физике, «Вопросы философии», 1964, № 10.

ного характера законов сохранения, без показа их значения в науке и технике.

Обратим внимание еще на следующий аспект развития мышления учащихся. Формируя мировоззрения учащихся, развивая их мышление, мы постоянно привлекаем их внимание к процессам изменения, присущим телам. Однако в самой действительности изменение неотделимо от сохранения.

В физике атома открыта, например, всеобщая превращаемость элементарных частиц. Вместе с тем известно, что в процессах взаимных превращений частиц некоторые их фундаментальные свойства сохраняются.

«Нет сомнения, что объекты, окружающие нас, должны в течение какого-то времени изменяться в отношении формы и положения... Человеческий разум, однако, всегда стремится отыскать за изменяющимися свойствами физических объектов нечто неизменное. В развитии физики эти поиски были щедро вознаграждены открытием закона сохранения» [1].

Для развития научного мышления оба эти аспекта — раскрытие диалектики изменяющегося и сохраняющегося в явлениях природы — одинаково важны.

«Нельзя думать, что можно отразить в научном познании адекватную картину исследуемых процессов, констатируя лишь вечно текущее, изменяющееся, точно так же, как невозможно познать мир, рассматривая лишь абсолютно неизменное, статичное в объектах природы. Только вскрывая противоречивое единство изменяющегося и неизменного, можно познать законы действительности» [2].

В старших классах средней школы необходимо знакомить учащихся в доступной для них форме с наиболее общими законами физики, какими и являются законы сохранения.

Раскрытие универсального значения таких сохраняющихся величин, как энергия, линейный импульс, вращательный импульс и соответствующих им законов сохранения, должно начинаться в механике и продолжаться

---

[1] Г. Фейнберг, М. Гольдхабер, Законы сохранения в физике, «Вопросы философии», 1964, № 10.

[2] Н. Ф. Овчинников, К статье «Законы сохранения в физике», «Вопросы философии», 1964, № 10.

во всех остальных разделах школьного курса физики. Это расширит научный кругозор учащихся, позволит им лучше понимать физические явления и процессы, будет способствовать развитию у них материалистического мировоззрения.

В этой главе мы рассмотрим лишь вопрос о том, как эти законы изучаются в механике. Но в этом изучении предусмотрим также и то, что необходимо для применения знания об этих сохраняющихся величинах и закономерностях в других разделах физики.

§ 2. Закон сохранения импульса

Закон сохранения импульса является прямым следствием второго и третьего законов Ньютона.

Для изолированного тела этот закон является очевидным следствием второго закона Ньютона. Если второй закон динамики записать в форме $F=\frac{\Delta mv}{\Delta t}$, то не требуется особых усилий, чтобы учащимся стало ясно, что когда на тело не действуют силы, то изменение импульса равно нулю, т. е. импульс тела $p=mv$ остается постоянным. Значительно сложнее добиться того, чтобы учащиеся достаточно ясно представили значение величины mv и ее сохранения.

Полезно обращать их внимание на то, что скорость и импульс, хотя и связаны друг с другом, но это разные характеристики движения. Одна из них чисто кинематическая. Знание одной лишь скорости говорит нам о том, как движется тело, т. е. дает описание движения, но ничего не говорит о силах, необходимых для того, чтобы привести его в движение из состояния покоя или остановить его. Импульс mv является динамической характеристикой движения. Он не указывает скорости тела, хотя и определяет ее направление; импульс связан с силами, изменяющими скорость тела.

Огромное значение понятия импульса и закона его сохранения становится очевидным лишь при рассмотрении взаимодействия двух или нескольких тел.

В случае нескольких взаимодействующих тел закон сохранения импульса выводится из второго и третьего законов Ньютона и оказывается справедливым в том случае, когда эти тела взаимодействуют между собой, но не подвергаются действию внешних сил.

Рассматривают два тела, движущиеся вдоль одной и той же прямой со скоростями v_1 и v_2. Сталкиваясь, они действуют друг на друга с силами, которые по третьему закону будут равны и направлены в противоположные стороны $F_1 = -F_2$. Время действия сил на оба тела Δt одинаково.

На основе второго закона динамики записывают:

$$F_1 \Delta t = m_2(\Delta v_2),$$
$$F_2 \Delta t = m_1(\Delta v_1).$$

Если ввести обозначения скоростей двух тел до и после столкновений — v_1 и v_1', v_2 и v_2', то:

$$F_1 \Delta t = m_2\left(v_2' - v_2\right),$$
$$F_2 \Delta t = m_1\left(v_1' - v_1\right).$$

На основе третьего закона $(F_1 = -F_2)$ получают: $m_2\left(v_2' - v_2\right) = -m_1\left(v_1' - v_1\right)$, или $m_2 v_2' - m_2 v_2 = -m_1 v_1' + m_1 v_1$. Если теперь перенести в левую часть уравнения все величины, относящиеся к движению до столкновения, а в правую — величины, относящиеся к движению после столкновения, то получают:

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1' + m_2 v_2'.$$

Слева мы имеем полный импульс двух тел $(p = m_1 v_1 + m_2 v_2)$ до столкновения, а справа $\left(p' = m_1 v_1' + m_2 v_2'\right)$ — после столкновения:

$$p = p'.$$

Полный импульс системы тел не изменяется в результате взаимодействия.

Другими словами, *в отсутствие внешних сил одни лишь внутренние силы взаимодействия между телами не могут изменить полного импульса системы.* Внутренние силы позволяют лишь отдельным телам системы частично или полностью обмениваться импульсами.

Этот вывод необходимо проиллюстрировать экспериментально и применить к объяснению ряда явлений, иначе ценности его учащиеся не поймут.

Хорошие демонстрации, которые легко могут быть поставлены в средней школе, описаны у С. Э. Хайкина [1].

Сущность опытов ясна из приведенных рисунков 51, *а* и *б*. Осуществляются они с помощью «пушки», укрепленной на тележке. Ставится опыт в двух видах:

а) демонстрируется явление отдачи при выстреле — при вылете «снаряда» «пушка» получает импульс в противоположном направлении (рис. 51, *а*);

б) затем опыт видоизменяется. «Пушка» скатывается с наклонной плоскости (рис. 51, *б*) и при выстреле уже имеет некоторую скорость. После выстрела она останавливается, весь импульс, которым она обладала, она передала снаряду. Эти опыты хорошо иллюстрируют то, что внутренние силы не изменяют полного импульса системы, а позволяют телам системы лишь обмениваться импульсами.

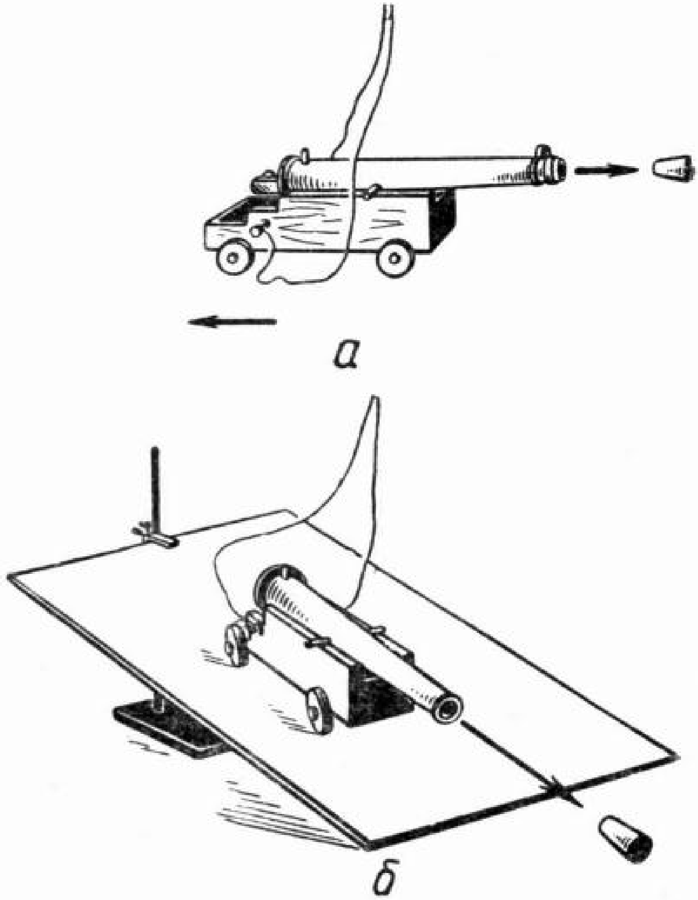


Рис. 51

Приведем еще один опыт, который может быть поставлен для демонстрации закона сохранения импульса в случае трех тел. На тележку, движущуюся с малым трением (рис. 52 а), поставлен ящик с песком. По желобу, укрепленному наклонно, в тележку скатывается стальной шар. При этом она начинает двигаться в направлении, в котором двигался шар. Затем устанавливаем второй желоб (рис. 52 б). Если два шара равной массы одновременно падают в тележку с одинаковой высоты, то тележка остается на месте.

---

[1] С. Э. Хайкин, Физические основы механики, Физматгиз, М., 1963, стр. 116—117.

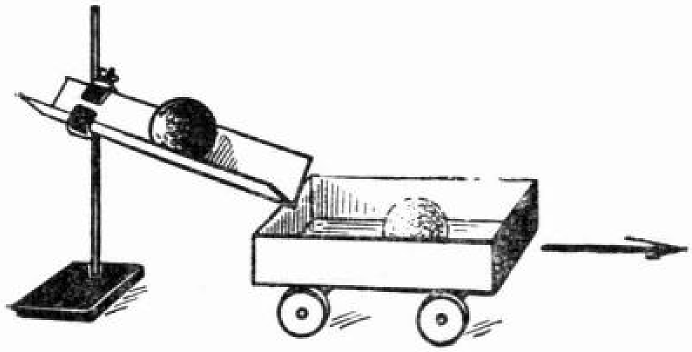


Рис. 52а

Из закона сохранения импульса следует получить очень важный вывод о движении центра масс. Само понятие центра масс появляется именно в этой части курса; до этого учащиеся знали только о центре тяжести тел.

Указываем, что положение центра тяжести в данном теле не зависит от того, где находится тело — на Земле или на Марсе, ведь при переносе тела на другую планету силы тяжести его частей меняются одинаково. Поскольку силы тяжести пропорциональны их массам, естественно называть центр тяжести центром масс.

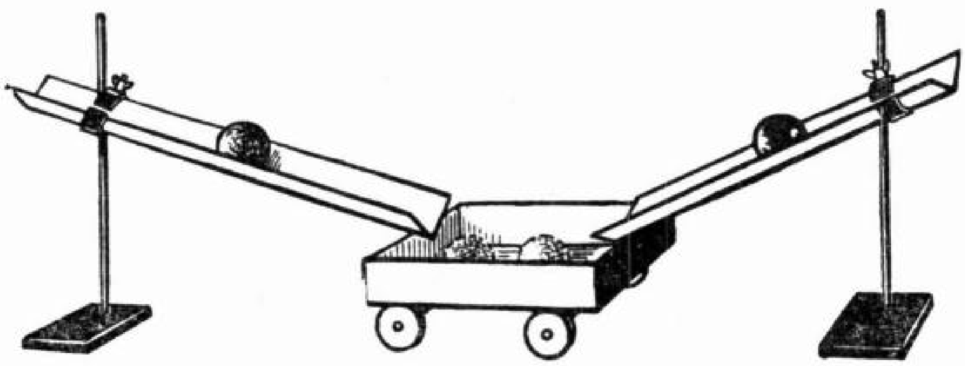


Рис. 52б

Закон движения центра масс выводим на примере системы из двух материальных точек:

а) Прежде всего показываем, что если общий импульс системы равен нулю, то центр масс находится в состоянии покоя.

