ПОДГОТОВКА К ИНТЕРНЕТ-ЭКЗАМЕНУ ПО ФИЗИКЕ

Дидактические единицы № 1, 2

Учебное пособие

Омск
Издательство ОмГТУ
2012

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Омский государственный технический университет»

ПОДГОТОВКА К ИНТЕРНЕТ-ЭКЗАМЕНУ ПО ФИЗИКЕ

Дидактические единицы № 1, 2

*Учебное электронное издание
локального распространения*

Омск
Издательство ОмГТУ
2012

Авторы: С. В. Данилов, В. А. Егорова, Н. А. Прокудина, В. П. Шабалин, Н. Г. Эйсмонт (текст издания)

Рецензенты:

М. П. Ланкина, д-р пед. наук, профессор кафедры общей физики ОмГУ им. Ф. М. Достоевского;

М. В. Мамонова, канд. ф.-м. наук, доцент кафедры теоретической физики ОмГУ им. Ф. М. Достоевского

Редактор Ю. Ю. Аптрашева

Компьютерная верстка О. Г. Белименко

*Рекомендовано редакционно-издательским советом
Омского государственного технического университета*

Издательство ОмГТУ
644050, Омск, пр. Мира, 11
E-mail: info@omgtu.ru

ВВЕДЕНИЕ

Настоящее издание подготовлено в соответствии с кодификатором элементов содержания дисциплины «Физика» цикла общих математических и естественно-научных дисциплин высшего профессионального образования. Ориентировано на обеспечение уровня и качества подготовки студентов, соответствующего требованиям государственных образовательных стандартов профессионального образования третьего поколения. Проработка студентами представленных материалов обеспечит эффективность освоения всех дидактических единиц дисциплины на уровне единых требований к оценке качества подготовки специалистов.

Учебное пособие состоит из двух частей, соответствующих дидактическим единицам № 1 «Механика» и № 2 «Молекулярная (статистическая) физика и термодинамика». В каждой части содержатся основные выводы, обобщающие учебный материал раздела, рекомендации по подготовке к тестированию по соответствующей дидактической единице, подробный разбор типовых тестовых заданий и материалы для самоконтроля студентов.

В пособии использованы материалы открытого доступа сайта www.fepo.ru Национального аккредитационного агентства в сфере образования.

Дидактическая единица № 1
МЕХАНИКА

Контролируемые темы	1	Кинематика поступательного и вращательного движения
	2	Динамика поступательного движения
	3	Динамика вращательного движения
	4	Работа и энергия
	5	Законы сохранения в механике
	6	Специальная теория относительности

Тема 1. КИНЕМАТИКА ПОСТУПАТЕЛЬНОГО И ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Необходимо знать:

– кинематические характеристики поступательного движения: радиус-вектор, скорость, ускорение, тангенциальная и нормальная составляющие ускорения, полное ускорение;

– кинематические характеристики вращательного движения: угловое перемещение, угловая скорость, угловое ускорение, связь линейных и угловых величин;

– виды движения: равномерное прямолинейное, равноускоренное прямолинейное, движение по окружности с постоянной скоростью, движение тела, брошенного под углом к горизонту.

Краткая теория

Поступательное движение – это вид механического движения системы точек (тела), при котором любой отрезок прямой, связанный с движущимся телом, форма и размеры которого во время движения не меняются, остается параллельным своему положению в любой предыдущий момент времени. В этом случае движение тела можно заменить движением одной из его точек и говорить о движении материальной точки.

Основные характеристики поступательного движения: путь, перемещение, скорость, ускорение.

Путь – это длина траектории тела.

Перемещение – это вектор, соединяющий начало и конец траектории и характеризующий изменение положения тела в пространстве.

Вектор перемещения можно выразить через его составляющие вдоль выбранных осей координат. В прямоугольной декартовой системе координат:

$$\Delta\vec{r} = \Delta x\vec{i} + \Delta y\vec{j} + \Delta z\vec{k} \;; \tag{1.1}$$

$$\left|\Delta\vec{r}\right| = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \,. \tag{1.2}$$

Скорость – векторная физическая величина, характеризующая быстроту перемещения и направления движения материальной точки в пространстве относительно выбранной системы отсчёта.

$$\vec{V} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt} \,. \tag{1.3}$$

В прямоугольной декартовой системе координат:

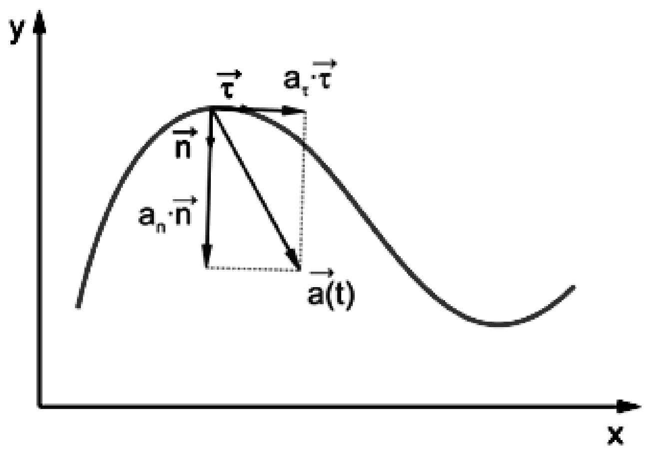
$$\vec{V} = V_x\vec{i} + V_y\vec{j} + V_z\vec{k}; \qquad \left|\vec{V}\right| = \sqrt{V_x^{\,2} + V_y^{\,2} + V_z^{\,2}} \,, \tag{1.4}$$

