

## § 17. Импульс тела и импульс силы. Закон сохранения импульса



**Ключевые понятия:** импульс тела, импульс силы, закон сохранения импульса.

На этом уроке вы: познакомитесь с понятиями импульс силы и импульс тела, вторым законом Ньютона в импульсном виде и законом сохранения импульса.

Взаимодействие между телами осуществляется через посредника взаимодействий, роль которого выполняет поле. А это означает, что время передачи взаимодействия конечно. Известно, что эффект действия силы зависит от пяти факторов: от модуля силы, от направления силы, от точки приложения силы, от времени ее приложения и от площади воздействия силы. Когда в задачах необходимо учесть время действия силы, то можно записать второй закон Ньютона в другой форме.

Выведем ее. Так как  $\vec{F} = m\vec{a}$ , а ускорение равно  $\vec{a} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{\Delta t}$ , то получим следующее выражение  $\vec{F} = m\frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{\Delta t}$ . Собрав величины, относящиеся к телу, в одну часть уравнения, а к действию на тело извне — в другую, получим

$$\vec{F}\Delta t = m\vec{v} - m\vec{v}_0. \quad (17.1)$$

В этом выражении величина  $\vec{F}\Delta t$  получила название **импульса силы**, а величина, равная произведению массы тела на его скорость, **импульса тела** (рис. 17.1).

Выражение (17.1) получило название второй закон Ньютона в импульсном виде. Он гласит, что **импульс результирующей силы, действующей на тело, равен изменению импульса тела**.

Математически это записывается так:

$$\vec{F}\Delta t = \Delta(m\vec{v}), \quad (17.2)$$

или

$$\vec{F}\Delta t = \Delta\vec{p}. \quad (17.3)$$

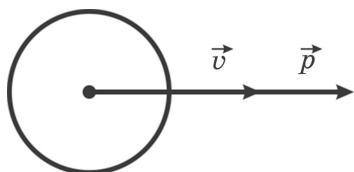


Рис. 17.1

Величина  $\vec{p} = m\vec{v}$  (17.4) получила название **импульс тела**.

Отсюда видно, что **импульс тела изменяется под действием данной силы одинаково у тел любой массы, если только время действия сил одинаково**.

Импульс тела, как и скорость, зависит от выбора системы отсчета. Ускорение же движения тела одинаково во всех инерциальных системах отсчета. Следовательно, сила, а значит, и изменение импульса тела, не зависят от выбора системы отсчета. *В любой инерциальной системе отсчета изменение импульса тела одинаково.* Это важно при решении многих задач на движение тел.

Из второго закона Ньютона в импульсном виде следует, что в случае, когда результирующая всех внешних сил, действующих на тело, равна нулю ( $\vec{F} = 0$ ), то и импульс тела не изменяется, т. е.  $\Delta \vec{p} = 0$ . А это означает, что в отсутствие внешних сил импульс всех тел в системе не изменяется. В замкнутой системе тел справедлив закон сохранения импульса:

**В замкнутой системе тел векторная сумма импульсов всех тел, находящихся в этой системе, с течением времени не изменяется, т. е.**

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 + m_3 \vec{v}_3 + \dots + m_n \vec{v}_n = \text{const.} \quad (17.5)$$

**Замкнутая система** — это совокупность физических тел, у которых взаимодействия с внешними телами отсутствуют.

Второй закон Ньютона в импульсном виде удобно применять в тех случаях, когда описывается движение тел с переменной массой.

Единицей импульса тела в СИ является  $[\vec{p}] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$ .

Единицей импульса силы является ньютон · секунда ( $\text{Н} \cdot \text{с}$ ).

Обращаем ваше внимание на то, что закон сохранения импульса выполняется в следующих случаях:

а) геометрическая сумма внешних сил равна нулю:  $\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = \vec{0}$ .

б) проекция равнодействующей внешних сил на некоторое направление равна нулю, т. е. если  $\sum_{i=1}^n \vec{F}_{ix} = 0$ , то вдоль этого направления импульс системы сохраняется;

в) время взаимодействия мало (выстрел, взрыв, удар и т. п.).

С помощью закона сохранения импульса можно вычислять скорости тел, не зная значений сил, действующих на них. Закон сохранения импульса является всеобщим законом: он применим как к телам обычных размеров, так и к космическим телам и элементарным частицам.

Рассмотрим, каким образом применяют закон сохранения импульса. Во-первых, необходимо помнить, что этот закон справедлив в замкнутых системах. Во-вторых, импульс — это векторная величина и при решении задач необходимо учитывать направление импульса. Поэтому необходимо спроектировать импульсы тел, участвующих во взаимодействии на направление, выбранное за положительное.

Рассмотрим конкретную задачу. На тележку массой  $M$ , движущуюся со скоростью  $v$ , вертикально вниз упал камень массой  $m$  (рис. 17.2). С какой скоростью  $u$  будет двигаться тележка?

Применим закон сохранения импульса к данному случаю. Направим горизонтальную ось  $OX$  в сторону движения тележки. Расставим векторы скоростей тележки до и после падения камня и запишем закон сохранения импульса в проекциях на ось  $OX$ :  $Mv = (M + m)u$ .

$$\text{Отсюда } u = \frac{Mv}{M + m}.$$

Как изменится результат в задаче, если груз будет падать под углом  $60^\circ$  к горизонту, двигаясь навстречу тележке?

Согласно закону сохранения импульса, имеем:

$$Mv - mv_1 \cos 60^\circ = (M + m)u.$$

Следовательно, искомая скорость тележки будет равна:

$$u = \frac{Mv - mv_1 \cos 60^\circ}{M + m}.$$

Если же груз будет падать под углом  $60^\circ$  к горизонту, двигаясь в направлении движения тележки, то скорость движения тележки будет равна:

$$u = \frac{Mv + mv_1 \cos 60^\circ}{M + m}.$$



### Вопросы для самоконтроля

- Изменяется ли импульс тела, когда: а) тело движется равномерно и прямолинейно; б) тело движется равномерно и криволинейно; в) тело движется равноускоренно и прямолинейно; г) тело движется равноускоренно и криволинейно?
- От чего зависит изменение скорости тела? Изменение импульса тела?
- Однаковое ли значение имеет в различных инерциальных системах отсчета импульс тела? Изменение импульса тела?
- Как связан импульс силы с изменением импульса тела?
- Велосипедист медленно останавливается. Как направлен вектор изменения его импульса?
- Тело брошено вертикально вверх со скоростью  $v$ . Каково изменение импульса тела а) за время подъема на максимальную высоту; б) за все время движения?
- Могут ли внутренние силы изменить импульс системы тел? А импульсы тел системы?
- Могут ли осколки взорвавшейся гранаты лететь в одном направлении, если до взрыва граната покоялась?