Это нетрудно сделать путем анализа такого опыта. Два тела с массами m_1 и m_2 касаются упругой пружины, сжатой и связанной ниткой (рис. 53).

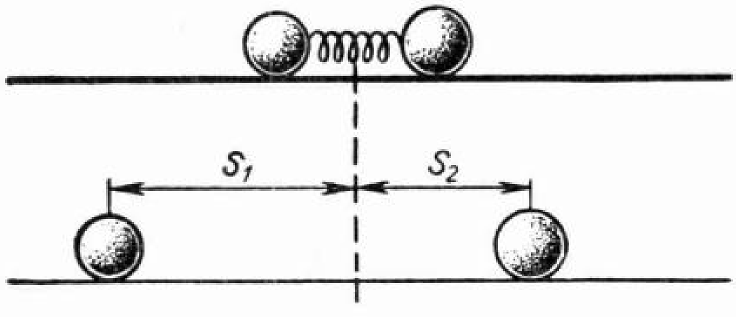


Рис. 53

Если нить поджечь, то тела разлетятся. Причем, на основании закона сохранения импульса, скорости этих тел будут обратно пропорциональны их массам. Значит, и расстояния, которые будут пройдены телами (без трения) до упоров, о которые они ударятся одновременно, будут также обратно пропорциональны массам. Если тело большей массы прошло отрезок s_2, то тело меньшей массы прошло за это время больший путь s_1 причем,

$$s_1 : s_2 = m_2 : m_1,$$

а это значит, что центр масс, который по определению находится в точке, делящей прямую, соединяющую тела, на отрезки, обратно пропорциональные массам, остался в месте старта тел. Иными словами, центр масс не переместился, он неподвижен.

Это очень важный вывод. Он показывает простой физический смысл нулевого значения общего импульса системы — ее центр масс сохраняет неизменное положение в пространстве.

Этот вывод нужно закрепить разбором каких-либо примеров. Учащихся могут заинтересовать примеры из художественной литературы. Как известно, барон Мюнхаузен вытащил самого себя из болота за волосы. Почему нельзя этого сделать? В литературе таких шутливых примеров много. Герой комедии Ростана Сирано де Бержерак утверждал, что добраться до Луны можно очень простым способом: лечь на железный лист и подбрасывать вверх магнит; он притянет к себе лист с вами, а вы опять подбрасываете магнит и так долетите до Луны.

Все улыбаются, понимая, что это невозможно. Но почему невозможно, это можно объяснить лишь на основании закона сохранения импульса (или следствия из него — сохранения положения центра масс).

Приведем еще такую задачу: человек стоит посреди замерзшего пруда, лед идеально гладок и лишен всякого трения. Как он сможет добраться до берега?

Итак, если внешние силы отсутствуют, т. е. система замкнутая, то полный ее импульс равен нулю. Внутренние силы не могут изменить положения центра масс, он находится в состоянии покоя.

б) Дальнейшее развитие этого вопроса приводит к выводу о том, что если полный импульс системы не равен нулю, то центр масс взаимодействующих тел всегда движется так, как если бы вся масса была сосредоточена в нем. Другими словами, центр масс ведет себя как материальная точка, в которой сосредоточена вся масса системы и к которой приложены все действующие на систему внешние силы.

Чтобы убедиться в этом, представим себе, что оба взаимодействующих тела уже двигались до того, как мы пережгли нить. Общий импульс системы был отличен от нуля. Значит, центр масс перемещается с какой-то скоростью v_0.

Введем вспомогательную систему отсчета, которая движется вместе с центром масс, т. е. допустим, что мы будем наблюдать за движением обоих взаимодействующих тел из центра масс. Здесь опять нам придется опираться на понятие относительности движения и принцип относительности Галилея.

По отношению к этому наблюдателю скорости обоих тел v_1' и v_2' находятся по тем же законам, что и в первом случае. Эти скорости таковы, что общий импульс тел равен нулю (центр масс относительно этого наблюдателя покоится, т. е. $m_1v_1'+m_2v_2'=0$). А для наблюдателя на Земле? Скорость любого тела относительно земли будет геометрически складываться из скорости v' во вспомогательной системе отсчета и скорости самой системы отсчета v_0, т. е.

$$v_1=v_0+v_1' \text{ и } v_2=v_0+v_2'.$$

Поэтому общий импульс в системе отсчета *земля* будет:

$$\begin{aligned} m_1v_1+m_2v_2 &= m_1(v_0+v_1')+m_2(v_0+v_2')= \\ &= m_1v_0+m_1v_1'+m_2v_0+m_2v_2'= \\ &= (m_1+m_2)v_0+(m_1v_1'+m_2v_2'). \end{aligned}$$

Последняя скобка содержит в себе общий импульс во вспомогательной системе отсчета, и, как мы видели выше, он равен нулю.

Итак, в конечном счете общий импульс взаимодействующих тел в системе отсчета *земля*

$$p=(m_1+m_2)v_0,$$

где v_0 — скорость движения ее центра масс.

Общий импульс остается таким, как если бы общая масса системы двигалась вместе с центром масс. Части тела могут перемещаться по отношению друг друга. Каковы бы ни были эти движения, центр массы тела движется так, как если бы вся масса была сосредоточена в нем.

Все эти вопросы учащиеся достаточно отчетливо усваивают лишь при решении ряда задач, когда они имеют возможность убедиться, что в ряде случаев расчеты с помощью закона сохранения импульса значительно упрощают решение задачи, которое было бы весьма затруднительно на основании трех законов Ньютона.

При решении задач уточняются, конкретизируются и углубляются, кроме того, некоторые положения, касающиеся условий применения закона сохранения импульса и особенностей этого закона.

Эти уточнения касаются прежде всего следующего:

I. Импульс — векторная величина. Поэтому постоянными остаются не только абсолютная величина, но и его направление. Понимание этого положения должно быть закреплено конкретным расчетом. Векторный характер импульса хорошо вскрывается, например, при расчете упругого косого удара. Один из таких простейших случаев мы разберем. Однако это можно будет сделать лишь позднее, когда учащиеся будут знать и закон сохранения механической энергии. Вместе с тем уже в этой части курса необходимо, чтобы векторный характер импульса был усвоен, иначе во многих случаях учащиеся не поймут возможности применения закона сохранения импульса (например, когда система не замкнута, но в интересующем нас направлении составляющая внешней силы равна нулю). Можно решить, например, такую задачу:

Взрыв разделяет камень на три части. Два куска разлетаются под прямым углом друг к другу. Килограммовый кусок — со скоростью 12 *м/сек* и двухкилограммовый со скоростью 8 *м/сек.* Третий кусок отлетает со скоростью 40 *м/сек.* а) Начертите диаграмму, показывающую направление, в котором летит третий осколок. б) Какова масса третьего осколка?

II. Закон сохранения импульса справедлив для замкнутой системы. Однако мы его применяем, например, к расчету смещения лодки, в которой человек переходит от носа к корме. Эту систему мы можем считать замкнутой лишь в том случае, если мы пренебрегаем трением воды о лодку: в противном случае в нашу систему нужно было включить воду и учитывать импульс, передаваемый воде. Кроме того, мы учитываем, что сила тяжести, действующая на лодку, уравновешивается Архимедовой силой.

Вообще на все тела, как известно, действует сила притяжения к земле. Применяя закон сохранения импульса, нужно было бы поэтому в систему тел включать землю и учитывать изменение импульса земли.

Однако этого можно избежать потому, что уравнение закона сохранения импульса векторное. Если нас интересует составляющая от импульса в горизонтальном направлении, в котором не действует сила тяжести, т. е. отсутствует внешняя сила, то незамкнутая система в этом направлении будет вести себя как замкнутая. Компонента импульса будет оставаться постоянной. Эти соображения хорошо усваиваются учащимися при решении задач.

Приведем несколько примеров решения задач, в которых рассматриваемая система тел, хотя и не является замкнутой, но в горизонтальном направлении, в котором компонента силы тяжести равна нулю, ведет себя как замкнутая.

1. Человек весом 60 *кГ* бежит со скоростью 8 *км/ч*. Догнав тележку, движущуюся со скоростью 2,9 *км/ч*, он вскакивает на нее. Какова будет скорость тележки после этого, если вес ее равен 80 *кГ*? Какова будет скорость тележки при условии, что человек бежал ей навстречу? Трение о рельсы не учитывать.

Прежде чем приступить к решению, устанавливают, что в горизонтальном направлении система является замкнутой (трением пренебрегаем по условию). Скорости человека и тележки даны в одной и той же системе *земля*. Поэтому, выбрав положительное направление оси отсчета по направлению заданных скоростей, составляют уравнение закона сохранения импульса:

а) $m_1v_1+m_2v_2=(m_1+m_2)v$,

где $p_1=m_1v_1$ — импульс человека, $p_2=m_2v_2$ — импульс тележки.

$$v=\frac{m_1v_1+m_2v_2}{m_1+m_2}; \qquad v\approx 5{,}1\ \frac{км}{ч}.$$

б) Аналогично для второго случая (положительным направлением координатной оси выбираем направление скорости человека):

$$m_1v_1 - m_2v_2 = (m_1 + m_2)v;$$

$$v = \frac{m_1v_1 - m_2v_2}{m_1 + m_2}; \quad v \approx 1{,}7\ \frac{км}{ч}.$$

2. Конькобежец, стоя на коньках на льду, бросает груз весом 10 *кГ* под углом 30° к горизонту со скоростью 5 *м/сек*. Какова будет начальная скорость движения конькобежца, если вес его равен 64 *кГ*? Перемещением конькобежца во время броска пренебречь.

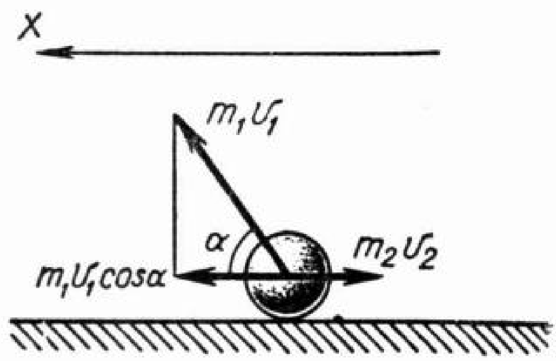


Рис. 54

На чертеже (рис. 54) указывают векторы импульсов тел до и после изменения их движения и положительное направление координатной оси.

