



Белонучкин Владимир Евгеньевич
Кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры общей физики Московского
физико-технического института (МФТИ).

Энергия – хорошо, а импульс – лучше

Из школьного курса физики нам известны закон сохранения энергии и закон сохранения импульса (количества движения). Часто достаточно воспользоваться одним из них, чтобы решить задачу. Но если решать на основе обоих законов, а ответы получаются разными? Чему верить тогда?

Нельзя, конечно, принимать всерьёз заголовок статьи и отдавать предпочтение одному закону. Однако на практике поступают именно так – предпочтение отдаётся закону сохранения энергии. При этом забывают о том, что энергия может переходить из одной формы в другую.

Мы с вами не на экзамене, у нас достаточно времени, и поэтому попробуем каждую задачу решить дважды, а затем разобраться, где правда.

Задача 1. Тело массы M под действием пружины совершает колебания на гладком столе. В момент, когда тело проходит положение равновесия, на него сверху падает и прилипает к нему кусок пластилина массы m . Как изменится амплитуда колебаний?

Первый вариант решения. Кусок пластилина падает вертикально, поэтому движение в горизонтальном направлении не изменится, иными словами, энергия тела с пластилином равна энергии тела перед ударом. При наибольшем отклонении от положения равновесия вся энергия переходит в энергию растянутой пружины: по-видимому, амплитуда колебаний не изменится.

Второй вариант решения. После прилипания пластилина масса колеблющегося тела возросла в $(M + m)/M$ раз, количество движения не изменилось, скорость упала во столько же раз, во сколько возросла масса. Получаем уменьшение энергии в $(M + m)/M$ раз.

Энергия деформированной пружины пропорциональна квадрату деформации, следовательно, амплитуда колебаний уменьшится в $\sqrt{(M + m)/M}$ раз.

Ясно, что по крайней мере одно решение неверно. Какое же?

Сохраняется то, что никому не отдаётся. Кому может отдать свой импульс колеблющееся тело? Только пластилину. Значит, в системе $M + m$ импульс должен сохраниться. При этом мы имеем в виду, конечно, только горизонтальную составляющую импульса, вертикальная составляющая из-за взаимодействия со столом изменяется. Она обращается в нуль.

А почему не должна сохраниться энергия горизонтального движения? Потому что нет закона сохранения данной формы энергии, есть только закон сохранения и превращения энергии. В частности, в рассматриваемом случае часть кинетической энергии соударяющих-



ся тел переходит в тепло. В эту часть входит кинетическая энергия куска пластилина и некоторая доля энергии тела.

Отделять энергию пластилина от суммарной энергии соударяющихся тел и говорить, что вся энергия пластилина ушла в теплоту, некорректно. Можно говорить только о части суммарной энергии соударяющихся тел, перешедшей в теплоту. Кроме того, часть начальной суммарной кинетической энергии соударяющихся тел может перейти и в другие виды внутренней энергии, а не только в тепловую. (Примечание редакции журнала).

Энергия может и не утечь из системы, не быть переданной другим телам, и тем не менее, количество данного вида энергии может измениться.

Вспомним, что при соударении тел кинетическая энергия сохраняется только в случае абсолютно упругого удара (точнее было бы сказать наоборот – абсолютно упругим называется удар, при котором сохраняется суммарная кинетическая энергия соударяющихся тел). В нашей же задаче (пластилин прилипает) удар заведомо неупругий, и кинетическая энергия попросту должна измениться.

Количество движения ни во что перейти не может, у него нет «других форм», количество движения замкнутой системы сохраняется всегда. Поэтому правильным является второй вариант решения.

В этой связи рассмотрим ещё один пример.

Задача 2. В лежащем на гладком горизонтальном столе шаре застревает горизонтально летевшая пуля. Будет ли зависеть скорость поступательного движения шара от того, в какую точку попала пуля?

В условии и приведённом ниже решении этой задачи нет ясности, что конкретно подразумевается под скоростью поступательного движения. Поэтому приведённое ниже решение можно считать приближённым и качественным описанием интересного опыта. (Примечание редакции журнала).

Огорчительно часто приходится слышать примерно такие ответы: если пуля попадёт в центр шара, то он будет двигаться только поступательно, а при ударе в другую точку шар будет ещё и вращаться. Причём чем дальше от центра попала пуля, тем больше будет скорость вращения шара. Таким образом, при нецентральной ударе часть энергии пули перейдёт в энергию вращательного движения шара... Следовательно, при центральном ударе скорость шара будет наибольшей, а чем дальше от центра попадёт пуля, тем скорость будет меньше.