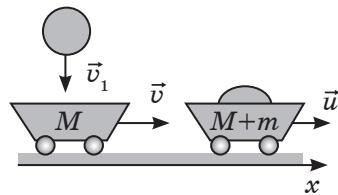


Рис. 17.2



### Объясните

- Почему с тяжелой лодки легче сойти на берег, а с надувной, которая намного легче, можно упасть в воду?
- Из орудия, установленного на равномерно движущейся платформе, произведен выстрел в направлении, противоположном направлению движения. Что произойдет со значением и направлением скорости движения платформы после выстрела?

### Исследуйте

Дан график зависимости  $v(t)$  при прямолинейном движении тела массой 2 кг (рис. 17.3). Исследуйте, как менялся импульс тела. На каком временном промежутке импульс тела не менялся? На каком участке модуль импульса увеличивался, а на каком уменьшался? Найдите изменение импульса за 9 с.

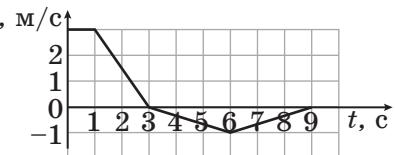


Рис. 17.3

### Анализируйте

- Небольшой катер подтягивают канатом к большому теплоходу. Почему теплоход не движется по направлению к катеру?
- Для чего рулевой во время движения лодки наклоняет тело в такт гребцам?
- Две одинаковые тележки движутся прямолинейно с равными скоростями навстречу друг другу. После удара тележки останавливаются. Не противоречит ли это закону сохранения импульса?
- Как изменится скорость скейтборда, если на него прыгнуть: а) сверху; б) на встречу его движению; в) против движения?

### Решайте

- В первом случае колесо вращается относительно неподвижной оси. Во втором случае колесо катится без проскальзывания по горизонтальной плоскости со скоростью 5 м/с. Каковы импульсы колеса в первом и втором случаях? Масса колеса 2 кг.

(Ответ: 0; 10 кг · м/с)

- С какой горизонтальной скоростью должен лететь снаряд массой 10 кг, чтобы при ударе о покоящееся судно массой 100 т последнее приобрело скорость 0,1 м/с? Удар снаряда о судно неупругий.

(Ответ: 1 км/с)

- Вагон массой 30 т, движущийся со скоростью 5,4 км/ч, автоматически сцепляется с неподвижным вагоном массой 20 т. С какой скоростью стали двигаться вагоны?

(Ответ: 0,9 м/с)

- Снаряд массой 100 кг, летящий горизонтально со скоростью 110 м/с навстречу платформе с песком массой 1,2 т, застревает в песке. С какой скоростью будет двигаться платформа, если ее скорость была 72 км/ч?

(Ответ: 36 км/ч)

5. Тележка массой 120 кг движется со скоростью 8 м/с. С тележки соскакивает человек массой 80 кг под углом  $30^\circ$  к направлению ее движения. Скорость тележки при этом уменьшается до 5 м/с. Какова была скорость человека в момент прыжка относительно земли?

(Ответ: 25 м/с)

■6. Два шара массами 2 кг и 4 кг скользят по гладкой горизонтальной поверхности со скоростями 6 м/с и 4 м/с, соответственно. Направления движения шаров составляют друг с другом угол  $90^\circ$ . Чему равна сумма импульсов этих шаров?

(Ответ: 20 кг · м/с)

\*7. Движущийся шар массой  $m$  столкнулся с неподвижным шаром массой  $3m$ . Если после столкновения шары разлетелись под углом  $90^\circ$  со скоростями  $3v$  (первый шар) и  $v$  (второй шар), то какова была скорость первого шара до столкновения?

(Ответ:  $u = 3\sqrt{2}v$ )

8. Из ружья массой 5 кг произведен выстрел и пуля массой 8 г вылетела со скоростью 600 м/с. Какова скорость отдачи ружья?

(Ответ: 96 см/с)

### Рефлексия

1. Изученный материал привлек меня тем...
2. Материал показался интересным...
3. Материал заставил задуматься...
4. Изученное навело на размышления...
5. Что на вас произвело наибольшее впечатление?
6. Пригодятся ли вам знания, приобретенные при изучении темы, в дальнейшей жизни?
7. Что нового вы узнали на уроке?
8. Что вы считаете нужным запомнить?
9. Над чем еще надо поработать?

## § 18. Реактивное движение



**Ключевые понятия:** реактивное движение, реактивные двигатели.

На этом уроке вы: познакомитесь с реактивным движением.

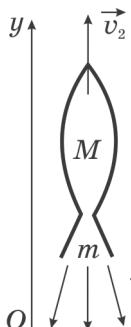


Рис. 18.1

Под **реактивным движением** понимают движение тела, возникающее при отделении от тела его части с некоторой относительно тела скоростью.

При этом появляется так называемая **реактивная сила**, толкающая тело в сторону, противоположную направлению движения отделяющейся от него части тела.

Реактивное движение совершают ракеты (рис. 18.1). Основной частью реактивного двигателя является камера сгорания. В одной из ее стенок имеется отверстие — **реактивное сопло**, предназначенное для выхода газа, образующегося при сгорании топлива. Высокая температура и давление газа определяют большую скорость истечения его из сопла.

До работы двигателя импульс ракеты и горючего был равен нулю, следовательно, и после включения двигателей геометрическая сумма импульсов ракеты и истекающих газов равна нулю:

$$m \vec{v}_r + M \vec{v}_p = 0, \quad (18.1)$$

где  $m$  и  $\vec{v}_r$  — масса и скорость выбрасываемых газов,  $M$  и  $\vec{v}_p$  — масса и скорость ракеты.

В проекции на ось  $Oy$ :  $Mv_p - mv_r = 0$ . Следовательно, скорость ракеты равна  $v_p = \frac{m}{M} v_r$ .

Эта формула справедлива при условии небольшого изменения массы ракеты и для случая, когда топливо сгорает мгновенно.

Реактивная сила тяги, действующая на тело переменной массы (в нашем случае на ракету), всегда пропорциональна массе ежесекундно отделяющихся частиц и их скорости относительно тела переменной массы (см. формулу 18.1):

$$F = \mu u, \quad (18.2)$$

где  $\mu$  — масса топлива, сгоревшего за единицу времени,  $u$  — скорость истечения газов относительно ракеты.

Это уравнение и другие уравнения для движения тел переменной массы впервые выведены профессором И. В. Мещерским в 1897 году.

Главная особенность реактивного движения состоит в том, что ракета может как ускоряться, так и тормозиться, и поворачиваться без

какого-либо взаимодействия с другими телами в отличие от всех других транспортных средств.

По принципу реактивного движения передвигаются осьминоги, кальмары, каракатицы, медузы.

Большая заслуга в развитии теории реактивного движения принадлежит К. Э. Циолковскому. Он разработал теорию полета тела переменной массы (ракеты) в однородном поле тяготения и рассчитал запасы топлива, необходимые для преодоления силы земного притяжения, основы теории жидкостного реактивного двигателя, а также элементы его конструкции, теорию многоступенчатых ракет, причем предложил два варианта: параллельный (несколько реактивных двигателей работают одновременно) и последовательный (реактивные двигатели работают друг за другом). К. Э. Циолковский *строго научно* доказал возможность полета в космос с помощью ракет с жидкостным реактивным двигателем, предложил специальные траектории посадки космических аппаратов на Землю, выдвинул идею создания межпланетных орбитальных станций, предложил идею автоматического управления ракетой.