В горизонтальном направлении систему тел конькобежец — груз можно считать замкнутой. Находят составляющую p_1 импульса груза в горизонтальном направлении и импульс p_2 конькобежца в этом же направлении:

$$p_1 = m_1v_1\cos\alpha \quad и \quad p_2 = -m_2v_2.$$

Составляют уравнение закона сохранения импульса:

$$m_1v_1\cos\alpha - m_2v_2 = 0.$$

Отсюда

$$v_2 = \frac{m_1v_1\cos\alpha}{m_2}; \quad v_2 = \frac{10\cdot 5\cdot\sqrt{3}}{64\cdot 2} \approx 0{,}68\ \frac{м}{сек}.$$

3. Через неподвижный блок переброшена веревка длиной l, на концах которой висят два гимнаста весом P каждый. Через сколько времени первый гимнаст достигнет блока, если он поднимается вверх со скоростью v_0 относительно веревки? Массу веревки не учитывать, трением в блоке пренебречь.

В этой задаче, в связи с тем что на обоих гимнастов действует сила тяжести, в замкнутую систему тел должна быть включена земля. Однако нетрудно видеть, что изменение импульса, которое приобретет земля, ничтожно мало благодаря тому, что масса ее во много раз больше массы гимнастов. Поэтому этой величиной можно пренебречь и не учитывать ее в уравнении закона сохранения импульса.

Обратим внимание еще на одно важное положение.

В условии задачи указана относительная скорость гимнаста в системе отсчета *веревка*. Составляя уравнение относительно системы *земля*, нужно выразить данную скорость в этой системе. На это нужно специально обратить внимание учащихся.

Тогда, выбрав положительным направлением координатной оси направление скорости первого гимнаста, составляем уравнение закона сохранения импульса:

$$m\left(v_0 - \frac{l}{2t}\right) - m \cdot \frac{l}{2t} = 0.$$

Отсюда

$$mv_0 - \frac{ml}{2t} - \frac{ml}{2t} = 0; \quad v_0 = \frac{l}{t} \quad \text{и} \quad t = \frac{l}{v_0}.$$

4. Большой интерес представляет задача на вычисление реактивной силы тяги, решаемая на основе закона сохранения импульса. Рассмотрим эту задачу.

Из ракетного двигателя ежесекундно выбрасывается некоторая порция продуктов сгорания топлива массой m со скоростью u относительно ракеты. Масса ракеты после вылета очередной порции продуктов сгорания равна M, а ее скорость до вылета топлива v_1. Определить реактивную силу тяги.

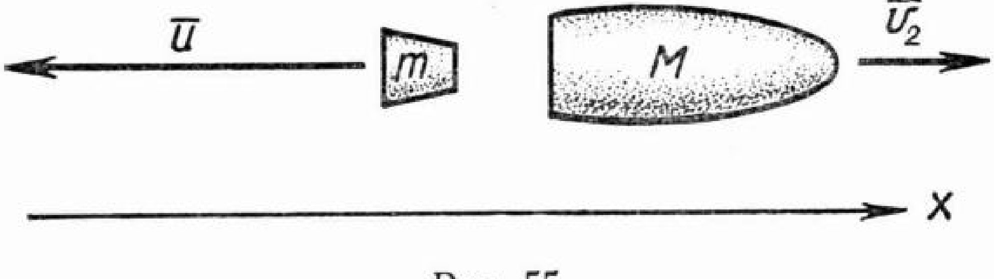


Рис. 55

Определим полный импульс системы ракета — порция топлива до (p_1) и после (p_2) выброса топлива из ракеты. Положительным направлением оси отсчета выбираем направление движения ракеты (рис. 55). Тогда

$$p_1 = mv_1 + Mv_1.$$

После выброса из ракеты порция продуктов сгорания топлива двигалась со скоростью u относительно ракеты или, учитывая положительное направление оси, со скоростью $v_1 - u$ относительно земли. Поэтому

$$p_2 = m(v_1 - u) + Mv_2,$$

где v_2 — скорость ракеты после выброса топлива.

Из закона сохранения импульса получаем:

$$mv_1 + M_1v_1 = m(v_1 - u) + Mv_2;$$

$$mu = M(v_2 - v_1) = M\Delta v.$$

Напомним, что m — масса продуктов сгорания, выбрасываемая за одну секунду. Поэтому $M\Delta v = F$. Таким образом, реактивная сила тяги равна:

$$F = mu,$$

т. е. она пропорциональна скорости выброса продуктов сгорания топлива.

В заключение интересно обратиться к примерам незамкнутой системы, т. е. такой, на которую действуют внешние силы. В этом случае изменение полного импульса системы определяется действием только внешних сил, так как внутренние силы всегда входят попарно и уравновешивают друг друга. Это те случаи, когда, например, нельзя пренебречь трением (между лодкой и водой, автомобилем и дорогой, паровозом и рельсами и т. д., а вода, земля и т. д. не входят в замкнутую систему).

Изменение импульса системы (и движение центра масс) легко продемонстрировать на следующем опыте (рис. 56). Подвесим на нитях, привязанных к штативу, заводной игрушечный автомобиль. Колесики его будут вращаться, но корпус его не будет двигаться поступательно — центр масс остается в покое относительно штатива. Это объясняется тем, что внутренние силы взаимодействия между пружиной завода и корпусом не могут изменить полного импульса системы тел (пружина—корпус), и полный импульс остается равным нулю.

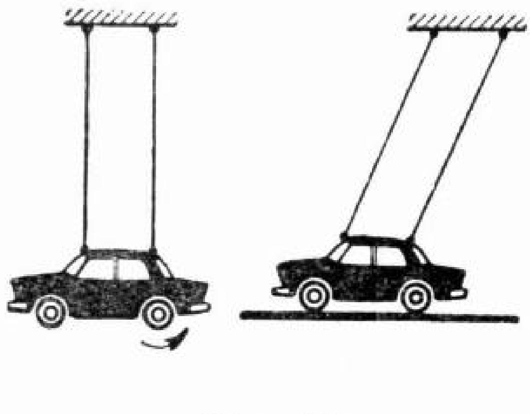


Рис. 56

Поднесем к колесам кусок фанеры или картона. Как только колеса коснутся фанеры, автомобиль поедет вперед. Внешние силы трения, подействовав на него, изменили его полный импульс. Так же объясняется движение автомобиля по асфальту, имеющему большой коэффициент трения покоя; если дорога обледеневает и коэффициент трения покоя автомобиля на такой дороге очень мал, то он не может по ней двигаться.

§ 3. Работа. Энергия. Закон сохранения и превращения энергии

С законом сохранения и превращения энергии, значение которого в школьном курсе физики особенно велико, тесно связаны понятия работы и энергии. Успешное усвоение энергетических вопросов раздела механики возможно лишь в том случае, если уделено должное внимание формированию у учащихся этих основных понятий.

Раскрывая понятия работы и энергии, необходимо, с одной стороны, четко их разграничить, а с другой стороны, выявить тесную связь между ними.

Известно, что термин *работа* в его современном понимании впервые появился в трудах французского ученого Понселе в 1826 г. Согласно определению Понселе, работа равна произведению силы, действующей на материальную точку в направлении перемещения, на величину перемещения точки приложения силы.

Однако произведение $Fs \neq 0$ является скорее лишь признаком, позволяющим выделить те случаи, когда совершается работа, и позволяет вычислить ее, но не выражает в достаточной степени физической сущности этого понятия. Только в связи с законом сохранения и превращения энергии было раскрыто его глубокое содержание. На основе этого закона возникло представление о работе как об одном из процессов преобразования энергии при ее передаче от одного тела к другому.

Передача энергии может осуществляться не только в форме работы, но и в процессах теплообмена. Теплообмен и работа — это две эквивалентные (но неравноценные) формы передачи энергии.

Понятие механической работы всегда связано с упорядоченным процессом движения тел под действием сил, при котором происходит передача энергии от одного тела к другому. Следовательно, *работа представляет собой упорядоченную* (макрофизическую) *форму передачи энергии.*

В этом заключается физическая сущность процесса работы. Отсюда вытекает, что величина работы[1] измеряет величину энергии, переданной от одного тела к другому или превращенной из одной формы в другую в этом процессе. Произведение сил и перемещений точек их приложения, которым измеряется механическая работа, выражает как раз величину энергии, претерпевшей изменение.

Совершенно ясно, что полное раскрытие сущности работы и его определение учащиеся могут получить лишь в связи с усвоением понятия энергии и закона сохранения и превращения энергии в механических процессах. Однако это потребовало бы того, чтобы понятия об энергии было дано учащимся до понятия работы, независимо от него. Здесь мы сталкиваемся с методической трудностью, так как само понятие об энергии весьма сложно раскрыть в средней школе без связи с понятием работы, не опираясь на него.

Понятие энергии — одно из самых сложных в физике — окончательно сформировалось в науке лишь в середине XIX в., т. е. значительно позднее понятия работы.

Существенной стороной понятия энергии является то, что она является однозначной функцией состояния системы, определяемой через координаты и импульсы, температуру, давление и объем, напряженности магнитного и электрического полей, т. е. через величины, изменение которых представляет собой ту или иную форму движения. Любому переходу материальной системы из одного состояния в другое всегда соответствует строго определенное изменение энергии. Таким образом, если система, претерпев ряд изменений, возвращается в исходное состояние, то общее изменение энергии системы в результате всех процессов равно нулю.

Если мы имеем изолированную систему, на которую не оказываются внешние воздействия, то $E_2 = E_1$ — энергия изолированной системы постоянна, какие бы процес-

---

[1] Термин *величина работы* обычно не применяется; говорят просто *работа*, имея в виду и второе значение этого термина, относящегося уже не к процессу, а к физической величине, характеризующей его количественно.

сы в ней ни происходили. Это положение представляет собой закон сохранения энергии. Однако энергия является не единственной функцией состояния, сохраняющейся в механических процессах. Поэтому использовать этот существенный признак для ее определения не представляется возможным. Под это определение с таким же успехом подошли бы и другие сохраняющиеся величины (масса, импульс и т. д.).

Многочисленные физические факты, относящиеся к области превращения одних форм движения материи в другие, показали, что существуют эквивалентные соотношения между механическими, тепловыми, электрическими и другими воздействиями на систему.

Это позволяет характеризовать рассматриваемые в физике конкретные виды движущейся материи с помощью физической величины — энергии, которая в изолированной системе остается постоянной при любых происходящих в ней изменениях. Последнее указывает на то, что энергия является мерой движения, т. е. той общей характеристикой различных физических форм движения, которая остается неизменной при их взаимных превращениях. В этом и состоит специфическое отличие энергии от других сохраняющихся величин.

В методических исследованиях известна попытка ввести понятие энергии как меры движения, независимо и до изучения работы. Так сделано, например, в диссертации А. В. Селенгинского. Однако этот опыт не получил распространения потому, что оказалось затруднительным раскрыть учащимся при изучении механики физическое содержание понятия *мера движения*.

Правильное представление об энергии раскрывается со всей глубиной не при изучении чисто механических явлений, а только тогда, когда рассматривают факты взаимного превращения различных форм движения друг в друга. Раскрытие понятия энергии как меры движения станет доступным учащимся лишь тогда, когда будут изучены факты существования эквивалентных соотношений между различными формами движения материи.