где
$$V_x = \frac{dx}{dt};\; V_y = \frac{dy}{dt};\, V_z = \frac{dz}{dt} \,. \tag{1.5}$$

Ускорение – векторная физическая величина, характеризующая быстроту изменения скорости тела.

$$\vec{a} = \frac{d\vec{V}}{dt}; \tag{1.6}$$

$$\vec{a} = \frac{dV_x}{dt}\vec{i} + \frac{dV_y}{dt}\vec{j} + \frac{dV_z}{dt}\vec{k} \,. \tag{1.7}$$



Полное ускорение имеет две составляющие – тангенциальную и нормальную:

$$\vec{a}(t) = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n \text{ – полное ускорение тела.} \tag{1.8}$$

Тангенциальное ускорение характеризует изменение скорости по модулю. Оно направлено по скорости, если тело разгоняется, и противоположно скорости, если тело тормозит:

$$a_\tau = \frac{dV}{dt}. \tag{1.9}$$

Нормальное ускорение характеризует изменение скорости по направлению. Оно направлено перпендикулярно скорости к центру кривизны траектории:

$$a_n = \frac{V^2}{R} = \omega^2 R, \tag{1.10}$$

где R – радиус кривизны траектории.

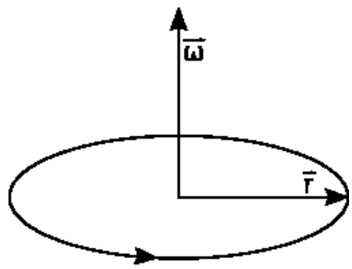
При равнопеременном движении:

$$V = V_0 + at; \tag{1.11}$$

$$s = V_0 t + \frac{at^2}{2}. \tag{1.12}$$

Вращательное движение абсолютно твёрдого тела – это вид механического движения, при котором его точки описывают окружности, расположенные в параллельных плоскостях, центры всех окружностей лежат на одной прямой, перпендикулярной к плоскостям окружностей и называемой осью вращения.

Основные характеристики вращательного движения: угловое перемещение, угловая скорость, угловое ускорение.



Угловая скорость – физическая величина, характеризующая быстроту вращения материальной точки. Направление угловой скорости определяется по правилу «правого винта». Числовое значение скорости определяется как производная от угла поворота φ по времени:

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt}. \tag{1.13}$$

Угловое ускорение – векторная физическая величина, характеризующая быстроту изменения угловой скорости тела:

$$\vec{\varepsilon} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}. \tag{1.14}$$

Характеристики поступательного и вращательного движения связаны между собой:

$$s = \varphi \cdot R; \tag{1.15}$$

$$V = \omega \cdot R; \qquad (1.16)$$

$$a_\tau = \varepsilon \cdot R. \qquad (1.17)$$

При описании равномерного вращательного движения используются характеристики *период* и *частота*.

Частота – число оборотов за единицу времени:

$$\nu = \frac{\omega}{2\pi}. \qquad (1.18)$$

Период – время одного оборота по окружности:

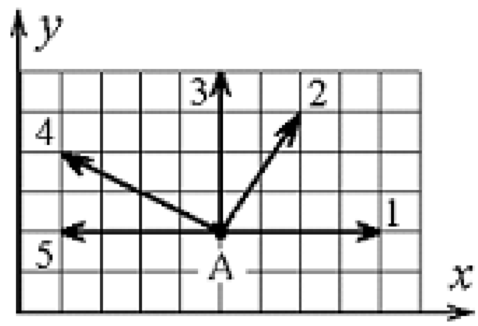
$$T = \frac{1}{\nu} = \frac{2\pi}{\omega}. \qquad (1.19)$$

Типовые тестовые задания

Задание 1(1)

Радиус-вектор частицы изменяется во времени по закону $\vec{r} = -5t^2 \cdot \vec{i} + 3 \cdot \vec{j}$. В момент времени t = 1 с частица находится в некоторой точке А. Скорость частицы в этот момент времени имеет направление …

1) 1;
2) 2;
3) 3;
4) 4;
5) 5.

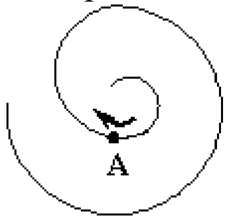


Решение

Связь между скоростью и радиус-вектором определяется формулой (1.3). Тогда $\vec{V} = -10t \cdot \vec{i}$; а $\vec{V}(t = 1c) = -10 \times \vec{i}$, т. е. в момент времени 1 с скорость направлена против оси x. Правильный ответ № 5.

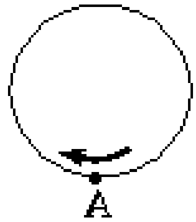
Задание 2(1)

Как изменяется величина нормального ускорения материальной точки, движущейся с постоянной по величине скоростью по траектории, изображенной на приведенных ниже рисунках:



(A)

(B)



(C)

1) увеличивается;
2) уменьшается;
3) не изменяется.

Решение

Согласно формуле (1.10) нормальное ускорение обратно пропорционально радиусу кривизны траектории. В случае А радиус кривизны увеличивается, значит нормальное ускорение уменьшается. В случае В радиус кривизны уменьшается, значит нормальное ускорение увеличивается. В случае С радиус кривизны не меняется, значит нормальное ускорение не меняется.