Труды К. Э. Циолковского явились теоретической базой для развития современной ракетной техники.

Огромный вклад в развитии космонавтики внес русский ученый И. В. Мещерский, который разработал теоретические основы динамики точки переменной массы и рассмотрел задачи о восходящем движении ракеты и вертикальном движении аэростата. Он исследовал движение тела переменной массы под действием центральной силы, заложив основы небесной механики тел переменной массы. Он исследовал также и некоторые проблемы движения комет. Именно опираясь на работы Мещерского, К. Э. Циолковский обосновал возможность космических полетов.



К. Э. Циолковский  
(1857—1935)



#### Вопросы для самоконтроля

1. Какое движение называется *реактивным*?
2. Могут ли двигаться ракеты в безвоздушном пространстве? Как влияет на движение ракет воздушная среда?
3. Каким образом можно изменить направление движения космического корабля после выведения его на орбиту?
4. Почему космические ракеты делают многоступенчатыми?



## Творческая мастерская

### Наблюдайте

Пронаблюдайте, как изменяется положение лодки, когда человек идет по ней от носа к корме.

### Экспериментируйте

1. Надуйте воздушный шар и, не завязывая отверстие, выпустите его из рук. Что при этом произойдет и почему?
2. Бросьте камень вперед, стоя на земле и стоя на скейтборде. Сделайте вывод о результатах эксперимента.

### Объясните



Рис. 18.2

1. От чего зависит скорость ракеты в безвоздушном пространстве?

2. Материальная точка равномерно движется по окружности. Как направлен импульс точки в некоторый момент времени?

3. Герой книги Э. Распэ барон Мюнхгаузен рассказывает: "Схватив себя за косичку, я изо всех сил дернул вверх и без большого труда вытащил из болота и себя и своего коня, которого крепко сжал обеими ногами, как щипцами". Объясните, почему это невозможно.

4. Объясните, как движется каракатица (см. рис. 18.2).

### Анализируйте

1. Как движутся тела после абсолютно неупругого удара?
2. Пластилиновый шар массой  $m$  ударился о другой же неподвижный шар, после чего суммарный импульс шариков стал равен  $6 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$ . Чему был равен импульс первого шара до столкновения?

### Решайте

1. Пушка массой  $1 \text{ т}$  выстреливает ядро массой  $20 \text{ кг}$  со скоростью  $400 \text{ м/с}$ . Какова скорость отката пушки, если выстрел произведен горизонтально (см. рис. 18.3).

(Ответ:  $8 \text{ м/с}$ )

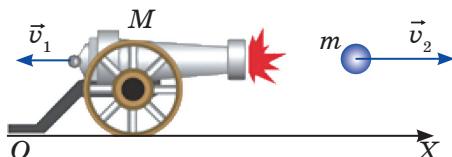


Рис. 18.3

2. Пушка массой 800 кг выстреливает ядро массой 10 кг с начальной скоростью 200 м/с относительно Земли под углом  $60^\circ$  к горизонту. Какова скорость отката пушки? Трением можно пренебречь.

(Ответ: 1,25 м/с)

■3. Два рыбака ловят рыбу в озере, сидя в неподвижной лодке. Куда и на сколько сместится лодка, если рыбаки поменяются местами? Масса лодки 280 кг, масса первого рыбака 70 кг, масса второго 105 кг, расстояние между рыбаками 5 м. Сопротивлением воды можно пренебречь.

(Ответ: 38 см)

■4. Буксир массой  $m$ , движущийся по инерции в стоячей воде, сталкивается с баржей массой  $M$  и движет ее впереди себя. Каково отношение  $M/m$ , если скорость буксира после столкновения уменьшилась в 4 раза.

(Ответ: 3)

■5. Ракета, имеющая вместе с зарядом массу 250 г, взлетает вертикально вверх и достигает высоты 125 м. Найдите скорость истечения газов из ракеты, считая, что сгорание происходит мгновенно. Масса заряда 50 г.

(Ответ: 200 м/с)

\*6. От двухступенчатой ракеты массой 1200 кг в момент достижения скорости 180 м/с отделилась ее вторая ступень массой 400 кг, скорость которой при этом увеличилась до 200 м/с. Найти, с какой скоростью стала двигаться первая ступень ракеты, продолжившая полет в том же направлении. Скорости указаны относительно Земли.

(Ответ: 170 м/с)

## Рефлексия

- Изученный материал привлек меня тем...
- Материал показался интересным...
- Материал заставил задуматься...
- Изученное навело на размышления...
- Что на вас произвело наибольшее впечатление?
- Пригодятся ли вам знания, приобретенные при изучении темы, в дальнейшей жизни?
- Что нового вы узнали на уроке?
- Что вы считаете нужным запомнить?
- Над чем еще надо поработать?

## § 19. Работа. Энергия. Теорема о кинетической энергии. Мощность.



**Ключевые понятия:** механическая работа, мощность, кинетическая энергия.

**На этом уроке вы:** познакомитесь с понятиями *работа*, *мощность*, *энергия* и с теоремой о кинетической энергии.

Тела, находящиеся вокруг нас, располагаются в пространстве определенным образом. При этом состояние тел можно охарактеризовать определенными (неизменными для этого состояния) величинами: координатами ( $x, y, z$ ), массой ( $m$ ), скоростью ( $v$ ).

При переходе из одного состояния в другое эти величины, кроме массы тела, изменяются, и в другом состоянии они принимают другие значения, неизменные для этого состояния.

Если параметры состояния изменяются, то говорят, что происходит некоторый процесс. То есть под процессом надо понимать переход системы из одного состояния в другое.

Для характеристики конкретного состояния механической системы вводят особую величину, которую назвали механическая энергия. Ее принято обозначать символами  $W$  или  $E$ . Понятно, что энергия тела зависит от его массы, расположения в пространстве и скорости, т. е.  $W(m, v, x)$ . Механическую энергию удобно представить в виде суммы двух видов энергии, одна из которых определяется массой и скоростью тела (ее назвали кинетической энергией), а другая определяется массой тела и его расположением в пространстве (ее назвали потенциальной энергией)

$$W(m, v, x) = W(m, v) + W(m, x).$$

Совершенно ясно, что при переходе тела из одного состояния в другое изменяется величина механической энергии. Сам процесс перехода тела из одного механического состояния в другое характеризуется особой величиной, которую называют *механической работой*. То есть величину работы можно выразить через изменение механической энергии:

$$A = W_2 - W_1 = \Delta W. \quad (19.1)$$

Именно поэтому под энергией понимают физическую величину, характеризующую способность тела или системы тел совершать работу.