Но закон сохранения импульса уверяет нас, что скорости должны быть одинаковы. А как обстоит дело с энергией? Энергия не сохраняется, и в случае центрального удара часть её переходит в тепло. И один закон сохранения энергии не может сказать, одинаковое ли количество энергии переходит в тепло при центральном и нецентральной ударах. А в приведённом нами выше рассуждении молчаливо предполагалось, что переходит одинаковое количество. Применение закона сохранения импульса даёт возможность понять, что это не так, что вращательное движение шара, не изменяя поступательного движения, «забирает» часть той энергии, которая при центральном ударе перешла бы в тепло.

Задача 3. Математический маятник длины l и массы m раскачивают следующим образом: каждый раз, когда маятник проходит положение равновесия, на него в течение короткого промежутка времени t действует сила F , направленная параллельно скорости. Сколько колебаний совершит маятник до того, как отклонится на 90° ?

В задаче можно найти точно только число воздействий (толчков) на маятник до того, как он отклонится на 90° . Число колебаний, которое найдено ниже, получено с точностью до одного колебания. (Примечание редакции журнала).



В конце первого толчка маятник имеет скорость Ft/m , его кинетическая энергия $(Ft)^2/2m$. Через k колебаний он приобретает энергию $k(Ft)^2/m$ (за период маятник дважды проходит положение равновесия). Для того, чтобы отклониться на 90° , маятнику необходимо обладать энергией mgl . Значит, $k = m^2gl/(Ft)^2$. Это неверный ответ.

Читатель, вероятно, догадывается, что в действительности на одинаковую величину при каждом воздействии меняется не энергия, а количество движения. Изменение энергии равно совершённой над телом работе, а работа определяется произведением силы на путь, на котором она действует. Но ведь маятник разгоняется и за время действия силы успевает пройти всё большее и большее расстояние. Значит, энергия растёт всё быстрее. А вот скорость тела каждый раз меняется на величину Ft/m . Импульс силы Ft определяет изменение количества движения тела. Нетрудно подсчитать, что искомое

$$\text{количество колебаний } k = \frac{m}{Ft} \sqrt{\frac{gl}{2}}.$$

В заключение разберём ещё одну задачу.

Задача 4. Водомётный катер забирает забортную воду и выбрасывает её назад со скоростью V относительно катера. При этом он движется со скоростью U . К катеру на длинном тросе прицепили буксируемое судно, сила сопротивления которого при одинаковой скорости движения равна сопротивлению катера. Определить скорость буксира, если известно, что силы сопротивления катера и буксируемого судна изменяются пропорционально их скоростям.

Здесь речь идёт о силе сопротивления, действующей на судно и катер со стороны воды. (Примечание редакции журнала).

На первый взгляд кажется очевидным, что скорость упадёт в два раза, так как при этом суммарная сила сопротивления примет прежнее значение. Но должна ли сила остаться прежней. Неизвестно. Может быть, скорость уменьшится в $\sqrt{2}$ раз? Тогда останется прежней мощность? В условиях задачи, однако, постоянство мощности не оговорено. Зато задана скорость выбрасываемой катером воды. Поскольку сечение отверстия трубы, через которое выбрасывается вода, по-видимому, не изменяется, постоянным будет расход – масса воды, выбрасываемой в единицу времени (обозначим эту величину M).

Данных в задаче оказалось ровно столько, сколько надо для того, чтобы решить её. Катер забирает неподвижную воду и разгоняет её до скорости $V - U$, сообщая ей соответствующий импульс; сам он при этом получает такой же импульс противоположного направления. При равномерном движении той же величине должен равняться импульс сил сопротивления. Опуская в обеих частях время, получаем уравнение: $M(V - U) = F$.

Для буксира (обозначим его скорость U_1) аналогичное уравнение принимает такую форму: $M(V - U_1) = 2FU_1/U$. Тогда $U_1 = VU/(2V - U)$.

Из ответа, в частности, следует, что мощность, развиваемая двигателем катера, не может оставаться постоянной.

Можно, конечно, подобрать достаточно много примеров, когда с помощью закона сохранения энергии получить ответ легче, чем при помощи закона сохранения импульса. И, наверное, стоило бы назвать статью «Энергия – хорошо, а импульс – хуже»? Но школьники, как правило, явно пренебрегают импульсом, и хотелось за него «заступиться».