

# Движение автомобилей и живых существ – и теорема о кинетической энергии

**А. РЫБАКОВ**

НАЧНЕМ С ЦИТАТЫ ИЗ ОДНОЙ ЗАМЕЧАТЕЛЬНОЙ книги, написанной более века назад: «Когда система состоит из большого числа частей, то полное изучение ее движения может оказаться очень сложным и даже невыполнимым. В таких случаях полезно, ранее подробного исследования движения частей системы, получить некоторое понятие об общем движении всей системы в совокупности».

Именно об этом и пойдет разговор – о принципиальных моментах динамики некоторых систем, которые мы видим вокруг нас.

Во множестве учебников – от базового учебника физики для 9 класса до серьезных курсов теоретической механики – есть теорема о кинетической энергии. И формулировки этой теоремы в разных учебниках практически одинаковы. Вот как она формулируется: *изменение кинетической энергии тела равно работе всех действующих на него сил*, или

$$E_{\text{кин}2} - E_{\text{кин}1} = A_{12}.$$

Некоторые авторы вместо тела в условии теоремы говорят о материальной точке. В 9 классе доказательство этой теоремы проводится в предположении, что сила, действующая на тело, постоянна, в вузовском учебнике для работы силы будет выписан соответствующий интеграл, но сути дела это не

меняет. Более того, утверждение теоремы кажется нам вполне естественным и понятным даже и без доказательства. Между тем, для большинства тел, движение которых мы наблюдаем, теорема очевидным образом несправедлива!

«Автор ниспровергает законы механики?!» – ужаснется читатель. Да нет, конечно. Автор только напоминает, что и в жизни и, тем более, в точных науках обычно «дьявол прячется в деталях». Вот эти-то детали и предлагается обсудить.

Какие бы тела нам выбрать для применения к ним сформулированной выше теоремы? Выглянем в окно: вот – едет автомобиль, вот – человек идет, вот – бежит кошка, а вот еще какой-то жук ползет по карнизу. Их-то мы и выберем. А начнем с автомобиля. Только в одном случае – в случае буксировки на тросе – применение этой теоремы к движению автомобиля не вызывает никаких затруднений. Но обычный-то режим движения автомобилей не таков...

## Какая сила ускоряет автомобиль?

В каком-то старом учебнике механики я увидел такое название одного из разделов: «Самодвижущиеся экипажи». Замечательное название! И у нас речь в первую очередь пойдет о самодвижущихся экипажах на колесном ходу (или на гусеничном) с *традиционным* для таких устройств принципом движения. Последнее замечание исключает из нашего рассмотрения такие специфические устройства, как аэросани, парусники или автомобили с ракетным двигателем (специально конструируемые для установки рекордов скорости).

Обсудим некоторые принципиальные моменты механики самодвижущихся экипажей, т.е. те моменты, которые не связаны с конкретным устройством двигателя, трансмиссии и прочих вещей, милых сердцу каждого автомобилиста. Будем для удобства говорить об автомобиле, но все сказанное будет в равной мере применимо к тепловозу, танку, велосипеду и даже – к детскому заводному автомобильчику.

Главный вопрос, конечно, такой: какая сила ускоряет автомобиль? Упоминание в



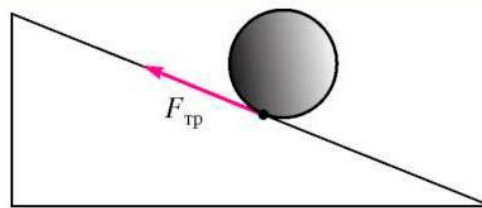
ответе на этот вопрос какой-то «силы тяги», заметим, ничего не объясняет. Надо конкретно указать взаимодействующие тела и описать свойства силы. Для наших целей лучше поставить два разных вопроса. Можно спросить: действие какой силы приводит к изменению импульса автомобиля? А можно спросить: откуда берется кинетическая энергия автомобиля? Как ни странно, ниже мы убедимся, что это действительно разные вопросы.

Будем вести речь о *нормальном* режиме движения, когда колеса не проскальзывают относительно дороги. Для ответа на первый вопрос необходимо указать конкретную *внешнюю* силу (внутренние силы изменить движения центра масс системы не могут). И такая сила легко находится. Действительно, к ведущему колесу от двигателя передается крутящий момент, под действием которого колесо стремится провернуться относительно дороги, но возникающая между колесом и дорогой сила трения мешает ему это сделать. Ясно, что сила трения, приложенная к колесу, направлена противоположно возможному проскальзыванию, т.е. вперед, по направлению движения автомобиля. Вот действие этой силы и приводит к увеличению импульса автомобиля, можно сказать – заставляет автомобиль двигаться.

### Свойства этой силы

Итак, речь идет о силе трения между ведущими колесами и дорогой. Автомобилисты называют ее *силой сцепления с дорогой*. И обладает она удивительными свойствами. Впрочем, мы можем столкнуться со свойствами этой силы, решая обыкновенные учебные задачи и не думая об автомобиле.

Вот, например, известная задача, которую нельзя обойти при изучении динамики вращательного движения, – задача о скатывании цилиндра с наклонной плоскости без проскальзывания. Очень полезно решить ее несколькими разными способами. Заметим, что именно сила трения о плоскость закручивает цилиндр (см. рисунок). И когда вы будете решать эту задачу, записывая закон сохранения энергии для цилиндра, перед вами неизбежно встанет воп-



рос о величине работы этой силы. Оказывается, работа силы трения в этом случае равна нулю.