Каковы же возможные пути формирования понятия энергии и работы в курсе физики средней школы, в частности в разделе механики?

Логически непротиворечивый путь независимого от работы определения энергии, а затем раскрытие работы как одной из форм превращения энергии кажется весьма заманчивым. Например, такой план введения понятий работы и энергии мы находим в получившей широкую известность книге «Физика для всех» [1].

Авторы здесь ведут читателя по пути поисков сохраняющейся в механических процессах величины $\frac{mv^2}{2}+mgh$, в которой, далее $\frac{mv^2}{2}$ называют кинетической, а mgh — потенциальной энергией.

После этого вводится работа как величина, представляющая собой приращение кинетической энергии в механических процессах $\left(Fs=\frac{mv^2}{2}\right)$.

Такой способ изложения, по-видимому, уместен в популярной литературе. Однако нельзя не признать искусственным и мало приемлемым в обучении прием, при котором учащиеся должны следить за сохранением некоторой величины, значение которой выяснится лишь в дальнейшем, когда на ряде примеров они убедятся в том, как полезно знать эту величину, сохраняющуюся в различных механических процессах.

Более целесообразным нам представляется путь, предложенный Ю. И. Соколовским [2]. Отказываясь от поочередного изучения понятий *работа* и *энергия*, он вводит их совместно при изучении уравнения живых сил. Но подход к этому уравнению и цель его изучения очень основательно обосновываются учащимся, а это одно из условий успешности восприятия ими знаний.

Изучению уравнения живых сил предшествует рассмотрение вопроса о разгоне и торможении тел. Этот вопрос непосредственно вытекает из законов динамики и требует от учащихся понимания самого их существа. В самом деле, если учащиеся достаточно хорошо усвоили второй закон динамики, то они понимают, что никакая сила не может мгновенно прекратить движение тела, обладающего некоторой скоростью v. Для этого требуется время, за которое рассматриваемое тело пройдет некоторый путь s.

---

[1] Л. Д. Ландау и А. И. Китайгородский, Физика для всех, Физматгиз, М., 1963.

[2] Ю. И. Соколовский, Понятие работы и закон сохранения и превращения энергии, изд. АПН РСФСР, М., 1962.

Точно так же нельзя мгновенно сообщить неподвижному телу скорость v. Для этого требуется время, за которое тело опять-таки должно сместиться на расстояние s. Другими словами, ускорения, сообщаемые телам силами, не могут быть бесконечно большими: они всегда конечны, так как тела обладают массой. В этом, собственно, и состоит смысл понятия массы как меры инертности. Итак, как процесс разгона, так и процесс торможения требует не только времени, но и прохождения некоторого пути. Вычисляя этот путь, получают уравнение:

$$\frac{mv^2}{2} = Fs,$$

которое выводится вначале независимо от его энергетического содержания. Последнее выявляется лишь в последующем, причем величина Fs получает название работы, а $\frac{mv^2}{2}$ — кинетической энергии тела.

Для того чтобы приобрести эту энергию, тело должно пройти соответствующий путь разгона. Это дает возможность ввести и понятие потенциальной энергии, как определенного «запаса», за счет которого возникает кинетическая энергия.

Следующий шаг — выявление постоянства суммы кинетической и потенциальной энергий и введение понятия механической энергии — совершенно очевиден.

Методика изучения энергетических вопросов механики в указанном выше плане подробно изложена в цитированной выше книге Ю. И. Соколовского. Ее достоинство состоит в том, что она позволяет выявить существенные черты понятий работы и энергии, непротиворечиво и последовательно их раскрыть, ввести понятие механической энергии как величины, не только не изменяющейся при чисто механических процессах, но и способной к превращениям. Эта методика отличается большой логической стройностью и, несмотря на некоторую сложность, всегда присущую таким логическим построениям, вполне доступна учащимся средней школы. Каждый шаг ее обоснован и может быть принят учащимися, не вызывает у них чувства внутреннего протеста, как всегда бывает, когда им предлагают какие-то выводы и преобразования, смысл которых будет выявлен лишь в дальнейшем.

Однако в этой методике не учитывается в достаточной мере то, что учащиеся в младших классах уже знакомились с понятием механической работы.

Понятие работы, сформированное у них в VI классе, естественно, весьма узко; введено оно до и независимо от изучения энергии, а потому учащиеся владеют лишь недостаточно мотивированным определением работы как величины, зависящей от действующей силы и от пути, на котором она действует.

Однако они знают признаки работы ($Fs \neq 0$), умеют пользоваться формулой $A = Fs$ для случаев, когда направление действующей силы совпадает с направлением перемещения. Поэтому не следует начинать изучение энергетических вопросов в старших классах, совершенно игнорируя имеющиеся у учащихся знания и устанавливая связь с ними лишь впоследствии, когда им будет показано, что к ранее известному вопросу подошли с иной точки зрения. В этом случае имевшиеся у учащихся знания не могут быть ступенькой, на которую можно опереться для постепенного развития физических понятий.

Учитывая все трудности, связанные с раскрытием физического содержания работы до изучения энергии и независимого от работы определения энергии, целесообразно формирование понятия работы во второй ступени изучения физики проводить в два этапа.

Вначале, до введения понятия энергии, опираясь на вынесенное из VI—VII классов школы формальное определение работы в связи с процессом перемещения тел под действием сил, рассматриваются различные случаи работы, расширяющие это понятие: действующая сила совпадает по направлению с перемещением (положительная работа), противоположна ему (отрицательная работа), перпендикулярна ему (работа равна нулю), составляет с ним любой угол α ($A = Fs\cos\alpha$).

Для того чтобы далее можно было глубже раскрыть понятие работы в связи с процессом превращения энергии, уже здесь, на первых уроках, разбирая различные случаи работы, необходимо воспользоваться понятием механического состояния тел, определяемого их скоростями и координатами, и выявлять связь совершенной работы с изменением координат или скоростей тел, участвующих в процессе работы.

Для чисто механических процессов, когда мы отвлекаемся от трения и сопротивления среды, примерами работы являются равномерный или ускоренный подъем против действия силы тяжести и разгон по горизонтальной поверхности.

В этих случаях изменения механического состояния тел очевидны — меняется положение тел относительно земли или других тел, изменяется их относительная скорость.

Эти указания при рассмотрении частных случаев работы используются далее на втором этапе формирования этого понятия, после введения понятия энергии. Но в этом случае само понятие энергии уже может быть раскрыто на основе работы.

Учащиеся из восьмилетней школы выносят некоторое представление об энергии. Они определяли ее в связи с возможностью совершения работы: тело обладает энергией, если оно может совершать работу,— в таком плане раскрывалось это понятие.

Дальнейший путь углубления этого понятия заключается в следующем. Показывают ряд примеров, что тела обладают энергией, т. е. могут совершать работу только тогда, когда они находятся в определенном состоянии, которое может изменяться — могут изменяться их скорости и координаты (сжатая пружина может распрямляться, поднятое на некоторую высоту над данным уровнем тело может опускаться). Следовательно, энергия раскрывается как некоторое свойство тел, зависящее от их состояния, благодаря которому они могут совершать работу.

Для сил, зависящих только от взаимного расположения тел (силы тяготения, упругости, электрические), показывают, что работа Fs этих сил приводит к изменению величины $\frac{mv^2}{2}$ (кинетическая энергия) или mgh (потенциальная энергия), характеризующей состояние этих тел.

Этот вывод является количественным определением энергии как изменяющейся при совершении работы величины, приращение которой в механических процессах равно совершенной работе. Вместе с тем благодаря тому что в нем выявлена связь с энергией, он раскрывает и более глубоко работу как такой процесс, который приводит к изменению энергии. При таком подходе мы раскрываем энергию как функцию состояния, что является важной чертой этого понятия.

Итак, логическая линия развития энергетических понятий такова: дается независимое от энергии определение работы как характеристики процесса перемещения тел под действием сил; затем вводится понятие об энергии как величине, зависящей от состояния тел, изменение которой в механических процессах равняется совершенной работе. Далее, благодаря выявлению связи работы с энергией углубляется понимание работы. Подробно этот путь формирования энергетических понятий раскрыт в первом томе «Методики преподавания физики в средней школе» [1].

§ 4. Столкновения

Значение законов сохранения импульса и энергии учащиеся хорошо осознают и усваивают при решении такой важной механической задачи, как столкновения.

Учащиеся всегда склонны соударения понимать в узком смысле этого слова. Поэтому, приступая к изучению этого явления, разъясняют, что к соударениям относятся любые встречи тел, при которых взаимодействие длится короткий срок. Поэтому к ним, кроме удара шаров или столкновения элементарных частиц, относятся прыжок человека на движущуюся платформу, попадание пули в баллистический маятник и т. п. При коротких взаимодействиях возникают такие большие силы, что другими постоянно действующими силами можно пренебречь. Это дает право рассматривать соударяющиеся тела как замкнутую систему и применять к ним законы сохранения.

Действующие программа и учебник по физике, к сожалению, не дают до сих пор должной ориентировки на достаточное выяснение этого важного вопроса.

Между тем столкновения представляют собой хорошую динамическую задачу, помогающую усвоению важнейших законов и понятий механики, а, кроме того, изучение этого вопроса подготавливает учащихся к усвоению

---

[1] Л. И. Резников, Э. Е. Эвенчик, В. Ф. Юськович, Методика преподавания физики в средней школе, т. I, Механика, изд. АПН РСФСР, М., 1958.

ряда вопросов курса физики, которые будут далее изучаться, например физики атомного ядра. Напомним такие вопросы, как явление замедления нейтронов, представляющие собой по существу упругое столкновение. Известно также, что в ряде случаев идентификации элементарных частиц по снимкам треков в камере Вильсона или в фотоэмульсиях возможна только на основе законов сохранения импульса и энергии, т. е. на основе решения задачи о столкновении частиц. Это относится, например, к определению параметров нейтральных частиц, где метод отклонения в электрических и магнитных полях неприменим.

Подходя к отбору учебного материала с этой точки зрения, мы видим, что необходимо рассмотреть такие типы столкновений, на которых учащиеся могут выяснить и те случаи, когда могут быть применены оба закона сохранения (импульса и энергии), и те, когда имеется возможность применить один из них. Следовательно, необходимо рассмотреть и упругий и неупругий удары.

Для простоты следует рассматривать только центральный удар. Однако желательно рассмотреть также один из простейших случаев косого упругого удара шаров, имеющих равные массы.