Задание 3(1)

Какой из приведенных в предыдущем задании рисунков может характеризовать движение материальной точки, для которой:

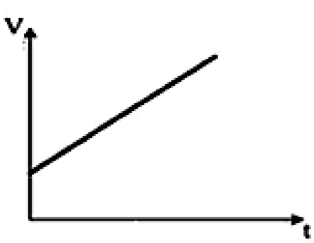
1) величина скорости и нормальное ускорение остаются постоянными;
2) величина скорости не меняется, нормальное ускорение увеличивается;
3) величина скорости не меняется, нормальное ускорение уменьшается.

Решение

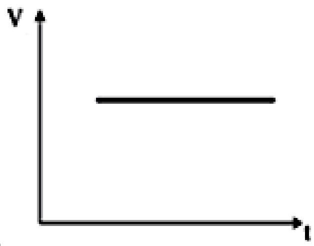
Согласно формуле (1.10) нормальное ускорение обратно пропорционально радиусу кривизны траектории. Первое утверждение соответствует случаю С: радиус и ускорение остаются постоянными. Второе – случаю В: радиус уменьшается, а ускорение увеличивается. Третье – случаю А: радиус увеличивается, ускорение уменьшается.

Задание 4(1)

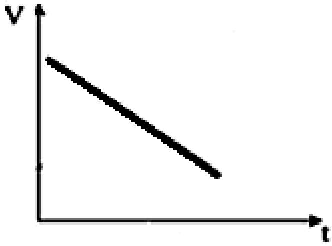
Материальная точка M движется по окружности со скоростью V. На рисунках приведены графики зависимости величины скорости V от времени.



(A)



(B)



(C)

На каком рисунке изображен случай, когда для нормального a_n и тангенциального ускорения a_τ выполняются условия:

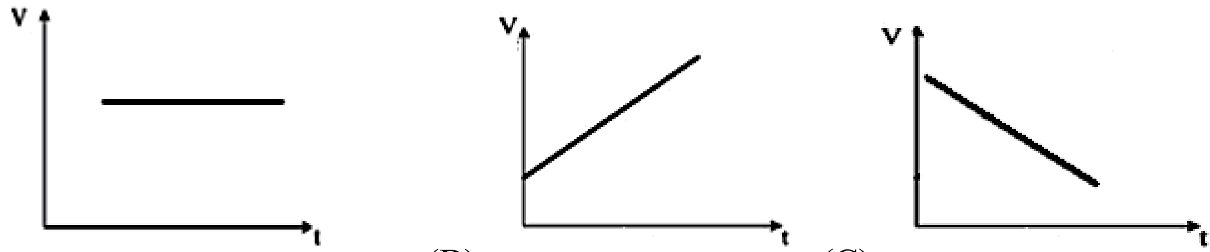
1) a_n постоянно, a_τ равно нулю;
2) a_n увеличивается, a_τ постоянно;
3) a_n уменьшается, a_τ постоянно.

Решение

Согласно формулам (1.9) и (1.10) нормальное ускорение прямо пропорционально квадрату скорости (радиус постоянный), тангенциальное ускорение определяется изменением модуля скорости. Первое утверждение соответствует графику В: скорость и нормальное ускорение остаются постоянными. Второе утверждение соответствует графику А: скорость увеличивается равномерно, значит тангенциальное ускорение постоянно, а нормальное ускорение растет. Третье утверждение соответствует графику С: скорость уменьшается равномерно, значит тангенциальное ускорение постоянно, а нормальное – уменьшается.

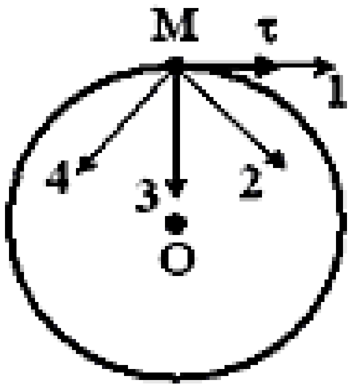
Задание 5(1)

Материальная точка *M* движется по окружности со скоростью *V*. На рисунках (А, В, С) изображены зависимости величины скорости *V* от времени.



(A) (B) (C)

Для каждого случая укажите направление вектора полного ускорения точки *M*.



Решение

Согласно формулам (1.9) и (1.10) нормальное ускорение прямо пропорционально квадрату скорости (радиус постоянный), тангенциальное ускорение определяется изменением модуля скорости. На графике А скорость остается постоянной, значит тангенциальное ускорение равно 0, нормальное ускорение, как и полное (1.8), направлено по вектору 3. На графике В скорость равномерно увеличивается, значит тангенциальное ускорение постоянно и направлено по вектору 1 (по скорости) (1.9), нормальное ускорение направлено по вектору 3, их сумма направлена в сторону вектора 2 (1.8). На графике С скорость равномерно уменьшается, значит тангенциальное ускорение постоянно и направлено против вектора 1 (против скорости) (1.9), нормальное ускорение направлено по вектору 3, их сумма направлена в сторону вектора 4 (1.8).

Задание 6(1)

Точка *M* движется по окружности с постоянным тангенциальным ускорением. Как меняется величина нормального ускорения, если проекция тангенциального ускорения на направление скорости: А) отрицательна; В) положительна; С) равна нулю?

