

5. Импульс и энергия

5.1. Импульс как носитель энергии

Когда мы напрягаемся, то расходуем энергию. Что подразумевается под “расходом энергии”? Ну, например, надо хорошо поесть, чтобы можно было выдержать это напряжение. С пищей мы получаем энергию, которая при напряжении нашего тела отдается назад. Выражение “ты расходуешь много энергии” означает, что “через тебя проходит много энергии, т.е. ты много ее воспринимаешь и много энергии отдаешь”.

На рис. 5.1 человек тянет ящик по земле. (Ясно, что это можно делать способом, требующим меньшего напряжения, но тогда рассмотрение проблемы было бы более сложным). Чем больше напряжение, тем больше энергии отдается. Куда девается эта энергия? Она поступает ко дну ящика, там она выделяется в виде тепла и рассеивается таким образом в окружающей среде.

Рассмотрим транспортировку энергии между человеком и ящиком. Во-первых, надо выяснить что переносит энергию. По тросу между человеком и ящиком одновременно с током энергии имеет место еще ток импульса. Поэтому предположим, что неизвестным носителем энергии является импульс.

Импульс является носителем энергии

Одновременно нетрудно заметить, что не всякий поток импульса сопровождается потоком энергии: на рис. 5.1 поток импульса,



как мы знаем, течет из ящика по земле назад к человеку. Энергия же от ящика распространяется по собственным путям. Обратный поток импульса не переносит энергии.

От чего зависит величина тока энергии? Или в несколько более общей формулировке: как сделать так, чтобы с помощью некоторого троса или шеста передавалось по возможности больше энергии?

Если натянутый трос закреплен между двумя стенками (рис. 5.2), то через него течет поток импульса, но, очевидно, нет потока энергии, т.к. трос не нагревается и не двигается. В чем же, однако, состоит разница для тросов на рисунках 5.1 и 5.2? В первом случае трос движется, а во втором нет. Похоже, что перенос энергии связан со скоростью, с которой перемещается проводник импульса.

Кроме того, сила тока энергии зависит, естественно, от интенсивности потока импульса, т.к. если трос находится в ненапряженном состоянии, то через него не переносится энергия.

Таким образом мы получили важный результат

сила тока энергии P по тросу зависит
- от силы тока импульса F в тросе;
- от скорости v троса.

Выясним теперь количественную связь между величинами. С помощью какого уравнения связаны друг с другом три величины P , F и v ?

Зависимость силы тока энергии P от силы тока импульса F легко найти. На рис. 5.3 показано сверху как два одинаковых ящика перемещают по полу. Сравним два троса А и В. Оба перемещаются с одинаковой скоростью. При этом поток импульса, а также поток энергии, в точке соединения P делится пополам: поток импульса в тросе В составляет половину от

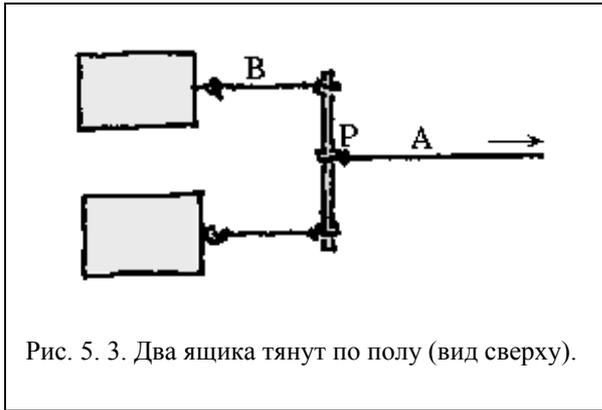


Рис. 5. 3. Два ящика тянут по полу (вид сверху).