Эта задача решается достаточно просто. К упругому удару, как известно, можно применить оба закона сохранения и написать векторное уравнение закона сохранения импульса:

$$m_1 v_1 + m_2 \bar{v}_2 = m_1 \bar{u}_1 + m_2 \bar{u}_2,$$

и уравнение закона сохранения энергии:

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_1 u_1^2}{2} + \frac{m_2 u_2^2}{2}.$$

Если внести в задачу некоторое упрощение — рассматривать частный случай, когда второй шар до столкновения покоится ($v_2 = 0$), то, сократив уравнения на $m_1 = m_2$, получим:

$$\bar{v}_1 = \bar{u}_1 + \bar{u}_2 \quad \text{и} \quad v_1^2 = u_1^2 + u_2^2.$$

Вектор $\bar{v}_1$ есть векторная сумма $\bar{u}_1$ и $\bar{u}_2$. А это значит, что векторы $\bar{u}_1$, $\bar{u}_2$ и $\bar{v}_1$ образуют треугольник (или $\bar{u}_1$ и $\bar{u}_2$ являются сторонами параллелограмма, в котором $\bar{v}_1$ — диагональ).

Второе равенство показывает, что этот треугольник прямоугольный, в котором квадрат гипотенузы (v_1^2) равен сумме квадратов катетов ($u_1^2\ u_2^2$); $\bar{u}_1$ и $\bar{u}_2$ образуют между собой прямой угол.

Решение этой задачи показывает, что при любом косом упругом ударе тела равной массы разлетаются под прямым углом (рис. 57).

Рис. 57

Рассмотрение хотя бы одного частного случая косого удара важно потому, что в этом случае подчеркивается векторный характер импульса и закона сохранения импульса. Сумма импульсов определяется как векторная сумма и закон сохранения импульса для замкнутой системы предусматривает сохранение величины и направления общего импульса системы. При изучении только центрального удара, когда скорости направлены вдоль одной линии, эта сторона вопроса раскрывается не полностью.

Рассмотренный случай интересен еще и тем, что он может быть использован при изучении фотографий треков, образовавшихся, например, в пузырьковой камере при столкновении частиц равной массы. Прямой угол, под которым разлетаются частицы, сразу же показывает, что имело место столкновение частиц равной массы.

На рисунке 58 показано последовательное соударение протона с другим протоном (ядром жидкого водорода), находившимся в состоянии покоя.

Оба рисунка — косой удар бильярдных шаров и столкновение протонов — целесообразно рассмотреть с учащимися совместно.

Случаи центрального неупругого удара можно изучить на задачах, подобрав следующие случаи: а) второе

Рис. 58

тело до удара покоится; б) движется навстречу первому; в) движется в том же направлении.

Такие задачи имеются в достаточном количестве в распространенных задачниках. Это, например, задачи такого типа:

1. Пуля массой m_1, выпущенная горизонтально из духового ружья со скоростью v, попадает в деревянный шар с массой M, подвешенный на нити l, и застревает в нем. Найти скорость v_1, которую приобретает шар вместе с застрявшей в нем пулей. Определить угол отклонения такого маятника.

2. Человек весом P бежит со скоростью v. Догнав тележку, движущуюся со скоростью v_1, он вскакивает на нее. Какова будет скорость тележки после этого, если ее вес равен P_1? Какова будет скорость тележки при условии, что человек бежал ей навстречу? Трением пренебречь.

На какой-либо задаче можно разобрать вопрос об изменении механической энергии при неупругом ударе. Например тело массой m движется со скоростью v и ударяется о неподвижное тело такой же массы. Считая удар центральным и неупругим, найти количество теплоты, выделяющееся при ударе.

На основе закона сохранения импульса можно определить скорость обоих тел после удара $\bar{u}$:

$$m_1v_1 + m_2v_2 = (m_1 + m_2)u$$

(так как удар центральный, то знаки векторов над импульсами можно опустить).

При $v_2=0$ и $m_1=m_2$ получают:

$$u = \frac{v_1}{2}.$$

Кинетическая энергия тел до столкновения:

$$E_{\text{кин}} = \frac{m_1v_1^2}{2},$$

после столкновения:

$$E'_{\text{кин}} = \frac{(m_1 + m_2)u^2}{2},$$

но $u = \frac{v_1}{2}$ и $m_1 = m_2$, поэтому $E'_{\text{кин}} = \frac{2m_1v_1^2}{2 \cdot 4} = \frac{m_1v_1^2}{4}$.

Значит, часть кинетической энергии

$$\Delta E = \frac{m_1v_1^2}{2} - \frac{m_1v_1^2}{4}$$

при ударе рассеялась (перешла в другие виды энергии).

Имеется в виду, что до решения задач на неупругие столкновения разобран с учащимися вопрос о том, почему в этих случаях механическая энергия тел не сохраняется. Приведенное выше решение задачи лишь закрепляет знание этого вопроса.

Обратим внимание на одну, часто встречающуюся ошибку учащихся. Усвоив несколько поверхностно, что к неупругому удару неприменим закон сохранения механической энергии, они не понимают возможности его применения к поведению слипшегося при неупругом ударе тела после столкновения. Так, в приведенной выше задаче 1, в которой нужно определить не только скорость маятника с застрявшей в нем пулей, но и угол его отклонения, необходимо:

а) применить закон сохранения импульса $[mv = (m + M)u]$ и найти скорость маятника с пулей:

$$u = \frac{mv}{m + M}.$$

Здесь для процесса столкновения шара и пули мы имеем возможность применить только этот закон;

б) применить закон сохранения и превращения энергии для маятника с пулей и приравнять значения механической энергии для него в положения A и B (рис. 59):

$$\frac{(m + M)u^2}{2} = (m + M)gh,$$

что позволит далее найти искомый угол отклонения [1].

---

[1] $h = \frac{u^2}{2g}$ или, учитывая, что $u = \frac{mv}{m+M}$, $h = \frac{v^2}{2g}\left(\frac{m}{m+M}\right)^2$.

Из чертежа (рис. 59) видно, что $\cos\alpha = \frac{l-h}{l} = 1 - \frac{h}{l}$. Подставив выражение для h, получим: $\cos\alpha = 1 - \frac{v^2}{2gl}\left(\frac{m}{m+M}\right)^2$.

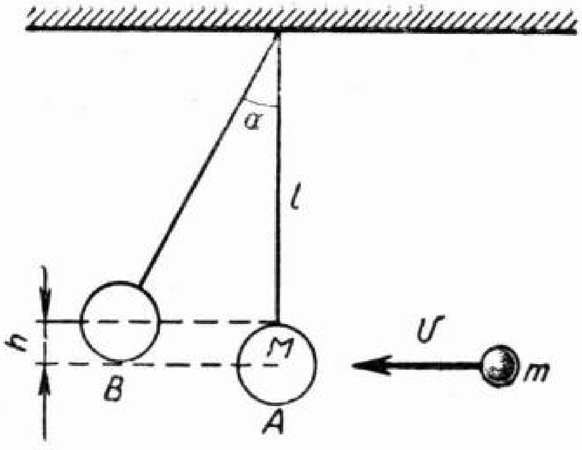


Рис. 59

Закон сохранения энергии применяется уже не к процессу столкновения, а к движению маятника, получившего некоторую кинетическую энергию.

К упругому удару, осуществляемому при соударении тел, для которых силы взаимодействия зависят только от величины деформаций (а не от скорости деформаций), применимы оба закона сохранения — импульса и энергии.

Так как при упругом ударе деформация полностью исчезает, то это значит, что нет перехода механической энергии в другие виды энергии. В этом случае за первую половину времени удара (при сближении тел) происходит переход кинетической энергии в потенциальную энергию деформации, а за вторую половину времени удара (при удалении тел и исчезновении деформации) потенциальная энергия целиком снова переходит в кинетическую.

Разобрав с учащимися упругий удар, нужно подобрать систему задач, при решении которых этот вопрос будет усвоен.

Рассматривают общий случай, когда заданы импульсы (скорости) тел до взаимодействия и требуется найти импульсы (или скорости) этих тел после взаимодействия. Для нахождения двух неизвестных записывают два уравнения на основе обоих законов сохранения:

$$m_1v_1 + m_2v_2 = m_1u_1 + m_2u_2$$

и

$$m_1v_1^2 + m_2v_2^2 = m_1u_1^2 + m_2u_2^2.$$

Нужно отметить, что решение этой системы уравнений не так просто. Оно производится с помощью некоторого искусственного приема.

Уравнения приводят к виду:

$$m_1(u_1 - v_1) = m_2(v_2 - u_2); \qquad \text{(I)}$$

$$m_1\left(u_1^2 - v_1^2\right) = m_2\left(v_2^2 - u_2^2\right) \qquad \text{(II)}$$

и затем, разделив второе уравнение на первое, получают:

$$u_1 + v_1 = u_2 + v_2.$$

Последнее уравнение умножают сначала на m_1, а затем на m_2, полученные выражения вычитают или прибавляют к уравнению (I) и, решая систему относительно неизвестных значений скоростей после удара, получают:

$$u_1 = \frac{(m_1 - m_2)v_1 + 2m_2v_2}{m_1 + m_2};$$

$$u_2 = \frac{(m_2 - m_1)v_2 + 2m_1v_1}{m_1 + m_2}.$$

Совершенно ясно, что предлагать учащимся самостоятельно выводить эти выражения для скоростей при решении задачи на упругий удар нецелесообразно. Этот вывод можно произвести при решении одной задачи коллективно на уроке, а затем, в случае необходимости, учащиеся могут воспользоваться выведенными выражениями, записанными в их тетрадях. Запоминать вывод выражений для скоростей нет необходимости.

Вообще возможно ограничиться рассмотрением двух частных случаев:

1) Сумма импульсов обоих тел до удара равна нулю, т. е.

$$m_1v_1 = -m_2v_2.$$

Тогда выражения для скоростей после удара принимают вид:

$$u_1 = -\frac{(m_1 + m_2)v_1}{m_1 + m_2}; \quad u_1 = -v_1;$$

$$u_2 = -\frac{(m_1 + m_2)v_2}{m_1 + m_2}; \quad u_2 = -v_2,$$

т. е. импульсы обоих тел при ударе только изменяют свой знак.

2) Один шар до удара покоится:

$$v_2 = 0.$$

Тогда

$$u_1 = \frac{(m_1 - m_2)v_1}{m_1 + m_2}; \quad u_2 = \frac{2m_1v_1}{m_1 + m_2}.$$

После удара второй шар движется в ту же сторону, куда двигался первый до удара. Скорость и поведение первого шара зависят от соотношения масс m_1 и m_2.

Если $m_1 > m_2$, то первый шар продолжает двигаться в том же направлении, как и до удара, но с меньшей скоростью.

При $m_1 < m_2$ направление движения первого шара при ударе изменяется — он отскакивает обратно, а второй движется в ту сторону, в которую двигался первый до удара, но с меньшей скоростью.

Этот случай интересен тем, что позволяет понять явление замедления нейтронов. Поэтому можно предложить учащимся решить, например, такие задачи [1].

1) Нейтрон (масса m_0) ударяется о неподвижное ядро атома углерода ($m = 12\ m_0$). Считая удар центральным и упругим, найти, во сколько раз уменьшится кинетическая энергия нейтрона при ударе.

2) Нейтрон (масса m_0) ударяется о неподвижное ядро:

а) атома углерода ($m = 12 m_0$);

б) атома урана ($m = 235 m_0$).

Считая удар центральным и упругим, найти, какую часть своей скорости потеряет нейтрон при ударе.

Чем ближе массы соударяющихся шаров, тем больше эффект замедления.