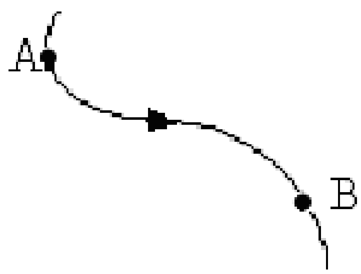
1) уменьшается;
2) увеличивается;
3) не меняется.

Решение

Согласно формулам (1.9) и (1.10) нормальное ускорение прямо пропорционально квадрату скорости (радиус постоянный), тангенциальное ускорение определяется изменением модуля скорости. В случае А тело тормозит, скорость и нормальное ускорение уменьшаются. В случае В тело разгоняется, скорость и нормальное ускорение увеличиваются. В случае С тело движется равномерно, скорость и нормальное ускорение не меняются.

Задание 7(1)

Тело движется с постоянной по величине скоростью по траектории, изображенной на рисунке. Сравнить величины полного ускорения тела в точках А и В:



1) полное ускорение в точке А больше, чем в точке В;
2) полное ускорение в точке В больше, чем в точке А;
3) полные ускорения в точках А и В одинаковы.

Решение

Согласно формулам (1.9) и (1.10) нормальное ускорение обратно пропорционально радиусу кривизны, тангенциальное ускорение определяется изменением модуля скорости и равно 0, так как скорость постоянна. В точке А нормальное, а значит и полное ускорение (1.8) больше, так как радиус кривизны меньше. Правильный ответ № 1.

Задание 8(1)

Тело брошено с поверхности земли со скоростью 20 м/с под углом 60° к горизонту. Определите радиус кривизны траектории в верхней точке $g = 10$ м/с^2.

1) 10 м;
2) 20 м;
3) 30 м;
4) 80 м.

Решение

В верхней точке траектории скорость тела направлена горизонтально. Горизонтальная составляющая скорости остается постоянной и составляет $V_x = V\cos 60° = 0{,}5V = 10$ м/с. Нормальное ускорение в этот момент направлено вниз и совпадает с полным (1.8), т. е. равно 10 м/с^2. Из формулы (1.10) следует, что $R = \dfrac{V^2}{a_n} = \dfrac{10^2}{10} = 10$ м. Правильный ответ № 1.

Задание 9(1)

Частица движется по окружности радиусом 1 м в соответствии с уравнением $\varphi(t) = 2\pi(t^2 - 2t + 12)$, где φ – в радианах, t – в секундах. Найти момент времени, когда скорость частицы будет равна нулю (время остановки и изменения направления движения частицы).

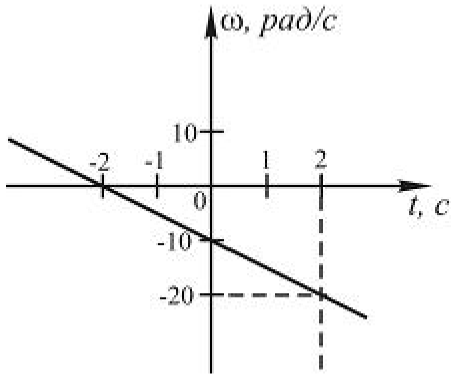
1) $t = 12$ с;
2) $t = 1$ с;
3) $t = \pi$ с;
4) $t = 4{,}5$ с.

Решение

Угловое перемещение связано с угловой скоростью соотношением (1.13). Зависимость угловой скорости от времени определяется уравнением $\omega(t) = 2\pi(2t - 2)$. Угловая скорость $\omega = 0$ в момент времени $t = 1$ с. Правильный ответ № 2.

Задание 10(1)

Тело вращается вокруг неподвижной оси. Зависимость угловой скорости от времени $\omega(t)$ приведена на рисунке.



Для точки, находящейся на расстоянии 1 м от оси вращения, найти тангенциальное, нормальное и полное ускорения в момент времени $t = 2$ с.

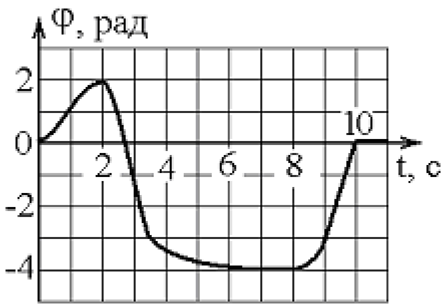
1) $a_\tau = -5$ м/с^2; $a_n = 20$ м/с^2; $a = 25$ м/с^2;
2) $a_\tau = -5$ м/с^2; $a_n = 400$ м/с^2; $a = 400$ м/с^2;
3) $a_\tau = 20$ м/с^2; $a_n = 5$ м/с^2; $a = 25$ м/с^2;
4) $a_\tau = 400$ м/с^2; $a_n = 20$ м/с^2; $a = 420$ м/с^2.

Решение

Нормальное ускорение (1.10) $a_n = \omega^2 R = (-20)^2 \cdot 1 = 400 \text{ м/с}^2$. Тангенциальное ускорение связано с угловым (1.17). Согласно графику угловая скорость линейно зависит от времени. Из формулы (1.14) следует, что при равномерном изменении угловой скорости угловое ускорение может быть найдено как $\varepsilon = \dfrac{\Delta\omega}{\Delta t} = \dfrac{-20-0}{4} = -5 \text{ рад/с}$. Тангенциальное ускорение (1.17) $a_\tau = -5 \text{ м/с}^2$. Полное ускорение (1.8) равно $a = \sqrt{400^2 + (-5)^2} \approx 400 \text{ м/с}^2$. Правильный ответ № 2.