сила тока энергии прямо пропорциональна силе тока импульса:

$$P \sim F$$

Чтобы найти соотношение между P и v , сделаем следующий опыт. На рис. 5.4 ящик перемещается с помощью полиспаста (системы блоков). Сравним тросы А и В. Сначала сделаем это для энергии: вся энергия, которая справа втекает в трос В, переходит через блок и трос А дальше. В трос С энергия не втекает, т.к. он не перемещается. Поэтому получаем, что

$$P_A = P_B$$

Теперь сравним скорости А и В. Если перемещать ящик, а вместе с ним и трос А, на некоторое расстояние вправо, то одновременно правый конец троса В переместится вправо на удвоенное указанное расстояние. Пусть ящик переместился на 10 см, но тогда и блок С переместится на 10 см. Если бы трос не был перекинут через блок С, а был бы прикреплен к правому концу троса А, то он тоже бы передвинулся на 10 см. Из-за перемещения блока вправо трос С становится на 10 см короче и эти 10 см троса С идут в пользу (на удлинение) троса В. Трос В смещается при этом на 20 см. Это также значит, что скорость В всегда в два раза больше скорости А, т.е.

$$v_B = 2v_A$$

Наконец, сравним еще потоки импульсов в тросах А и В. Это можно сделать только с помощью измерений. При этом оказывается, что сила тока импульса в тросе В в два раза меньше, чем в тросе А. (В тросе С она такая же как и в тросе В, т.к. выполняется правило узла). Отсюда можно написать:

$$F_A = 2 F_B .$$

Все эти результаты можно объединить в одно соотношение:

$$P \sim v \cdot F$$

Свойство пропорциональности означает, во-первых, что P прямо пропорционально F , если скорость остается постоянной. И, во-вторых, если v удваивается, а F уменьшается в два раза, то P остается неизменным, что и было обнаружено в эксперименте с полиспастом.

Если носителем энергии является импульс, то сила тока энергии пропорциональна силе тока импульса и скорости, с которой перемещается проводник импульса.

Чтобы из этой пропорциональности получить формулу, следует ввести коэффициент пропорциональности. Но в СИ единицы измерения трех входящих величин выбраны настолько удачно, что можно написать просто следующее соотношение:

$$P = v \cdot F$$

Это и есть искомый результат. С его помощью можно рассчитывать силу тока потока энергии в тросе, если мы знаем силу тока импульса в тросе и его скорость.

Пример. Пусть мы тянем трос со встроенным динамометром. При этом динамометр показывает 120 Н и трос перемещается со скоростью 0,5 м/с. Тогда сила тока энергии будет равна

$$P = v \cdot F = 0,5 \text{ м/с} \cdot 120 \text{ Н} = 60 \text{ Вт}$$

Заметь, что скорость должна быть в м/с, а сила в Н, чтобы сила тока энергии была получена в единице измерения системы СИ, т.е. в ваттах (Вт).

Формула

$$P = v \cdot F$$

может быть преобразована. При этом получится соотношение, которое более удобно для некоторых задач. Для этого заменим P на E/t и v на s/t :

$$\frac{E}{t} = \frac{s}{t} \cdot F$$

а потом умножим правую и левую части на t . Тогда получим

$$E = s \cdot F$$

Из этой формулы следует, например, такое утверждение. Если давить на шест и он при этом смещается на расстояние s , то по шесту протекает количество энергии равно $v \cdot F$. Здесь F представляет собой силу тока импульса, который протекает через шест во время его смещения.

Пример. Мы тянем трос таким образом, что через него течет сила тока импульса 120 Н и он перемещается на 2 м. Какое количество энергии будет передано по тросу? Применим нашу новую формулу. Для $F = 120$ Н и $s = 2$ м имеем $E = s \cdot F = 2 \text{ м} \cdot 120 \text{ Н} = 240 \text{ Дж}$