Попробуем разобраться с физическим смыслом работы. Если тело под действием силы переместилось на некоторое расстояние, то говорят, что сила совершила работу. И величина работы будет тем больше, чем больше величина силы и величина перемещения, совершенного телом в направлении действия силы. Поэтому работу определяют по

произведению силы на перемещение, совершенное телом в направлении действия силы, т. е.

$$A = F \cdot s. \quad (19.2)$$

Когда перемещение совершается в направлении, перпендикулярном направлению действия силы, то сила не влияет на перемещение тела в этом направлении. Поэтому говорят, что в этом случае сила не совершает работу. Например, при перемещении бруска по горизонтальному столу сила тяжести работу не совершает. Значит, величина работы зависит не только от величины силы и величины перемещения, но и от угла между вектором силы и вектором перемещения.

Найдем выражение для работы силы в общем случае, когда перемещение образует некоторый угол с направлением силы (рис. 19.1).

Для этого разложим силу  $F$  на две составляющие:  $F_1 = F \cos \alpha$ , направленную вдоль перемещения, и  $F_2 = F \sin \alpha$ , направленную перпендикулярно перемещению. Работа силы  $F_2$  равна нулю, тогда работа силы  $F$  будет равна работе силы  $F_1$  и равна

$$A = F \cdot s \cdot \cos \alpha. \quad (19.3)$$

Именно по этой формуле рассчитывают работу любой силы.

За единицу работы принимают такую работу, при которой под действием единичной силы тело перемещается на единичное расстояние. В системе СИ единицей измерения работы является джоуль.

$$1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot 1 \text{ м.}$$

Установим связь между работой и энергией. Пусть под действием силы  $F$  тело массой  $m$  изменило свою скорость от  $v_1$  до  $v_2$ , переместившись при этом на расстояние  $s$  (см. рис. 19.2).

Согласно второму закону Ньютона, тело под действием силы получает ускорение:  $a = \frac{F}{m}$ .

Значение ускорения подставим в формулу  $2as = v_2^2 - v_1^2$ . Тогда, получим:  $2 \frac{F}{m} s = v_2^2 - v_1^2$ .

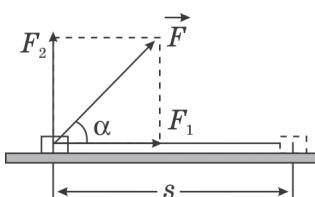


Рис. 19.1

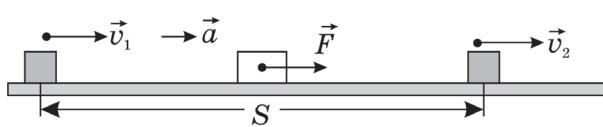


Рис. 19.2

Отсюда

$$Fs = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}. \quad (19.4)$$

Видно, что в левой стороне равенства находится некая физическая величина, характеризующая процесс перехода из первого состояния во второе. Эта величина и есть работа силы:

$$A = Fs. \quad (19.5)$$

В правой части равенства находится разность двух величин, каждая из которых характеризует начальное и конечное состояние тел. Эта величина определяется массой и скоростью тела в начальном и конечном состояниях. Ее назвали *кинетической энергией тела*, т. е. кинетическую энергию тела можно рассчитать по формуле

$$W = \frac{mv^2}{2}. \quad (19.6)$$

С учетом (19.6) и (19.5) формула (19.4) перепишется так:

$$A = W_{k_2} - W_{k_1},$$

что является математическим выражением теоремы о кинетической энергии:

**Работа результирующей силы всегда равна изменению кинетической энергии тела или системы тел в конечном и начальном состояниях.**

Кинетическая энергия является относительной величиной, так как скорость тела — относительная величина, в различных системах отсчета она различна.

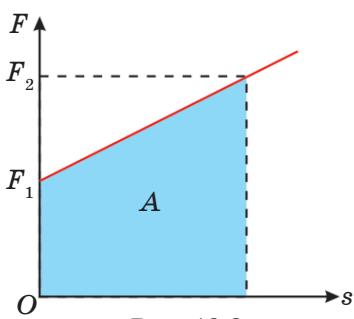


Рис. 19.3

Очень часто во время перемещения величина силы меняется. В этом случае работу удобнее рассчитывать, используя график зависимости силы с перемещением. Работа силы в этом случае равна площади фигуры, ограниченной графиком силы, осью абсцисс и перпендикулярами, опущенными на ось абсцисс. Например, по рисунку 19.3 работа равна площади трапеции, т. е.  $A = \frac{F_1 + F_2}{2} s$ .

Когда выполняют какую-либо работу, важно знать время, за которое она была выполнена. Так можно определить производительность устройства, которое совершает работу.

**Величина, характеризующая быстроту выполнения работы, называется мощностью. То есть под мощностью понимают скорость выполнения работы.**

$$N = \frac{A}{t}. \quad (19.7)$$

За единицу мощности принимают такую мощность, при которой за единицу времени совершается единичная работа. В системе СИ единицей измерения мощности служит 1 ватт.  $1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/с}$ .

Человеком изобретены различные устройства, способные выполнять работу. Мощность этих устройств колеблется от нескольких нВт до несколько МВт.

Для характеристики мощности двигателей машин используют особую единицу: 1 лошадиная сила (1 л. с.). 1 л. с. = 735 Вт. Средняя мощность лошади равна 0,5 л. с., средняя мощность человека при выполнении длительной физической работы равна 0,1 л. с., мощность, развиваемая спринтером при старте на короткие дистанции или штангистом при подъеме штанги составляет 2—8 л. с.

В случае, когда машина под действием силы тяги движется равномерно, то мощность, развиваемая при этом двигателем машины, можно рассчитать следующим образом

$$N = \frac{Fs}{t} = Fv. \quad (19.8)$$

Анализ этого выражения говорит, что при неизменной мощности двигателя автомобиля увеличение силы тяги приводит к уменьшению скорости.



### Вопросы для самоконтроля

1. Что понимают под процессом?
2. Что понимают под энергией?
3. Что понимают под работой?
4. По какой формуле можно рассчитать работу, которая совершается некоторой силой?
5. В каких случаях сила, действующая на тело, не совершает работу?
6. Какая энергия называется *кинетической энергией*?
7. Кинетическая энергия — это относительная или абсолютная величина? Почему?
8. Сформулируйте теорему о кинетической энергии.
9. Как рассчитать работу переменной силы?
10. Что понимают под мощностью?



## Творческая мастерская

### Наблюдайте

Погрузите резиновый мяч в воду и отпустите его. Что вы будете наблюдать? Объясните поведение мяча с точки зрения совершения работы разными силами.

### Экспериментируйте

Бросьте камень вперед, стоя на земле и стоя на скейтборде. В каком случае будет совершена работа?

### Объясните

1. На тело действует сила. Тело перемещается. Но работу эта сила не совершает. Возможно ли это?

2. Объясните, почему человек, поднимаясь по вертикальному канату, прикрепленному к потолку, совершает работу меньшую, чем поднимаясь по канату, перекинутому через блок, на конце которого привязан груз, равный весу человека. Во сколько раз отличаются эти работы?