Задание 11(1)

Диск радиуса R начинает вращаться из состояния покоя в горизонтальной плоскости вокруг оси z, проходящей перпендикулярно его плоскости через центр. Зависимость угла поворота от времени показана на графике.



Сравнить величины нормальных ускорений точки на краю диска в моменты времени $t_1 = 2$ с и $t_2 = 7$ с:

1) нормальное ускорение в момент $t_1 = 2$ с больше, чем в момент времени $t_2 = 7$ с;

2) нормальное ускорение в момент $t_1 = 2$ с меньше, чем в момент времени $t_2 = 7$ с;

3) нормальные ускорения в момент $t_1 = 2$ с и в момент времени $t_2 = 7$ с равны между собой и не равны 0;

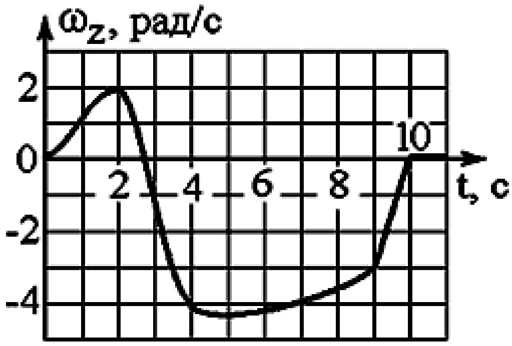
4) нормальные ускорения в момент $t_1 = 2$ с и в момент времени $t_2 = 7$ с равны 0.

Решение

Нормальное ускорение можно вычислить по формуле $a_n = \omega^2 R$. Угловая скорость определяется как производная от углового перемещения по времени (1.13) и равна 0 в точках экстремума функции, т. е. в моменты времени t_1 = 2 с и t_2 = 7 с. Значит и нормальные ускорения в эти моменты времени равны 0 (1.10). Правильный ответ № 4.

Задание 12(1)

Твердое тело начинает вращаться вокруг оси z с угловой скоростью, проекция которой изменяется во времени, как показано на графике.



Угол поворота тела относительно начального положения будет наибольшим в момент времени, равный…

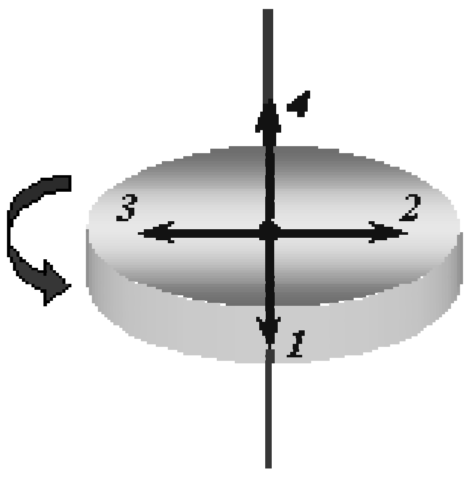
1) 2 с;
2) 2,7 с;
3) 5 с;
4) 10 с.

Решение

Угол поворота согласно формуле (1.13) определяется как $\varphi = \int \omega_z dt$ и имеет геометрический смысл площади под кривой, ограниченной графиком $\omega_z(t)$. Эта площадь (а значит и угол поворота) максимальна в момент времени 10 с. Правильный ответ № 4.

Задание 13(1)

Определить направления угловой скорости и углового ускорения при равнозамедленном вращении твердого тела вокруг неподвижной оси против часовой стрелки:



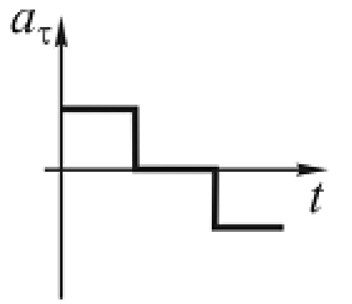
1) угловая скорость – направление 4, угловое ускорение – направление 1;
2) угловая скорость – направление 1, угловое ускорение – направление 4;
3) угловая скорость – направление 4, угловое ускорение – направление 4;
4) угловая скорость – направление 3, угловое ускорение – направление 3.

Решение

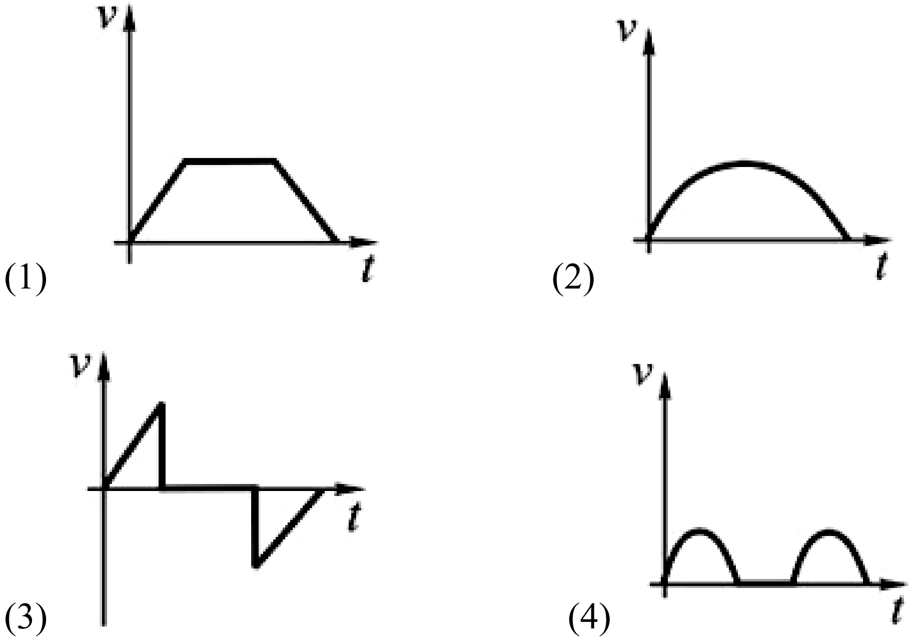
Направление угловой скорости определяем по правилу «правого винта» (1.13), она направлена вверх. При замедленном вращении угловое ускорение направлено противоположно угловой скорости (1.14), т. е. вниз. Правильный ответ № 1.