В приведенных выше задачах нетрудно рассчитать, что нейтрон (масса 1) отскочит от ядра атома углерода (масса 12), потеряв $^2/_{13}$ своей скорости, а от ядра атома урана (масса 235), потеряв всего лишь $^2/_{236}$ своей скорости.

Решение таких задач можно проводить уже в курсе механики. Это явится хорошей подготовкой учащихся к изучению физики атомного ядра.

Отметим еще один интересный случай, когда массы шаров одинаковы ($m_1 = m_2$).

Тогда

$$u_1 = v_2;\ u_2 = v_1,$$

т. е. шары равной массы при ударе обмениваются скоростями. Это явление легко продемонстрировать на ударе

---

[1] В. С. Волькенштейн, Сборник задач по общему курсу физики, Физматгиз, М.—Л., 1963, задачи № 2.93 и 2.94.

стальных или костяных шаров (рис. 60).

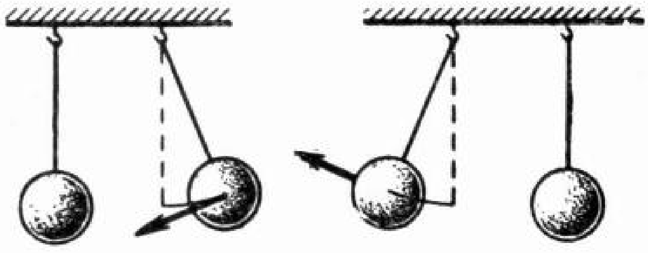


Рис. 60

Может быть полезен еще один случай, когда $m_2 \gg m_1$. Для исследования удобно числитель и знаменатель выражений для u_1 и u_2 разделить на m_2:

$$u_1 = \frac{v_1\left(\frac{m_1}{m_2} - 1\right) + 2v_2}{\frac{m_1}{m_2} + 1}; \quad u_2 = \frac{v_2\left(1 - \frac{m_1}{m_2}\right) + 2 \cdot \frac{m_1}{m_2} v_1}{\frac{m_1}{m_2} + 1}.$$

Пренебрегая $\frac{m_1}{m_2}$ по сравнению с единицей, получим:

$$u_1 \approx -v_1 + 2v_2 \quad \text{и} \quad u_2 \approx v_2.$$

Мы видим, что при этих условиях скорость тела большей массы практически остается неизменной. Если эта скорость $v_2 = 0$, то $u_1 = -v_1$, т. е. малое тело отскакивает от большого с той же по величине скоростью, с которой оно ударилось, но в противоположном направлении.

Последний случай интересен тем, что он применяется к случаю упругого удара шара о неподвижную стенку при движении его перпендикулярно стенке.

В этом случае изменение импульса тела (молекулы газа, ударяющейся о стенку сосуда) равно $m_1u_1 - m_1v_1 = -m_1v_1 - m_1v_1 = -2m_1v_1$. Стенка получит равный, но противоположный по знаку импульс $p = 2m_1v_1$. Рассмотрение этого случая будет необходимо при выводе основного уравнения кинетической теории газов.

§ 5. Вращательное движение твердого тела. Закон сохранения момента импульса (вращательного импульса)

Из трех законов сохранения, действующих в механических процессах, в средней школе учащиеся изучают до сих пор лишь два — закон сохранения импульса и закон сохранения и превращения энергии. Динамика вращательного движения твердого тела и закон сохранения момента импульса (вращательного импульса) не изучаются в настоящее время. Между тем понятия о вращательном импульсе и законе его сохранения не только являются весьма полезными при анализе ряда распространенных механических явлений, но и очень важны для изучения ряда вопросов, изучаемых в других разделах курса физики (магнитных свойств вещества и физики атомного ядра).

При известном упрощении изложения эти вопросы оказываются вполне доступными школьникам и, как показал опыт их преподавания, вызывают у них живой интерес.

Трудным для учащихся является понимание угловой скорости как векторной величины. Однако если не касаться вопроса о сложении угловых скоростей, когда только и проявляется векторный характер угловой скорости, то об этой величине как о векторе не придется говорить. А усвоение понятия о величине угловой скорости (и даже углового ускорения) учащихся совершенно не затрудняет. То же относится и к понятиям момента силы и момента импульса.

Эти соображения заставляют строго ограничить учебный материал этой темы и дать только тот минимум, который позволит познакомить учащихся с указанными выше важными понятиями и закономерностями, но не в векторной форме. Отсюда следует, что придется отказаться от объяснения гироскопов и всех гироскопических эффектов.

Возможны различные пути изучения вопросов вращательного движения твердого тела в средней школе. Опыт преподавания этих вопросов показал, что, если имеется возможность выделить примерно пять уроков на изучение этой темы, вполне возможно достаточно обоснованно ввести понятия о моменте импульса, основном уравнении динамики вращательного движения тела и законе сохранения импульса.

Однако в классах с более слабым составом учащихся можно дать более упрощенное изложение вопросов, ограничив введение основных понятий и закономерностей в основном лишь экспериментальным их обоснованием.

Рассмотрим оба варианта изложения.

Угловая скорость. При изучении равномерного движения материальной точки по окружности учащиеся усвоили понятие линейной скорости $v=\frac{\Delta l}{\Delta t}$ (для равномерного движения по окружности $v=2\pi Rn$, или $v=\frac{2\pi R}{T}$). Понятие угловой скорости имеет смысл лишь для вращения тела, поэтому и вводиться оно должно лишь при изучении этого движения.

Угловая скорость определяется как отношение приращения угла поворота тела (радиуса-вектора, проведенного из оси вращения в любую точку тела) к промежутку времени, в течение которого это приращение произошло:

$$\omega=\frac{\Delta \alpha}{\Delta t}.$$

Точка, лежащая на расстоянии r от оси вращения, при повороте на малый угол $\Delta\alpha$ описывает малую дугу $\Delta l=r\Delta\alpha$. Отсюда $\frac{\Delta l}{\Delta t}=r\cdot\frac{\Delta a}{\Delta t}$ или $v=\omega r$.

Для равномерного вращения $\omega=2\pi n$, и соотношение между линейной и угловой скоростями получают из сравнения формул

$$v=2\pi rn \text{ и } \omega=2\pi n.$$

Уже при введении угловой скорости уместно начать проводить сопоставление вращательного и поступательного движений: в поступательном движении характеристиками являются перемещение и линейная скорость; во вращательном — угол поворота тела (т. е. угол поворота радиуса-вектора, проведенного из оси в любую точку тела) и угловая скорость.

Момент силы. Понятие о моменте силы относительно оси учащиеся получили при изучении вопросов статики [1]. Однако повторение и некоторое углубление этого понятия потребуется внести при изучении вращательного движения тела, хотя и здесь мы не будем касаться вопроса о векторном характере как угловой скорости, так и момента силы.

Уточнение касается вопроса о том, какая сила может вызвать вращательное движение, т. е. обладает вращательным моментом относительно оси. Очевидно, ни сила,

---

[1] По проекту программы эти вопросы будут изучаться только в младших классах.

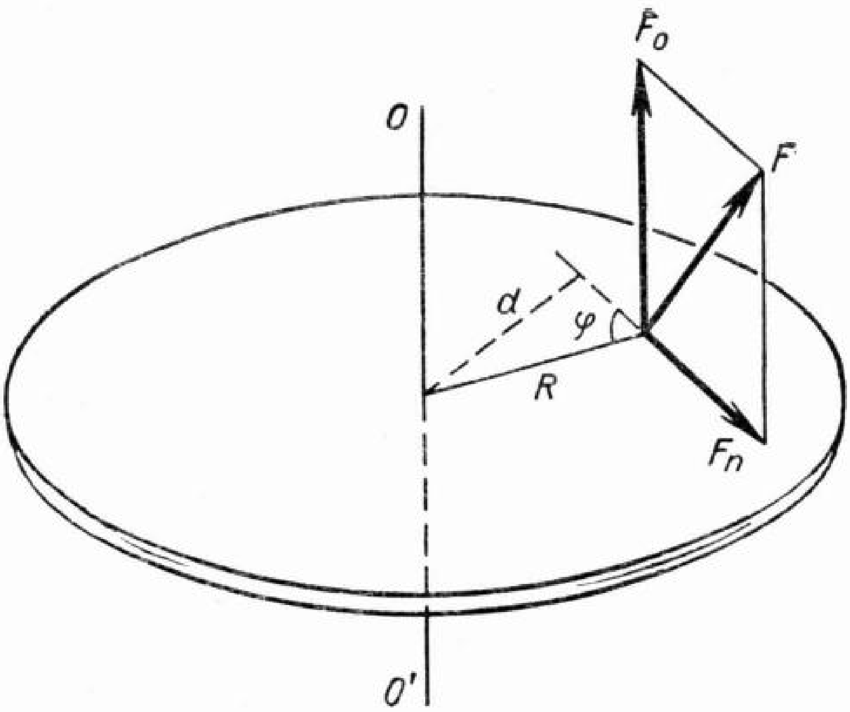


Рис. 61

направление которой проходит через ось вращения, ни сила, которая параллельна оси, не могут повернуть тело вокруг оси OO'.

Следовательно, при определении момента силы F относительно оси (рис. 61) нужно учитывать действие лишь составляющей F_n этой силы, лежащей в плоскости, перпендикулярной к оси. Момент M этой силы относительно оси определяют как

$$M = F_n d = F_n R \sin \varphi.$$

Единица момента силы — 1 ньютонметр.

Учащимся полезно предложить на ряде примеров представить себе и разобраться, в каком направлении будет происходить вращение тела в различных случаях действия силы.

Интересен пример вращения «послушной» и «непослушной» катушек (рис. 62) [1]. Правда, в этом случае имеется в виду вращение вокруг мгновенной оси, но не на это здесь обращается внимание.

Как видно из рисунка, держа нить достаточно полого, можно принудить к послушанию самую неподатливую катушку, и она наматывается на нить, за которую мы ее тянем к себе. В противном случае момент силы вызывает

[1] Р. В. Поль, Механика, акустика и учение о теплоте, Гостехиздат, М., 1957, стр. 97.

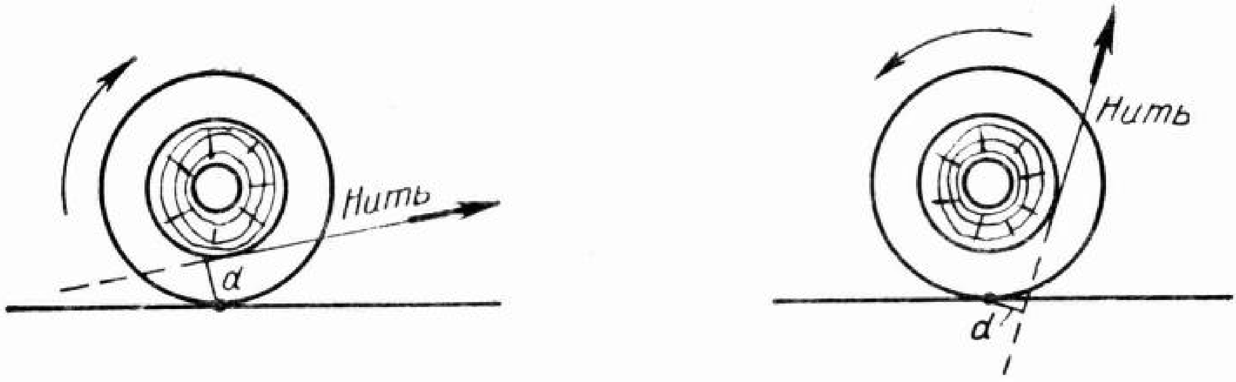


Рис. 62

вращение катушки в противоположную сторону, и она закатывается от нас еще дальше.