3. Если автомобиль поднимается в гору при неизменной мощности двигателя, то он уменьшает скорость движения. Почему?

### Анализируйте

1. Изменится ли величина работы, совершаемой двигателем эскалатора, если пассажир, стоящий на лестнице эскалатора, двигающейся вверх, будет подниматься по ней с постоянной скоростью?

2. Для подъема судов на более высокий уровень насосы перекачивают воду из нижней ступени канала в камеру шлюза. Одинаковую ли работу совершают насосы, когда в камере находится большой теплоход или маленькая лодка?

### Решайте

1. Прямой тонкий стержень длиной 2 м и массой 1,2 кг лежит на горизонтальной поверхности. Вычислите работу, которую надо совершить, чтобы: а) поставить стержень вертикально; б) поднять его на высоту 2 м, сохраняя горизонтальное положение стержня.

(Ответы: а) 12 Дж; б) 24 Дж)

2. Сани тянут по горизонтальной поверхности с помощью веревки, которая образует с поверхностью угол  $30^\circ$ . Сила натяжения веревки 20 Н. Определите работу силы натяжения при перемещении саней на расстояние 5 м.

(Ответы: 86,5 Дж)

■3. Лифт массой 1,5 т начинает подниматься с ускорением  $1 \text{ м/с}^2$ . Определите работу, которую совершает двигатель лифта в течение первых 2 с подъема.

(Ответы: 33 Дж)

■4. Диск радиусом 1 м вращается. К боковой поверхности диска прижали тормозную колодку силой 100 Н. Диск остановился, повернувшись на 2,5 оборота. Найдите работу силы трения, если коэффициент трения 0,2.

(Ответы: 314 Дж)

- \*5. На горизонтальной плоскости лежит брускок массой 2 кг. К брускку прикреплена пружина жесткостью 100 Н/м. Вначале пружина не деформирована. Затем к свободному концу пружины приложили силу  $F$  (рис. 19.4). Какую работу совершил сила к моменту, когда брускок начнет скользить? Сила направлена под углом  $30^\circ$  к горизонту. Коэффициент трения бруска о плоскость 0,5.

(Ответы: 0,4 Дж)

- \*6. Какую работу необходимо совершить, чтобы волоком перетащить цепочку массой  $m$  и длиной  $l$  с одной полуплоскости на другую? Коэффициент трения цепочки о первую полуплоскость равен  $\mu_1$ , о вторую —  $\mu_2$ . Цепочка располагалась вначале так, как показано на рисунке 19.5.

(Ответы:  $A = \frac{1}{2}mgl(\mu_1 + \mu_2)$ )

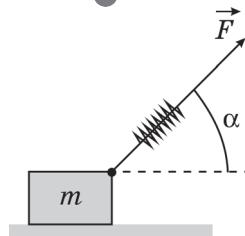


Рис. 19.4

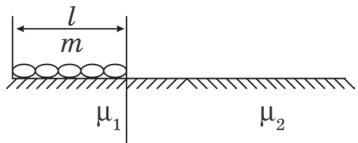


Рис. 19.5

### Рефлексия

- Изученный материал привлек меня тем...
- Материал показался интересным ...
- Материал заставил задуматься...
- Изученное навело на размышления...
- Что на вас произвело наибольшее впечатление?
- Пригодятся ли вам знания, приобретенные при изучении темы, в дальнейшей жизни?
- Что нового вы узнали на уроке?
- Что вы считаете нужным запомнить?
- Над чем еще надо поработать?

## § 20. Потенциальная энергия. Закон сохранения и превращения энергии



**Ключевые понятия:** потенциальная энергия, закон сохранения энергии.

На этом уроке вы: познакомитесь с потенциальной энергией в однородном поле силы тяжести и в поле упругих сил; научитесь объяснять закон сохранения энергии.

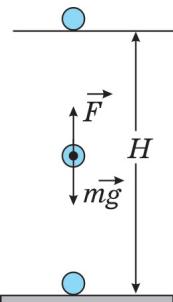


Рис. 20.1

**Потенциальная энергия в однородном поле силы тяжести.** На любое тело, находящееся на Земле, действует сила тяжести. Чтобы поднять тело на некоторую высоту  $H$ , необходимо совершить работу. Эту работу будет совершать сила  $F$  (рис. 20.1).

$$A = FH \cos\alpha.$$

Работа этой силы положительна, так как направление векторов силы и перемещения совпадают, а  $\cos\alpha = 1$ . Расположение тела изменилось, значит, изменилось состояние тела. У тела изменилась энергия. За счет работы внешней силы энергия тела увеличилась. Тело, падая с этой высоты, само может совершить работу. Примером может служить забивание свай молотом, или забивание гвоздя молотком.

Пусть тело падает с высоты  $h_1$  до  $h_2$  (рис. 20.2). Величина работы, совершаемой силой тяжести, действующей на тело, в этом случае рассчитывается по формуле:

$$A = mgH = mg(h_1 - h_2) = mg\Delta h. \quad (20.1)$$

Удобнее записать эту формулу в форме:

$$A = -mg(h_2 - h_1) = -(mgh_2 - mgh_1). \quad (20.2)$$

Выражения  $W_{p_1} = mgh_1$  и  $W_{p_2} = mgh_2$  характеризуют начальное и конечное состояния тела. Величина, определяемая формулой

$$W_p = mgh, \quad (20.3)$$

получила название *потенциальной энергии в однородном поле силы тяжести*. Видно, что работа, совершаемая силой тяжести, равна убыли потенциальной энергии тела.

$$A = -(W_{p_2} - W_{p_1}) = -\Delta W_p. \quad (20.4)$$

При расчете потенциальной энергии важно правильно выбрать нулевой уровень энергии. Обычно за ноль потенциальной энергии в однородном поле силы тяжести принимают уровень моря. Поэтому любое тело, поднятое над землей, обладает потенциальной энергией.

При падении потенциальная энергия тела уменьшается, а кинетическая энергия возрастает, так как растет скорость тела.

*Работа силы тяжести не зависит от формы траектории движения тела в гравитационном поле, а зависит только от начального и конечного его положений в пространстве.* Действительно, при подъеме тела массой  $m$  на горку произвольного профиля работа силы тяжести будет равна

$$A_{\text{т}} = -\Delta W_{\text{п}} = -mg\Delta h.$$

Разобьем профиль горки на малые ступеньки (вертикальные  $\Delta h_i$  и горизонтальные  $\Delta x_i$  перемещения, рис. 20.3). Сила тяжести будет совершать работу только на вертикальных участках  $\Delta h_i$  (на участках  $\Delta x_i$  сила тяжести будет перпендикулярна перемещению, поэтому она работу не совершает). Отсюда  $\sum_{i=1}^{\infty} mgh_i = mg \sum_{i=1}^{\infty} (h_1 - h_2)$ , что даст работу силы тяжести  $A = mg(h_1 - h_2)$ .

При подъеме тела  $m$  на горку другого профиля, но с тем же перепадом высот, работа силы тяжести будет такой же, т. е. она не зависит от формы траектории.