Если читатель впервые сталкивается с такой мыслью, он скажет: «Что за чепуха? Сила есть, перемещение есть, а работы нет?!» Да, именно так. Дело в том, что эта сила – сила трения *покоя*, она приложена к точке касания цилиндра с плоскостью, мгновенная скорость которой относительно плоскости равна нулю. Есть перемещение цилиндра, но нет перемещения точки приложения силы.

Ничего нового или оригинального в высказанных сейчас соображениях, конечно, нет. И все это без всяких изменений переносится на взаимодействие автомобильного колеса с дорогой.

Итак, сила сцепления колеса с дорогой работы не совершает. Но ведь и в школьных задачниках, и в серьезных руководствах по механике автомобиля можно видеть, что авторы записывают работу силы тяги как произведение  $Fs$ , где  $F$  – сила тяги, а  $s$  – пройденный автомобилем путь. Не могут же они все ошибаться! И почему их ошибки не проявляются тотчас же на практике? Этот вопрос подробно рассматривался в «Кванте» в статье А. Черноуцана «Кое-что о силе тяги» («Квант» №5 за 1992 г.). И ответ оказался удивительным и парадоксальным.

Какую часть израсходованной на движение энергии можно считать полезной? Разумеется, ту, которая пошла на увеличение кинетической и потенциальной энергии автомобиля и на преодоление сопротивления движению. В упомянутой статье показывается, что эту энергию, израсходованную на пути  $s$ , при некоторых разумных предположениях всегда *можно записать* в виде произведения  $Fs$ . И, соответственно, мощность, расходуемая на движение, может быть записана как произведение  $Fv$ . Ниже мы укажем совсем простой путь получения этого результата.

Однако вернемся к основной линии наших рассуждений. Сформулированный сейчас результат никак не может поколебать наш вывод о том, что работы-то сила сцепления с дорогой не совершает. А значит, теорема о кинетической энергии (в том виде, как она приведена выше) для автомобиля заведомо не справедлива.

И не только для автомобиля...

### Люди, кошки, тараканы...

Есть огромный класс объектов, для которых указанное выше свойство движущей силы (равенство нулю ее работы) еще очевиднее, чем для автомобилей. И мы с вами, читатель, яркий пример тому в целом ряде случаев: когда мы разбегаемся, ускоряясь, когда скользим на лыжах, отталкиваясь палками от снега, или когда, находясь в лодке, отталкиваемся шестом от дна речки. И все братья наши меньшие. И вообще все-все-все, перемещающиеся по твердой опоре шагом или прыжками на своих двух, четырех, шести ногах (лапах). При движении всех этих объектов точка приложения силы не перемещается, потому никакой работы силы нет. Однако, объект ускоряется или движется, преодолевая сопротивление.

Здесь можно немного отвлечься в сторону и подумать о том, на что же мы тратим энергию, например, при ходьбе. По-видимому, на изменение конфигурации тела и на неизбежный подъем центра тяжести. Посмотрите на спортсменов, занимающихся ходьбой на длинные дистанции, – их странная походка ориентирована как раз на то, чтобы уменьшить расход энергии на подъем центра тяжести.

Итак, есть огромный класс объектов, движение которых очевидным образом противоречит теореме о кинетической энергии. В чем же дело?

Дело в том, что все конкретные утверждения физики обычно опираются на некоторые модельные предположения, которые либо высказаны весьма определенно, либо заложены в наши рассуждения и утверждения неявно. Вот где зарыта собака! Авторы приведенной выше формулировки теоремы о кинетической энергии рассматривали тело

либо как материальную точку, либо как абсолютно твердое тело, оставляя читателям самостоятельно определять, вписывается ли какой-то конкретный объект в рамки этих моделей.

Какое условие всегда выдвигают на первый план при обсуждении модели материальной точки? Конечно же, малость размеров тела по сравнению с другими размерами в задаче. Но нельзя думать, что это *достаточно* условие. Применимость или неприменимость какой-то модели к конкретному объекту зависит от того, на какие вопросы мы ищем ответы. Для обсуждаемых нами вопросов соотношения размеров вообще никакой роли не играют.

Что общего в принципе движения всех перечисленных выше объектов – и технических устройств, и живых существ? Все они движутся за счет изменения своей *конфигурации*. И именно на это и расходуют свою энергию. И нет ничего удивительного в том, что попытка применить к ним модель материальной точки или абсолютно твердого тела приводит к недоразумению – в рамках указанных моделей эти процессы рассматривать невозможно. А вот если представить интересующие нас объекты как системы материальных точек, то все наши недоуменные вопросы оказываются снятыми. Для такой системы кинетическая энергия меняется под действием и внешних, и внутренних сил.

Пусть сила  $F$ , приложенная к колесу автомобиля, постоянна по величине. Для вращения колеса к нему должен быть приложен момент сил  $M = FR$ , где  $R$  – радиус колеса. Значит, при повороте колеса на угол  $\varphi$  будет совершена работа  $A = M\varphi$ . Если автомобиль прошел путь  $s$ , то колесо повернулось на угол  $\varphi = \frac{s}{R}$ , поэтому силы, вращающие колесо, совершили работу  $A = Fs$ . Теперь ясно, что для автомобиля величина  $Fs$ , строго говоря, является *полезной работой внутренних сил*.

Формулируя же теорему о кинетической энергии так, как это было сделано в начале статьи, необходимо помнить, что в таком виде она применима только для тел *неизменной* конфигурации.