Задачи

1. Трактор тянет прицеп со скоростью 20 км/час по ровной дороге. Через сцепное устройство протекает ток импульса величиной 900 Н. Сколько энергии расходуется для прицепа? (Чему равен поток энергии от трактора к прицепу?) Куда расходуются энергия и импульс, которые втекает в прицеп?
2. Грузовик тянет прицеп по ровной дороге из одного города в другой. Расстояние между городами равно 35 км. Через сцепное устройство протекает ток импульса величиной 900 Н. Сколько энергии протечет из грузовика в прицеп за время движения?
3. Приводной ремень некоторой машины движется со скоростью 10 м/с. Переносимая ремнем сила тока энергии равна 800 Вт. С какой силой тянут шкивы ремень? (Чему равна сила тока импульса в ремне?)
4. Кран поднимает груз 50 кг со скоростью 0.8 м/с. Чему равен поток энергии через трос крана? Груз поднят на высоту 5 м. Как долго продолжался подъем? Сколько энергии протекло по тросу за это время?



Рис. 5. 5. При растяжении пружины в нее втекает энергия через правый конец.

5.2. Механические накопители энергии

а) Упруго деформированное тело как накопитель энергии

Растянем длинную, сильно упругую пружину (рис. 5.5). Это утомительно, т.к. требует расхода энергии. Рассмотрим правый конец пружины (точка А на рис. 5.5). Этот конец пружины находится в механически напряженном состоянии, т.е. через него проходит ток импульса величиной F и он смещается со скоростью v . Согласно формулы $P = v \cdot F$ через пружину в этом месте имеется ток энергии. Рассмотрим теперь левый конец пружины (точка С). Величина тока импульса здесь такая же как и в точке А. Но так как С не смещается, то через нее нет тока энергии. Энергия, которая втекает через точку А, не выходит из пружины в точке С. Она накапливается в пружине.

Мы можем исследовать потоки также в других точках пружины, например, в центре пружины в точке В. Поток импульса здесь такой же как и в точках А и С. Скорость средней части пружины составляет половину от скорости в точке А. Поэтому поток энергии в В равен половине потока, который втекает в точке А. Это понятно, т.к. половина энергии запасается в правой части пружины, а другая половина перетекает в левую часть пружины. Это утверждение можно обобщить: в каждой трети пружины накапливается точно одна треть энергии; в каждой четверти пружины накапливается четверть энергии и т.д. Или коротко: энергия равномерно распределяется по всей длине пружины.



Рис. 5.6. В растянутом эспандере, натянутой рогатке, изогнутом трамплине и продавленном футбольном мяче накоплена энергия .

Если некоторую пружину сжимать без изгибов, то энергия в ней накапливается таким же образом как и при растяжении.

Пружина является накопителем энергии. Чем сильнее пружина растянута или сжата, тем больше энергии она содержит в себе.

Разумеется, эти утверждения пригодны не только для пружины, но и для любого другого упруго деформируемого тела: растянутый эспандер содержит столько же энергии сколько и натянутая рогатка, прогнутый трамплин или продавленный футбольный мяч. (Рис. 5.6.).

в) Движущиеся тела как накопители энергии

Зарядим хорошо нагруженный автомобиль импульсом, как делали это уже не раз (рис. 5.7). Конечно, мы теперь знаем, что через трос протекает не только импульс, но также и энергия. Автомобиль теряет энергии также мало как и импульса. Если тянуть автомобиль, то в нем накапливаются как импульс, так и энергия.



Рис. 5.7. При ускорении автомобиля в него втекает не только импульс, но и энергия.

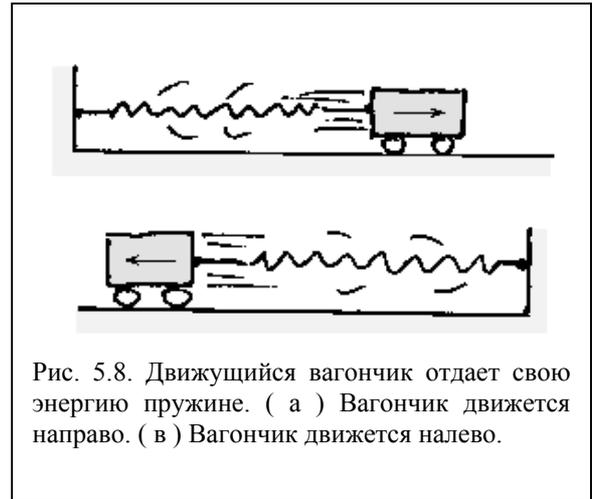


Рис. 5.8. Движущийся вагончик отдает свою энергию пружине. (а) Вагончик движется направо. (в) Вагончик движется налево.