**Потенциальная энергия деформированного тела.** Если пружину растянуть, то, сжимаясь, она сообщит телу скорость. Значит, деформированное тело тоже обладает энергией. Определим формулу, по которой можно рассчитать величину этой энергии. Для этого определим работу, которую совершает растянутая пружина при сжатии. Работу силы упругости удобнее рассчитать графически. Из рисунка 20.4 следует, что работа силы упругости равна площади заштрихованной фигуры:

$$A = \frac{F_1 + F_2}{2} (x_2 - x_1) \text{ или } A = -\frac{k(x_2 + x_1)}{2} (x_2 - x_1) = -\left(\frac{kx_2^2}{2} - \frac{kx_1^2}{2}\right). \quad (20.5)$$

Выражения  $\frac{kx_2^2}{2}$  и  $\frac{kx_1^2}{2}$ , характеризующие конечное и начальное состояния тела, получили названия потенциальной энергии упруго деформированного тела в этих состояниях. Следовательно, потенциальную энергию упруго деформированного тела рассчитывают по формуле:

$$W_p = \frac{kx^2}{2}. \quad (20.6)$$

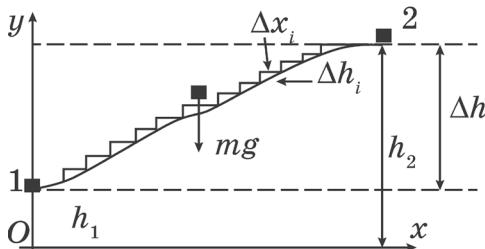


Рис. 20.3

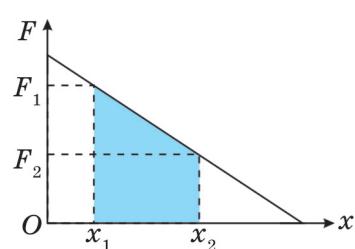


Рис. 20.4

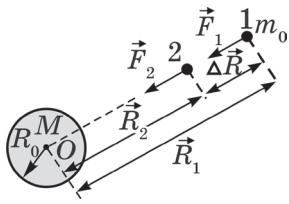


Рис. 20.5

Как видно из формул (20.4) и (20.5), работа сил тяжести и упругости определяется только начальной и конечной координатой, не зависит от формы траектории, а работа по замкнутой траектории равна нулю. Работа в поле других сил равна убыли потенциальной энергии деформированного тела:

$$A = -(W_{p_2} - W_{p_1}). \quad (20.7)$$

**Потенциальная энергия в неоднородном поле силы тяжести.** Для неоднородного гравитационного поля вычислить работу силы тяжести несколько сложнее. Попробуем это сделать.

Пусть тело  $m_0$  находится на расстоянии  $R_1$  от центра Земли (рис. 20.5). Под действием силы  $|\vec{F}_1| = G \frac{Mm_0}{R_1^2}$  оно переместится в положение 2, в котором на него будет действовать сила  $|\vec{F}_2| = G \frac{Mm_0}{R_2^2}$ .

Учитывая, что  $\Delta R$  много меньше  $R_1$  и  $R_2$ , вычислим работу силы тяжести:

$$\Delta A = F_{\text{cp}} \Delta R.$$

Среднее арифметическое сил  $|\vec{F}_1| = G \frac{Mm_0}{R_1^2}$  и  $|\vec{F}_2| = G \frac{Mm_0}{R_2^2}$  брать нельзя,

так как сила меняется не по линейному закону. Поступим следующим образом: так как  $\Delta R$  много меньше  $R_1$  и  $R_2$ , то  $R_1 \approx R_2$  и  $R_{\text{cp}}^2 \equiv R_1 R_2$  тем точнее, чем меньше  $\Delta R$  (докажите это, используя знания по математике). Тогда:

$$\Delta A = G \frac{Mm_0}{R_{\text{cp}}^2} \cdot \Delta R \text{ или } \Delta A = G \frac{Mm_0}{R_1 R_2} \cdot (R_2 - R_1) = \frac{GMm_0}{R_1} - \frac{GMm_0}{R_2}.$$

Работа силы тяжести получилась равной разности двух членов, каждый из которых есть ни что иное, как потенциальная энергия в положениях 1 и 2 (рис. 20.5).

$$\Delta A = G \frac{GMm_0}{R_1} - \frac{GMm_0}{R_2} \text{ или } \Delta A = -\Delta W_{\text{п}}. \quad (20.8)$$

При  $R_1 \rightarrow \infty$   $W_{\text{п}_1} = G \frac{Mm_0}{R_1} \rightarrow 0$ , поскольку на бесконечности взаимодействие между  $M$  и  $m_0$  стремится к нулю. Тогда в положении 2:

$$W_{\text{п}_2} = -G \frac{Mm_0}{R_2}. \quad (20.9)$$

Потенциальная энергия отрицательна. Так и должно быть, так как тело  $m_0$  захвачено гравитационным полем Земли и находится в “потенциальной яме”.

На рисунке 20.6 показана зависимость потенциала гравитационного поля Земли от расстояния до центра Земли. Отсюда видно, что гравитационный потенциал Земли не меняется от ее центра до поверхности, затем уменьшается по мере удаления от Земли.

Выражение (20.8) переходит в (20.1) для однородного гравитационного поля. Действительно,  $\Delta A = G \frac{Mm_0}{R^2} \Delta h$ .

Так как  $g = G \frac{M}{R^2}$ , то  $\Delta A = m_0 g \Delta h$ .

Во всех случаях, рассмотренных нами выше, работа сил не зависела от формы траектории и определялась лишь начальными и конечными положениями тела. Работа таких сил по замкнутой траектории равна нулю. Такого рода силы называются **консервативными**.

Кроме силы тяжести, силы упругости, к консервативным силам относится сила кулоновского взаимодействия, а сила трения к ним не относится. Если в системе действуют только консервативные силы, то механическая энергия системы сохраняется.

**Закон сохранения и превращения механической энергии.** В замкнутой системе справедлив закон сохранения и превращения энергии, который гласит: **Механическая энергия в замкнутой системе тел может переходить от одного тела к другому, из одного вида в другой, а полная механическая энергия в замкнутой системе остается неизменной.** В замкнутой системе, в которой действуют консервативные силы, **механическая энергия системы сохраняется**.

$$W_{k_1} + W_{n_1} = W_{k_2} + W_{n_2}. \quad (20.10)$$

Закон сохранения и превращения энергии легко доказать, рассматривая процесс падения тела. Используя рисунок 20.7, теорему о кинетической энергии и формулу работы силы тяжести, предлагаем вам самостоятельно доказать, что формула (20.10) справедлива.