Задание 14(1)

Тангенциальное ускорение точки меняется согласно графику…



Такому движению соответствует зависимость скорости от времени …



Решение

На первом участке при постоянном по модулю и положительном тангенциальном ускорении скорость равномерно увеличивается (1.9). На втором участке тангенциального ускорения нет, значит скорость по модулю не меняется. На третьем участке при постоянном по модулю и отрицательном тангенциальном ускорении скорость равномерно уменьшается. Это соответствует графику № 1.

Тема 2. ДИНАМИКА ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Необходимо знать:

– динамические характеристики: сила, виды сил (модуль, направление и точка приложения), масса, импульс;

– закон всемирного тяготения;

– три закона Ньютона.

Краткая теория

Основное понятие динамики – понятие силы, основные законы динамики – три закона Ньютона.

Сила – это мера взаимодействия тел и причина изменения скорости тел.

Импульс тела (*количество движения*) – это векторная физическая величина, равная произведению массы тела на скорость его движения:

$$\vec{p} = m\vec{V}\ . \tag{2.1}$$

Первый закон Ньютона: «Всякое тело находится в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения, если на него не действуют никакие силы. Системы отсчета, связанные с этим телом, являются инерциальными».

Второй закон Ньютона: «Скорость изменения импульса пропорциональна приложенной к телу силе и происходит по направлению той прямой, по которой эта сила действует»:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}\ . \tag{2.2}$$

Если масса тела постоянная, то можно использовать *другую формулировку второго закона Ньютона:* «Ускорение, сообщаемое телу, прямо пропорционально силе, приложенной к телу, и обратно пропорционально массе этого тела»:

$$\vec{a} = \frac{\sum \vec{F_i}}{m}. \tag{2.3}$$

Третий закон Ньютона: «Действию всегда есть равное и противоположное противодействие; иначе, два тела действуют друг на друга с силами, направленными по одной прямой в противоположные стороны и равными по модулю»:

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}. \tag{2.4}$$

Равнодействующая системы сил – это сила, оказывающая на тело такое же механическое действие, как и данная система приложенных к телу сил. Равнодействующая равна векторной сумме всех сил, приложенных к телу.

$$\vec{F}=\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + ... \tag{2.5}$$

Центр масс (*центр инерции*) – это геометрическая точка, характеризующая движение тела или системы частиц как целого.

Радиус-вектор (положение) центра масс системы материальных точек в классической механике определяется формулой

$$\vec{r}_c = \frac{\sum_i m_i \vec{r}_i}{\sum_i m_i}. \tag{2.6}$$

Скорость центра масс определяется выражением

$$\vec{V}_c = \frac{\sum_i m_i \vec{V}_i}{\sum_i m_i}. \tag{2.7}$$

Основные силы в механике

Сила всемирного тяготения – это сила, с которой притягиваются друг к другу все тела во Вселенной.

Закон всемирного тяготения: «Сила всемирного тяготения прямо пропорциональна массам взаимодействующих тел и обратно пропорциональна квадрату расстояния между центрами масс этих тел»:

$$F_{тяг} = \frac{G m_1 m_2}{r^2}. \tag{2.8}$$

Сила всемирного тяготения направлена вдоль прямой, соединяющей центры масс взаимодействующих тел.

Сила тяжести – это сила, с которой тело притягивается к Земле, находясь вблизи её поверхности (частный случай силы всемирного тяготения):

$$F_T = mg. \tag{2.9}$$

Сила тяжести действует на все тела, находящиеся у поверхности Земли, и направлена вертикально вниз.

Вес тела – это сила, с которой тело действует на горизонтальную опору или вертикальный подвес:

$$P = m(g \pm a). \tag{2.10}$$

Знак «+» в формуле ставится, если ускорение тела направлено вверх, если ускорение направлено вниз, то ставится знак «–».

Вес действует на опору перпендикулярно её поверхности или на подвес вдоль его линии.

Сила упругости – это сила, возникающая в упруго деформированном теле и направленная так, чтобы вернуть его в недеформированное состояние.