Как пишет Р. В. Поль: «Здесь, как и во многих других случаях жизни, немножко физики дает больше толку, чем самые бурные проявления темперамента».

Кинетическая энергия вращающегося тела. Вывод формулы кинетической энергии тела не вызывает никаких затруднений у учащихся и легче всего позволяет ввести понятие о моменте инерции.

Как обычно, разбивают тело на маленькие объемы с массами Δm_1, Δm_2, ..., находящиеся на расстояниях r_1, r_2, ... от оси вращения.

Записав кинетическую энергию тела как сумму кинетических энергий частиц $\left(E_{\text{вр}}=\frac{\Delta m_1 v_1^2}{2}+\frac{\Delta m_2 v_2^2}{2}+\ \ldots\right)$ и выразив различные для всех точек линейные скорости через общую для всего тела угловую скорость $(v=\omega r)$, получают:

$$E_{\text{вр}}=\frac{\omega^2}{2}\left(\Delta m_1 r_1^2+\Delta m_2 r_2^2+\ \ldots\right).$$

Величина, стоящая в скобках $(\Sigma m_i r_i^2)$, не зависит от скорости движения. Она характеризует инертные свойства тела во вращательном движении: чем больше эта величина, тем большую энергию надо затратить, чтобы достичь заданной скорости. Этим пояснением можно оправдать название *момент инерции*, которое принято для величины $I=\Sigma m_i r_i^2$. Мы видим, что роль массы во вращательном движении играет момент инерции. Значение этой величины зависит от характера распределения массы по отношению к оси вращения. Частицы, лежащие дальше от оси вращения, вносят в сумму значительно больший вклад, чем те, которые ближе расположены к оси.

Теперь можно продолжить сопоставление поступательного и вращательного движений.

Поступательное движение	Вращательное движение
Сила F Кинетическая энергия $E=\frac{mv^2}{2}$	Момент силы $M=Fd$ Кинетическая энергия $E_{вр}=\frac{I\omega^2}{2}$

Физическое значение момента инерции легко показать на всех примерах, где приводится во вращение тело, закрепленное на оси. Рассмотрим два таких опыта.

1. Блок (рис. 63) приводится во вращательное движение вокруг горизонтальной оси опускающимся грузом P (потенциальная энергия падающего груза превращается в кинетическую энергию вращательного движения блока). С блоком жестко соединен стержень A, на котором на равных расстояниях от оси вращения помещены грузы

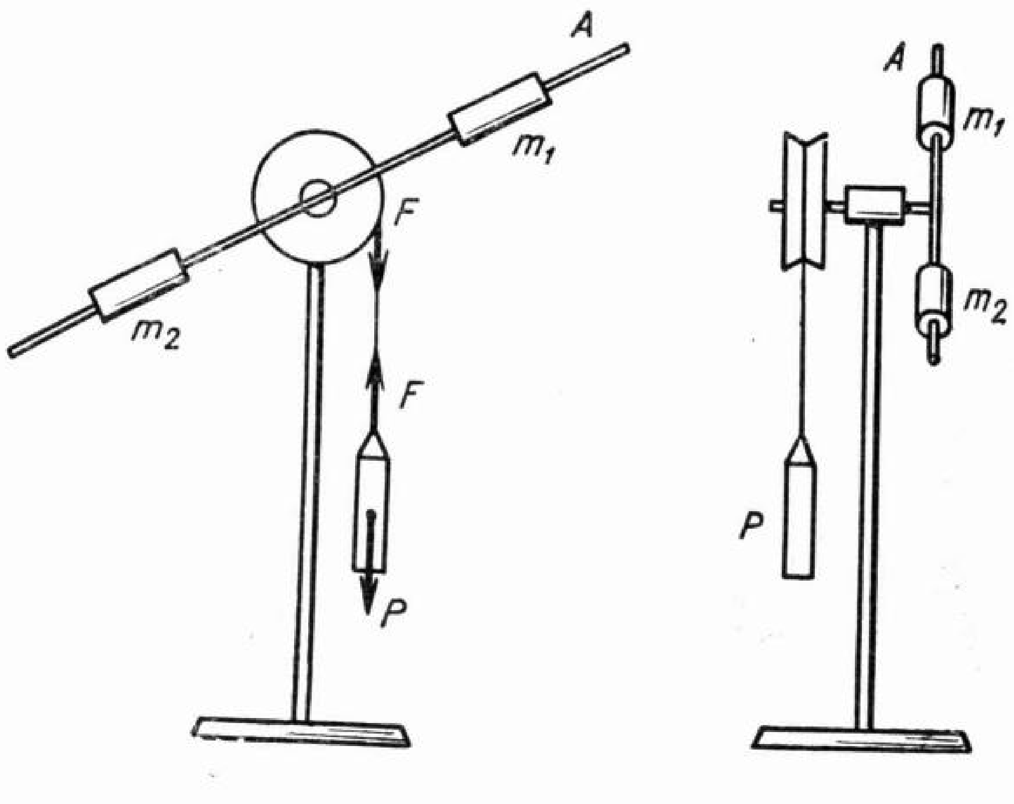


Рис. 63

m_1 и m_2. Эти грузы можно закреплять на различных расстояниях от оси вращения.

Проводят два наблюдения. Первый раз грузы m_1 и m_2 закрепляют на стержне A близко к оси, а во второй — на концах стержня. Наблюдения показывают, что в первом случае конечная (в момент соприкосновения груза P с поверхностью стола) угловая скорость вращения ω_1 значительно больше, чем ω_2 во втором случае. Это объясняется меньшим значением момента инерции блока и грузов в первом случае.

2. Берутся два цилиндра с одинаковыми радиусами и массой — один сплошной, а другой полый. Оба цилиндра помещают на верхний край наклонной плоскости (рис. 64), с которой они скатываются. При этом потенциальная энергия цилиндров превращается в кинетическую энергию. Очевидно, что потенциальная энергия на верхнем уровне и приобретенная при скатывании кинетическая энергия обоих цилиндров будут одинаковы. Опыт показывает, что полый цилиндр, имеющий больший момент инерции, скатывается заметно медленнее (отстает от сплошного) и приобретает к концу движения меньшую угловую скорость, чем сплошной.

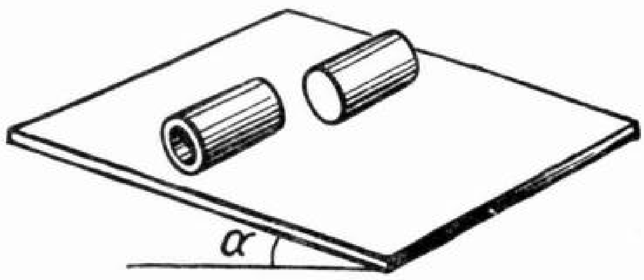


Рис. 64

Если учитель посчитает возможным ввести понятие углового ускорения $\varepsilon = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$ (опять-таки без указания на его векторный характер), то не представит большого труда вывод основного уравнения вращательного движения $\left(M = I \cdot \frac{\Delta\omega}{\Delta t}\right)$. В этом случае описанные опыты могут быть истолкованы динамически: вращательные моменты Pr, действующие на оба цилиндра, одинаковы, так как вес и радиусы обоих цилиндров одинаковы; поэтому полый цилиндр с большим моментом инерции получает при скатывании меньшее угловое ускорение и приобретает к концу скатывания меньшую угловую скорость. Аналогично объясняется и первый опыт.

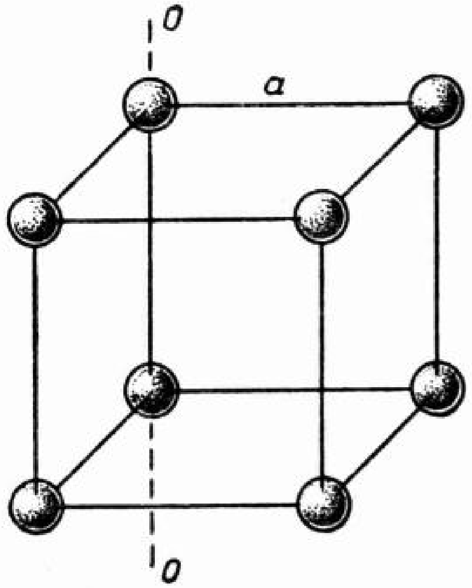


Рис. 65

Вывод основного уравнения, приемлемый для учащихся средней школы, можно найти в ряде курсов механики для вузов [1].

Вычислять моменты инерции тел $I=\int r^2 dm$ учащиеся средней школы не имеют возможности. Исключение составляют такие случаи, когда интегрирование может быть заменено суммированием конечного числа величин.

Например, для тела, состоящего из восьми одинаковых шариков, расположенных в вершинах куба с ребром a (рис. 65), момент инерции относительно оси, проходящей через ребро куба, будет равен:

$$I = 4ma^2 + 2m(a^2 + a^2) = 8ma^2.$$

(Заметим, что это справедливо, если диаметр шариков мал в сравнении с a.)

Момент инерции у двухатомной молекулы относительно оси, перпендикулярной к соединительной линии:

$$I = m_A r_A^2 + m_B r_B^2,$$

где r_A и r_B — расстояния атомов A и B до центра инерции. Если l — расстояние между атомами, то $r_A + r_B = l$ и $\dfrac{r_A}{r_B} = \dfrac{m_B}{m_A}$.

Отсюда момент инерции равен:

$$I = \frac{m_A m_B}{m_A + m_B} l^2.$$

Моменты инерции некоторых сплошных тел (шара, цилиндра, тонкого диска) могут быть сообщены учащимся без вывода.

Момент импульса. Понятие о моменте импульса может быть введено на основе аналогии, которую мы проводим между величинами, характеризующими поступательное

---

[1] С. П. Стрелков, Механика, Гостехиздат, М., 1956; К. А. Путилов, Курс физики, т. I, Учпедгиз, М., 1959.

движение материальной точки и вращательное движение тела.

Продолжая аналогию между обоими видами движений, напоминаем учащимся, что введение понятия об импульсе (mv) для движения материальной точки позволило вывести важный закон природы — закон сохранения импульса, которым мы пользовались при анализе ряда задач механики точки. Аналогичную величину можно ввести для вращательного движения.

Учащиеся уже убедились (при выводе формулы кинетической энергии), что величинами, аналогичными массе и скорости в поступательном движении, являются во вращательном движении момент инерции и угловая скорость. Поэтому вводим величину вращательного импульса

$$L = I\omega,$$

аналогичную понятию импульса.