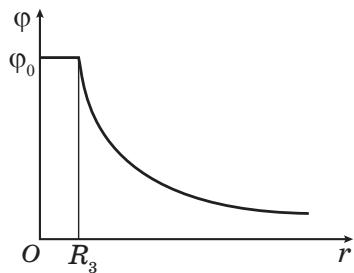


Рис. 20.6

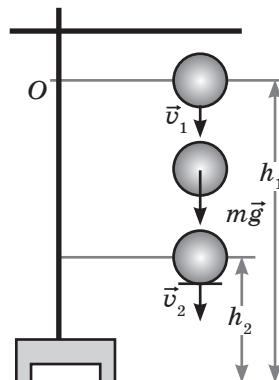


Рис. 20.7



### Вопросы для самоконтроля

1. Какая энергия называется *потенциальной*? Какие параметры определяют потенциальную энергию тела?
2. Как выбирается нулевой уровень потенциальной энергии?
3. Является ли потенциальная энергия относительной величиной? Почему?
4. Одна и та же пружина сначала была сжата на 5 см, а затем растянута на 5 см. В каком случае она обладает большей энергией? В каком случае энергия пружины — положительна, а в каком — отрицательна?
5. Докажите закон сохранения и превращения энергии.

## Примеры решения задач

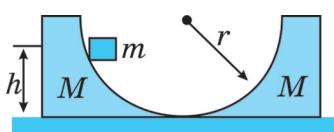


Рис. 20.8

максимальную высоту поднимется шайба по правому клину? Трением пренебречь.

*Решение.* Система клины — шайба замкнута. Поэтому можно воспользоваться законом сохранения импульса и законом сохранения и превращения энергии.

Сначала рассмотрим процесс соскальзывания шайбы с левого клина. Выберем два момента: первый — начало соскальзывания шайбы, а второй — когда шайба соскользнет с левого клина. В горизонтальном направлении справедлив закон сохранения импульса. В начальный момент и клин, и шайба покоялись, следовательно, их общий импульс был равен нулю. В момент, когда шайба соскользнула с клина, у нее был импульс  $mv_1$ , а у клина —  $Mu_1$ . Тогда получим:  $0 = mv_1 - Mu_1$ . Отсюда

$$u_1 = \frac{mv_1}{M}, \quad (2)$$

где  $u_1$  — скорость, которую приобрел клин к тому моменту, когда с него соскользнула шайба.

Применим теперь закон сохранения и превращения энергии для процесса спуска шайбы с левого клина:

$$mgh = \frac{mv_1^2}{2} + \frac{Mu_1^2}{2}. \quad (3)$$

С учетом формулы (2) формула (3) перепишется так:

$$mgh = \frac{mv_1^2}{2} + \frac{m^2 u_1^2}{2M} \text{ или } 2gh = v_1^2 \left(1 + \frac{m}{M}\right). \quad (4)$$

После того, как шайба соскользнет с левого клина, она, продолжая движение со скоростью  $v_1$ , начнет подниматься на правый клин, заставляя его двигаться. В тот момент, когда шайба перестанет подниматься по клину, их скорости станут одинаковыми и равными  $u_2$  (именно в этот момент высота подъема шайбы будет максимальной). Тогда, согласно закону сохранения импульса, получим:

$$mv_1 = (M + m)u_2. \quad (5)$$

А по закону сохранения и превращения энергии будем иметь:

$$\frac{mv_1^2}{2} = mgh_m + \frac{(M + m)u_2^2}{2}. \quad (6)$$

Из формулы (5) найдем скорость, с которой будут двигаться правый клин с шайбой в тот момент, когда шайба поднимется на максимальную высоту:  $u_2 = \frac{mv_1}{(M+m)}$ . Подставим это значение скорости в формулу (6) и получим:

$$\frac{mv_1^2}{2} = mgh_m + \frac{m^2 v_1^2}{2(M+m)}. \quad (7)$$

Из формулы (4) имеем, что

$$v_1^2 = \frac{m \cdot 2gh}{(M+m)}. \quad (8)$$

Тогда, подставив это значение в формулу (7), найдем максимальную высоту подъема шайбы на правый клин:  $h_m = \frac{Mv_1^2}{2g(M+m)}$ .

С учетом формулы (8) получим:  $h_m = \frac{2ghmM}{2g(M+m)^2}$ , т. е.  $h_m = h \frac{mM}{(M+m)^2}$ .

Подставив численные значения, получим:  $h_m = \frac{0,75 \text{ м} \cdot 0,5 \text{ кг} \cdot 2 \text{ кг}}{6,25 \text{ кг}^2} = 0,12 \text{ м}$ .

*Ответ:*  $h_m = 0,12 \text{ м}$ .

2. Груз массы  $M$  на нити длиной  $R$  падает из горизонтального положения вниз (рис. 20.9, а). В нижней точке груз неупруго сталкивается с телом массой  $m$ . При какой массе груза натяжение нити после удара уменьшится?

*Решение.* Определим максимальную силу натяжения нити до столкновения. Это наблюдается в момент перед самим столкновением. В этот момент на груз, движущийся со скоростью

$$v = \sqrt{2gR}, \quad (9)$$

действуют сила тяжести и сила натяжения  $F_{H_1}$  (рис. 20.9, б). Согласно второму закону Ньютона,

$$F_{H_1} - Mg = M \frac{v^2}{R}. \quad (10)$$

С учетом (9) получим  $F_{H_1} = 3Mg$ .

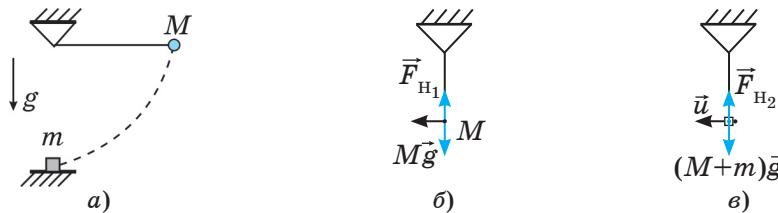


Рис. 20.9

Рассмотрим процесс неупругого столкновения тел. Согласно закону сохранения импульса, имеем:  $Mv = (M + m)u$ . Отсюда:

$$u = \frac{M\sqrt{2gR}}{(M + m)}. \quad (11)$$

Сразу после столкновения (рис. 20.8, *в*) второй закон Ньютона будет выглядеть так:

$$F_{H_2} - (M + m)g = (M + m)\frac{u^2}{R}. \quad (12)$$

Из (11) с учетом (10) получим

$$F_{H_2} = \frac{(M + m)^2 + 2M^2}{M + m} g = \frac{3M^2 + 2Mm + m^2}{M + m} g.$$

Если  $F_{H_1} \geq F_{H_2}$ , то сила натяжения нити уменьшается. Значит,  $3Mg \geq \frac{3M^2 + 2Mm + m^2}{M + m} g$ . Отсюда  $M \geq m$ . То есть в случае, когда  $M = m$ , то сила натяжения не изменится, а если  $M > m$ , то сила натяжения уменьшается.

**3.** Голова кобры поднимается вертикально вверх со скоростью  $v$ . Масса кобры  $M$ , а ее длина  $l$ . Определите силу, с которой кобра давит на землю во время своего движения.