Движущееся тело содержит энергию. Чем больше его скорость, тем больше энергии оно содержит.

Если движущийся автомобиль останавливается, то его импульс стекает в землю. Энергия автомобиля выбирает себе другой путь. Она превращается в тепловую энергию. Всюду, где имеется трение, образуется теплота. Энергия при этом рассеивается в окружающей среде: частично уходит в землю, частично в автомобиль и частично в воздух.

Можно энергию движущегося вагончика отдать пружине и там сохранить: для этого вагончик должен растянуть пружину (рис. 5.8). Вагончик при этом остановится. Пружину можно растянуть двумя способами: пусть пружина прикреплена к стене левым концом, а правый конец вагончик тянет направо, или правый конец прикреплен к стене, а левый тянут в левую сторону. В обоих случаях результат один и тот же: растянутая пружина заряжена энергией. В первом случае энергия поступает из вагончика, имеющего положительный импульс, а во втором случае вагончик обладает отрицательным импульсом. Но в обоих случаях вагончики, несомненно, имеют положительную энергию.

Энергия движущегося тела всегда является положительной и при этом безразлично в каком направлении оно движется.



Рис. 5.9. При подъеме на высоту некоторого тела происходит накопление энергии в поле тяготения.

с) *Поле тяготения как накопитель энергии*

Пусть тяжелое тело поднимают вверх (рис. 5.9). Опять через трос протекает не только импульс, но и энергия. Импульс поступает, как мы знаем, из земли в тело через поле тяготения.

Поле тяготения можно представить себе как невидимую пружину, которая тянет тело. Аналогично тому, как при растяжении пружины в ней накапливается энергия, и в поле тяготения накапливается энергия при поднятии некоторого тела. Если такое тело отпустить вниз, то можно получить энергию из поля тяготения.

Для подъема тяжелого тела требуется больше энергии, чем для подъема легкого тела. Таким образом, в поле тяготения накапливается тем больше энергии, чем тяжелее тело, которое поднимается.

Поле тяготения является накопителем энергии. Чем выше поднимают тело и чем тяжелее оно, тем больше энергии вносится в поле тяготения

Энергия поля тяготения пригодна для использования в гидроэлектростанциях (рис. 5.10).



Рис. 5.10. Гидроэлектростанция. При сбросе воды по трубам вниз она получает энергию из поля тяготения. В турбинах вода освобождается от энергии.

Высоко в горах собирается вода горных речек и ручейков и по трубам отводится вниз. При падении вниз вода получает энергию из поля тяготения. Потом протекает через турбины электростанции, где отдает свою энергию. То есть энергия втекает в турбины с помощью носителя энергии “воды”. Из турбины энергия дальше передается в генератор другим носителем энергии - вращающим моментом (моментом импульса).

5.3. Сплетение путей энергии и импульса

Это сплетение мы рассмотрим в следующих двух процессах движения, именно: для подброшенного вверх камня (рис. 5.11) и для колебательного движения тела, закрепленного между двумя пружинами (рис. 5.12). В обоих случаях мы ответим на вопросы:

- какой путь избирает энергия?
- какой путь избирает импульс?