Мотивом к ее введению является то, что с помощью этой величины мы можем сформулировать еще один закон сохранения, действующий в механике,— закон сохранения вращательного импульса.

Изменение импульса (mv) материальной точки может происходить только под действием силы. Изменение вращательного импульса тела происходит под действием момента силы (вращательного момента). Если момент силы относительно оси (или какой-либо точки) равен нулю, то угловая скорость тела не меняется и момент импульса L остается постоянным.

Вращательный импульс удовлетворяет закону сохранения: *в замкнутой системе тел* (на которую не действует внешний вращательный момент) *полный вращательный импульс входящих в эту систему тел не изменяется:*

$$I_1\omega_1 + I_2\omega_2 + \ldots + I_n\omega_n = \text{const}.$$

(Увеличение вращательного импульса одного из тел компенсируется равным уменьшением вращательного импульса остальных тел системы.)

Поскольку мы не выводим уравнения моментов $\left(M = \frac{\Delta L}{\Delta t}\right)$, а следовательно, и закон сохранения вращательного импульса, нужно привести достаточно убедительные экспериментальные подтверждения этого закона.

При подборе и постановке этих опытов нужно обойти еще одну трудность: учащимся мы не даем понятия о вращательном импульсе как о векторе и, следовательно, закон сохранения импульса даем также не в векторной форме. Мы можем говорить лишь о направлении вращения тела.

Наиболее эффектные и интересные опыты, которые объясняются на основе закона сохранения вращательного импульса, а потому могут служить его подтверждением, производятся на скамье Жуковского.

1. На скамью Жуковского садится ученик. Он сидит неподвижно и держит в левой руке (примерно на уровне глаз) велосипедное колесо со свинцовым вкладышем на ободе (рис. 66, *а*). Вращательный импульс вначале равен

а *б* *в*

Рис. 66

нулю. Ученик берется снизу правой рукой за спицы и приводит колесо во вращение. Оно получает некоторый вращательный импульс $I_1\omega_1$ и вращается по часовой стрелке. По закону сохранения вращательного импульса ученик должен получить вращательный импульс $I_2\omega_2$ такой же величины, но противоположного направления. Действительно, мы наблюдаем вращение скамьи с сидящим учеником против часовой стрелки, причем угловая скорость ω_2 вращения скамьи и ученика меньше скорости ω_1 вращения колеса, так как момент инерции скамьи и ученика больше момента инерции колеса.

2. Ученик, прижав обод колеса к груди (рис. 66, *б*), затормаживает вращение колеса. Одновременно прекращается и вращение скамьи. Оба импульса одновременно обращаются в нуль.

3. Ученик сидит на скамье неподвижно. Ему передают вращающееся колесо. Вращательный импульс колеса $I_1\omega_1$ теперь принадлежит уже колесу и человеку на скамье. Поэтому скамья вращается в ту же сторону, куда и колесо. Угловая скорость вращения скамьи ω_2 меньше ω_1; она может быть найдена из уравнения:

$$I_1\omega_1 = (I_1 + I_2)\omega_2.$$

Но если ученик перевернет колесо так, что нижний конец оси будет направлен вверх, то этим он изменит вращательный импульс (об этом можно сказать, даже не дав определения направления вращательного импульса,— вначале, глядя сверху, мы видели колесо вращающимся против часовой стрелки, а теперь — по часовой стрелке). В этом случае человек со скамьей начинает вращаться в противоположную сторону (рис. 66, *в*).

Эти опыты убеждают учащихся в справедливости закона сохранения вращательного импульса.

Следует обратить внимание учащихся на следующий факт. Движение тела с постоянным импульсом mv (например, движение тела, свободного от взаимодействий или когда равнодействующая всех действующих на него сил равна нулю) является равномерным.

При движении тела с постоянным вращательным импульсом $I\,\omega$ (когда момент силы равен нулю) угловая скорость ω может изменяться, так как может изменяться во время движения момент инерции I. Это явление демонстрируется на ряде опытов. На той же вращающейся скамье это можно показать хорошо известными опытами, когда момент инерции сидящего на ней человека с гантелями в руках меняют разведением рук в стороны или, наоборот, прижиманием их к груди (рис. 67).

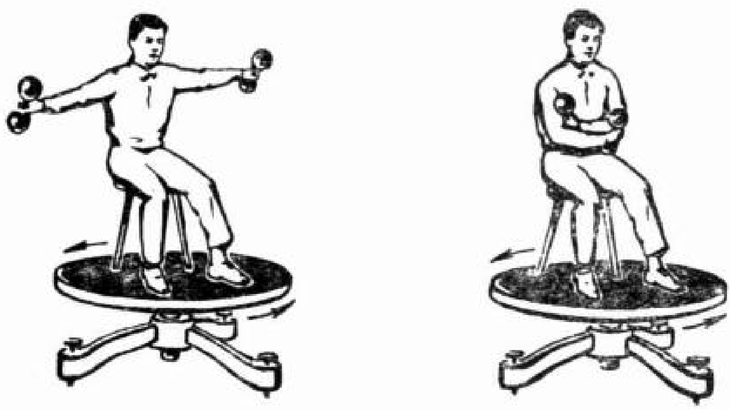


Рис. 67

Рис. 68

Известны многочисленные примеры использования этого явления гимнастами, танцорами при всякого рода поворотах и кружениях: скорость сообщается отталкиванием от пола в положениях с бо́льшим моментом инерции, а затем изменением позы (рис. 68) уменьшают момент инерции и тем увеличивают угловую скорость вращения.

С введением в программу вопросов вращательного движения твердого тела скамья Жуковского должна стать обязательным предметом оборудования кабинета физики. Частично ее можно заменить, изготовив несложные приборы, аналогичные описанным в книге «Демонстрационный эксперимент»[1] и в журнале «Физика в школе»[2].

В связи с тем что учащиеся средней школы не имеют возможности вычислять моменты инерции тел (а запоминать их нет смысла) и им не выводится уравнение моментов $\left(M=\frac{\Delta L}{\Delta t}\right)$, вряд ли целесообразно изучение этой темы проводить с помощью решения задач. Значительно эффективнее оказывается качественный анализ различных примеров и опытов, аналогичных приведенным.

---

[1] В. А. Буров, Б. С. Зворыкин и др., Демонстрационный эксперимент по физике в старших классах средней школы, т. I, изд. «Просвещение», М., 1967.

[2] Н. В. Понырко, Прибор для демонстрации закона сохранения момента количества движения, «Физика в школе», 1965, № 3.

Как бы ни были многочисленны опытные обоснования закона сохранения момента импульса, нельзя считать, что они могут заменить строгий аналитический вывод этого закона. Нельзя не учитывать также того, что во всех предложенных опытах обоснование закона давалось только качественное. Измерять моменты инерции тел и угловые скорости вращения велосипедного колеса и скамьи Жуковского мы не имеем возможности. Учащихся, приученных к строгим выводам механики, не может полностью удовлетворить предложенный путь ознакомления с одним из важных законов.

В классах с более сильным составом учащихся можно дать несколько более обоснованное изложение этого учебного материала. Для этого выводят уравнение моментов $M=\frac{\Delta L}{\Delta t}$ и из него устанавливают, что, если момент внешней силы равен нулю, вращательный импульс тела остается величиной постоянной.

Элементарный вывод можно предложить в таком виде. В то время как для поступательного движения тела мы вводили величину импульса mv, для тела, совершающего движение относительно оси O (рис. 69), мы вводим величину $L=mvd$. Устанавливаем связь между моментом внешних сил и моментом импульса тела, движущегося относительно оси O. Пусть тело движется так, что расстояние d от оси вращения не меняется (тело движется по окружности вокруг оси, перпендикулярной к плоскости чертежа). Запишем уравнение второго закона Ньютона для этого тела:

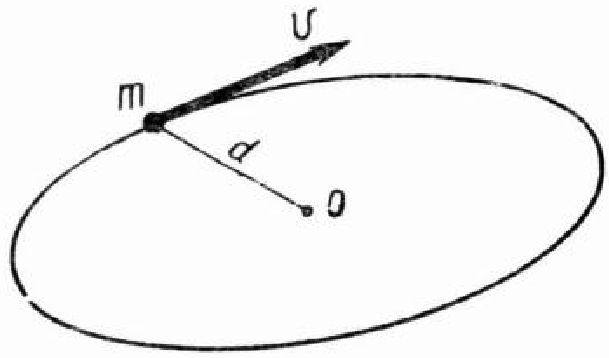


Рис. 69

$$F=\frac{\Delta\, mv}{\Delta\, t}.$$

Умножим обе части уравнения на d, тогда

$$Fd=d\cdot\frac{\Delta\, mv}{\Delta\, t}.$$

Левая часть уравнения есть момент силы относительно выбранной оси. Легко видеть, что правая часть представляет собой изменение момента импульса тела в единицу времени:

$$d \cdot \frac{\Delta mv}{\Delta t} = \frac{\Delta mvd}{\Delta t} = \frac{\Delta L}{\Delta t}.$$

Отсюда

$$M = \frac{\Delta L}{\Delta t}.$$

Если момент внешней силы M равен нулю, то момент импульса L остается постоянным.

Можно далее выразить момент импульса через момент инерции. В самом деле, линейную скорость v выражаем через ωr, тогда

$$mvd = md^2\omega.$$

Выражение md^2 есть знакомое уже учащимся выражение момента инерции I, тогда момент импульса может быть выражен:

$$L = I\omega,$$

а уравнение моментов:

$$M = \frac{\Delta I\omega}{\Delta t}.$$

Приведенные выше опыты в данном случае мы приводим как иллюстрации этого вывода.

Рассмотрение методики изучения всех законов сохранения, действующих в механике, в одной главе не означает, конечно, что и в программе они должны быть поставлены совместно.

Каждый из них изучается в соответствующем месте — динамика материальной точки, энергетические вопросы механики, динамика вращательного движения твердого тела. Объединением их в одной главе мы хотели подчеркнуть лишь их особое значение для повышения уровня знаний учащихся в области механики.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Эсфирь Ефимовна Эвенчик

ПРЕПОДАВАНИЕ МЕХАНИКИ В КУРСЕ ФИЗИКИ СРЕДНЕЙ ШКОЛЫ

Редактор *В. Л. Климонтович*. Художник *А. М. Левкин*. Обложка художника *С. Я. Нодельман*. Художественный редактор *Б. Л. Николаев*. Технический редактор *Т. А. Семейкина*. Корректор *Л. П. Михеева*

Сдано в набор 20/IX 1966 г. Подписано к печати 2/IX 1967 г. $84\times108^{1}/_{32}$. Типогр. № 2. Печ. л. 9,45 (5,625) Уч. изд. л. 8,99. Тираж 40 тыс. экз. (Тем. пл. 1967 г. № 349/186). А04859.

Издательство «Просвещение» Комитета по печати при Совете Министров РСФСР Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41.

Сортавальская книжная типография Управления по печати при Совете Министров КАССР г. Сортавала, Карельская, 42. Заказ № 486.

Цена 24 коп.