*Решение.* Применим к движению кобры второй закон Ньютона в импульсном виде:  $\vec{F}\Delta t = \Delta\vec{p}$ . Это необходимо сделать, так как в процессе подъема кобры увеличивается ее масса, находящаяся в воздухе. Считая, что толщина змеи по всей длине одинаковая, получим, что линейная плотность массы тоже постоянная, т. е.  $\gamma = \frac{\Delta m}{\Delta l} = \frac{M}{L}$ , где  $\Delta m$  — масса малого участка змеи длиной  $\Delta l$ , поднимаемого силой  $F$ . Тогда импульс, сообщаемый этому участку, будет равен  $p = \Delta mv = \frac{M\Delta l}{L}v$ .

А сила, поднимающая этот участок, будет равна  $F = \frac{M\Delta l}{L\Delta t}v = \frac{M}{L}v^2$ .

Сила же давления змеи на землю равна сумме силы тяжести и данной силы, т. е.  $N = Mg + \frac{M}{L}v^2$ .

*Ответ:*  $N = Mg + \frac{M}{L}v^2$ .



## Творческая мастерская

### Экспериментируйте

1. Положите две игральные шашки на стекло. Толкните одну из них так, чтобы она ударила другую. Почему при этом первая шашка иногда останавливается, а другая приобретает скорость?

2. Бросьте мяч без начальной скорости на пол. Сравните высоту, с которой упал мяч, с высотой, на которую он отскочил? Объясните полученный результат.

### Объясните

1. Почему, спускаясь на лодке по реке, плывут посередине реки, а поднимаясь, стараются держаться берега?

2. На втором этаже потенциальная энергия вязанки дров больше, чем на первом. Будет ли энергия, полученная при сгорании дров со второго этажа, больше, чем та, которую получат от вязанки с первого этажа?

3. Камень и теннисный мяч ударяют палкой. Почему мяч при прочих равных условиях летит дальше камня?

### Анализируйте

1. Рыболовы часто используют удилища с тонкими упругими концами. Зачем они это делают?

2. Резиновые баллоны автомашины, а также рессоры, вагонные буфера ослабляют толчки и удары. Почему?

### Решайте

■1. Цепочка массой 100 г и длиной 0,8 м лежит так, что один конец ее свешивается с края стола. Цепочка начинает соскальзывать, когда свешивающаяся часть составляет  $1/4$  ее длины. Найдите импульс цепочки в тот момент, когда она полностью соскользнет со стола.

(Ответы: 0,46 кг · м/с)

\*2. Лыжник массой 70 кг спускается с горы, длина которой 800 м, а угол наклона к горизонту  $30^\circ$ . На половине пути он стреляет из ракетницы вертикально вверх. Ракета массой 100 г вылетает из ракетницы со скоростью 100 м/с. Определите скорость лыжника в конце спуска. Начальную скорость лыжника считать равной нулю. Коэффициент трения лыж о снег 0,1.

(Ответы: 80,5 м/с)

3. Две пружины одинаковой длины, жесткости которых  $10 \text{ Н/см}$  и  $20 \text{ Н/см}$ , соответственно, соединены между собой параллельно. Найдите работу, которую надо совершить, чтобы растянуть пружины на 2 см.

(Ответы: 0,6 Дж)

\*4. Доска длиной  $L = 32 \text{ см}$  движется с постоянной скоростью по гладкой горизонтальной поверхности (рис. 20.10). Какую минимальную скорость  $v_0$  нужно сообщить доске, чтобы она смогла

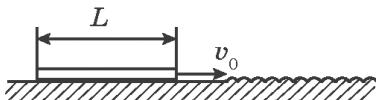


Рис. 20.10

полностью въехать на длинный участок шероховатой поверхности? Коэффициент трения между доской и поверхностью на шероховатом участке  $\mu = 0,2$ .

(Ответ: 8,8 м/с)

\*5. Длинная тонкая тяжелая нить длиной  $l = 80$  см и массой  $m = 2$  кг лежит на шероховатом столе так, что со стола свешивается половина ее длины. Какую минимальную работу нужно совершить, чтобы втащить нить на стол, прикладывая к ней горизонтальную силу? Коэффициент трения между столом и нитью  $\mu = 0,3$ , на краю стола закреплен маленький ролик, по которому нить скользит без трения.

(Ответ: 3,8 Дж)

6. Трактор массой 10 т, развивающий мощность 232 кВт, поднимается в гору со скоростью 3 м/с. Определите коэффициент трения, если угол наклона горы  $30^\circ$ .

(Ответ: 0,31 )

7. Тело массой 1 кг падает с высоты 20 м без начальной скорости. Какую мощность будут развивать силы тяжести в момент перед ударом тела о землю.

(Ответ: 200 Дж)

8. Определите скорость, которую необходимо сообщить телу, чтобы оно могло преодолеть силу притяжения Земли (вторую космическую скорость).

(Ответ: 11,3 км/с)



## Рефлексия

1. Изученный материал привлек меня тем...
2. Материал показался интересным...
3. Материал заставил задуматься...
4. Изученное навело на размышления...
5. Что на вас произвело наибольшее впечатление?
6. Пригодятся ли вам знания, приобретенные при изучении темы, в дальнейшей жизни?
7. Что нового вы узнали на уроке?
8. Что вы считаете нужным запомнить?
9. Над чем еще надо поработать?



# САМОЕ ВАЖНОЕ

## Самое важное в главе

4

Решение задач значительно упрощается, если использовать понятия импульса тела, импульса силы, энергии.

При решении задач второй закон Ньютона часто удобнее применять в импульсном виде:  $\vec{F}t = \Delta\vec{p}$ , где  $\vec{F}t$  — импульс силы,  $\Delta\vec{p}$  — изменение импульса тела.

Под импульсом тела понимают векторную величину, равную произведению массы тела на его скорость, т. е.  $\vec{p} = m\vec{v}$ .

В замкнутой системе тел геометрическая сумма импульсов тел, входящих в систему, остается величиной неизменной — суть закона **сохранения импульса**.

$$\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots + \vec{p}_n = \text{const.}$$

Опираясь на закон сохранения импульса, легко объяснить реактивное движение, под которым понимают движение, возникающее при отделении от тела некоторой его части.

В замкнутой системе действует и закон сохранения и превращения энергии: энергия ниоткуда не берется и никуда не исчезает, она только переходит из одного вида в другой, от одного тела к другому, а полная энергия тел в замкнутой системе остается величиной неизменной  $\Sigma W_1 = \Sigma W_2$ .

Кинетическую энергию рассчитывают по формуле:  $W_k = \frac{mv^2}{2}$ .

Потенциальную энергию в гравитационном поле:  $W_p = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$ .

Потенциальную энергию в поле упругих сил:  $W_p = \frac{kx^2}{2}$ .

Потенциальную энергию в однородном поле силы тяжести:  $W_p = mgh$ .

Сила, под действием которой тело перемещается или деформируется, совершает работу, величину которой находят по формуле:

$$A = F \cdot s \cdot \cos\alpha.$$

Величина, характеризующая быстроту выполнения работы, называется **мощностью**  $N = \frac{A}{t}$ .