а) *Брошенный вверх камень*

Энергия

При подбрасывании энергия мускулатуры бросающего человека передается камню. Во время взлета энергия перетекает в поле тяготения. В верхней точке, где меняется направление движения, энергия полностью ушла из камня, а при падении вниз энергия втекает из поля тяготения назад в камень. При ударе о землю производится теплота. Энергия в виде теплоты рассеивается в окружающей среде: в камень, в землю и в воздух.



Рис. 5.11. Пути передачи энергии и импульса для тела, брошенного вверх.

Импульс

При броске человек “перекачивает” отрицательный импульс из земли в камень. Во время взлета в камень втекает положительный импульс из земли через поле тяготения, из-за чего отрицательный импульс камня уменьшается. В точке поворота камня весь отрицательный импульс скомпенсирован. Приток положительного импульса однако не прекращается. Поэтому камень приходит в движение в положительном направлении, т.е. вниз, и его положительный импульс при падении возрастает. При ударе он опять возвращается в землю.

в) Колеблющееся тело

Планер на воздушной подушке на рис. 5.12 совершает движение туда - сюда, так называемые колебания. Тебе наверняка встречались многие другие колебательные движения. Для многих таких процессов пути энергии и импульса вполне аналогичны изображенным на рис. 5.12. Поэтому поточнее рассмотрим планер на рис. 5.12. Сместим его из состояния равновесия налево и отпустим.

Энергия

В момент отпускания обе пружины заряжены энергией: левая из-за того, что сжата, а правая - растянута. Планер приходит в движение направо. При этом получает энергию от обеих пружин, причем у них уменьшается состояние напряжения. Когда планер находится в середине, то обе пружины полностью отдали свою энергию и она целиком перешла в колеблющееся тело. Тело движется дальше направо и делает это все медленнее, т.к. отдает свою энергию назад обеим пружинам. В правой точке поворота

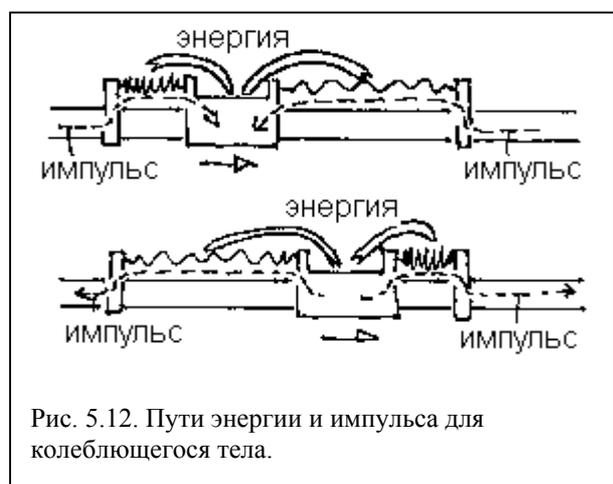


Рис. 5.12. Пути энергии и импульса для колеблющегося тела.

движения вся энергия опять сосредоточена в пружинах и весь процесс возобновляется вновь, но протекает в обратном направлении.

Импульс

В момент отпускания левая пружина находится в состоянии напряжения сжатия, а правая - напряжения растяжения. В левой пружине течет поток импульса направо, а в правой - налево. В итоге из земли в тело втекает два потока импульса. При этом импульс тела возрастает до тех пор, пока оно не достигнет середины области движения. Тогда обе пружины находятся в ненапряженном состоянии и прекращает течь поток импульса. Как только планер пройдет середину пружины вновь приходят в напряженное состояние, причем правая пружина находится в состоянии напряжения сжатия, а левая - растяжения. Импульс теперь течет в противоположном направлении, чем до сих пор: вытекает из тела в обе стороны и втекает в землю.

Задачи

1. Железнодорожный вагон наезжает на пружинный буфер. Какой путь избирают энергия и импульс?
2. Мяч падает на землю, а потом подскакивает вверх. По каким путям идут энергия и импульс?
3. Тело на резиновом шнуре подвешено к потолку так, что может колебаться вверх - вниз. Опиши путь энергии и импульса.