Закон Гука: «Сила упругости прямо пропорциональна удлинению тела»:

$$F_{упр_x} = -k \cdot x. \tag{2.11}$$

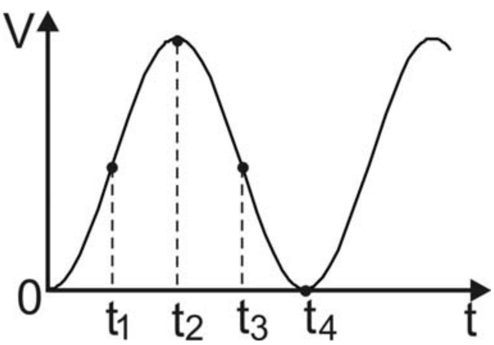
Сила трения скольжения – это сила, возникающая при скольжении одного тела по поверхности другого и препятствующая их перемещению относительно друг друга:

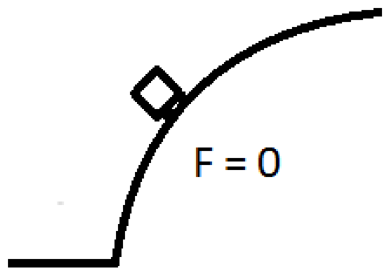
$$F_{тр} = \mu \cdot N. \tag{2.12}$$

Типовые тестовые задания

Задание 15(2)

Величина скорости автомобиля менялась со временем, как показано на графике зависимости $V(t)$.





В некоторый момент подъема по участку дуги результирующая всех сил, действующих на автомобиль, была равна 0. Укажите этот момент времени.

1) t_1;

2) t_2;

3) t_3;

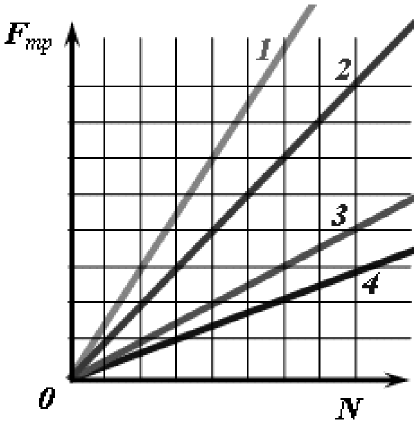
4) t_4;

5) нет такого момента времени.

Решение

Результирующая сила связана с полным ускорением тела (2.3). Полное ускорение равно 0, когда равны 0 обе его составляющие (1.8). Тангенциальное ускорение (1.9) равно 0, когда модуль скорости не меняется, этому соответствуют моменты времени t_2 и t_4. Нормальное ускорение (1.10) равно нулю, когда скорость тела равна 0, этому соответствуют момент t_4. Правильный ответ № 4.

Задание 16(2)



На рисунке представлены графики зависимостей силы трения $F_{тр}$ от силы реакции опоры N. Найти отношение μ_1 / μ_2 коэффициентов трения скольжения:

1) 1;
2) 1/2;
3) 1,5;
4) 2/3.

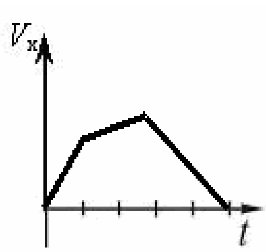
Решение

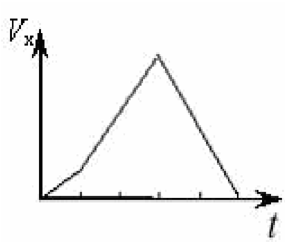
Из определения силы трения (2.12), коэффициент трения $\mu = \dfrac{F_{тр}}{N}$. Отсюда

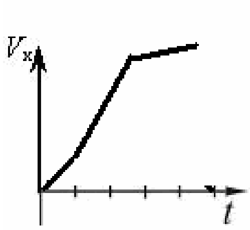
$\dfrac{\mu_1}{\mu_2} = \dfrac{F_{тр1}}{N}\dfrac{N}{F_{тр2}} = \dfrac{6}{4} = 1,5.$ Правильный ответ № 3.

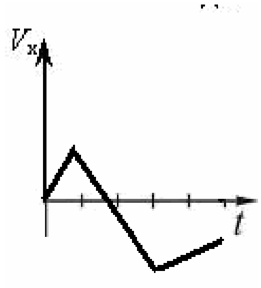
Задание 17(2)

На приведенных ниже рисунках (1–4) дано изменение проекции скорости тела V_x от времени.

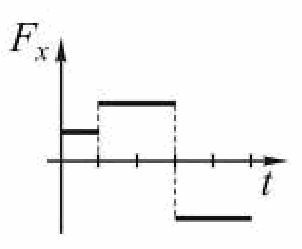
(1)


(2)


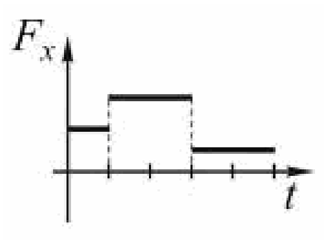
(3)


(4)


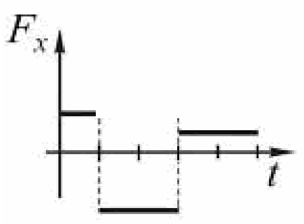
Для каждого случая укажите, какой из рисунков (A – D) дает соответствующую зависимость от времени проекции силы F_x, действующей на тело.



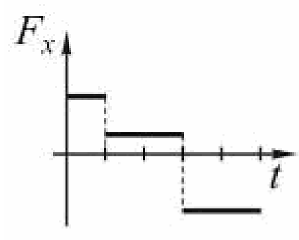
(A)



(B)



(C)



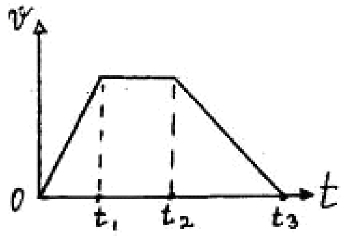
(D)

Решение

На графике А сила (соответственно и ускорение (2.3)) на первом участке меньше, чем на втором, и положительна. Значит скорость увеличивается сначала медленно, а на втором участке быстрее (1.9). На третьем участке сила и ускорение отрицательны, значит тело тормозит, его скорость уменьшается (1.9). Графику А соответствует график 2. На графике В сила (соответственно и ускорение (2.3)) на первом участке меньше, чем на втором, и больше, чем на третьем (и все положительны). Значит скорость увеличивается сначала медленно, на втором участке быстрее, а на третьем участке медленнее (1.9). Графику В соответствует график 3. На графике С сила (соответственно и ускорение (2.3)) на первом и третьем участках положительна. Значит скорость на этих участках увеличивается, а на втором уменьшается. Графику С соответствует график 4. На графике D сила (соответственно и ускорение (2.3)) на первом участке больше, чем на втором, и положительна. Значит скорость увеличивается сначала быстро, а на втором участке медленнее. На третьем участке сила и ускорение отрицательны, значит тело тормозит, его скорость уменьшается (1.9). Графику D соответствует график 1.

Задание 18(2)

Скорость грузового лифта изменяется в соответствии с графиком, представленным на рисунке. В какой промежуток времени сила давления груза на пол численно равна силе тяжести?



1) $0 < t < t_1$;

2) $t_1 < t < t_2$;

3) $t_2 < t < t_3$;

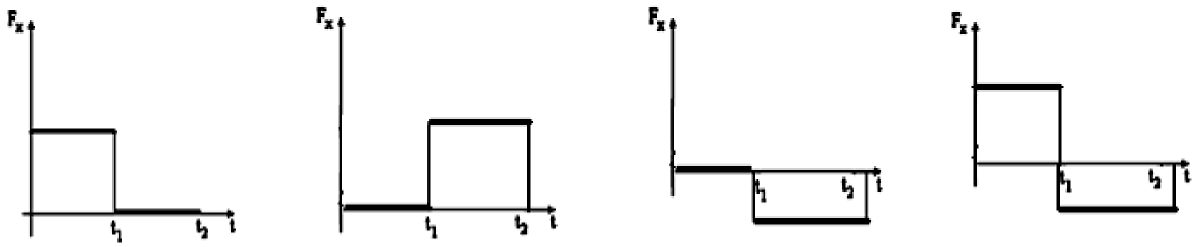
4) $0 < t < t_3$.

Решение

Вес тела определяется формулой (2.10) и равен силе тяжести в те моменты времени, когда у тела нет ускорения, т. е. когда скорость остается постоянной (1.9). Правильный ответ № 2.

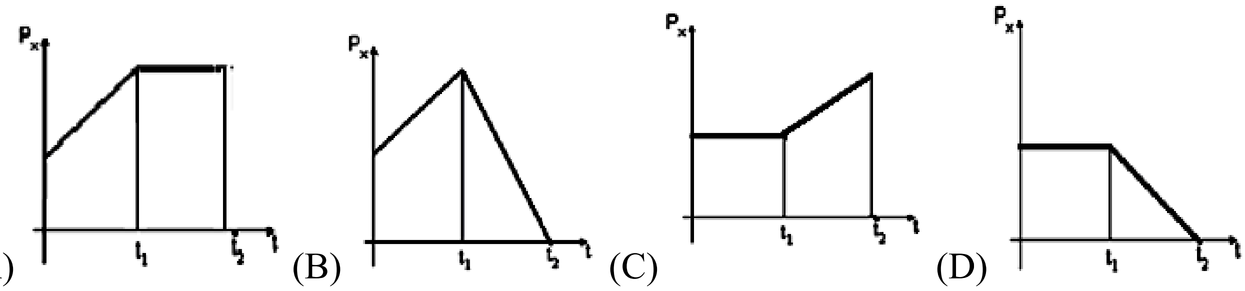
Задание 19(2)

Материальная точка двигалась вдоль оси x равномерно с некоторой скоростью V_x. Начиная с момента времени $t = 0$ на нее стала действовать сила F_x, график временной зависимости которой представлен на рисунках (1–4).



(1) (2) (3) (4)

Для каждого случая укажите, какой из рисунков (A–D) правильно отражает соответствующую зависимость величины проекции импульса материальной точки P_x от времени.

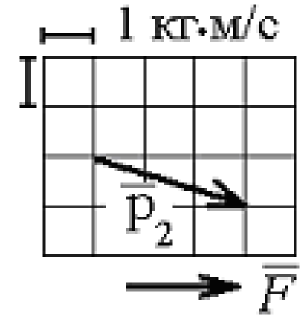


(A) (B) (C) (D)

Решение

Согласно второму закону Ньютона (2.2) на соответствующих участках графиков, где проекция силы равна 0 – проекция импульса не изменяется, если проекция силы положительна – проекция импульса увеличивается, если проекция силы отрицательна – проекция импульса уменьшается. Правильный ответ 1 – A, 2 – C, 3 – D, 4 – B.

Задание 20(2)



На теннисный мяч, который летел с импульсом $\vec{p}_1$, на короткое время Δt = 0,01 с подействовал порыв ветра с постоянной силой F = 300 Н, и импульс мяча стал равным $\vec{p}_2$ (масштаб и направление указаны на рисунке). Найти величину начального импульса $\vec{p}_1$.

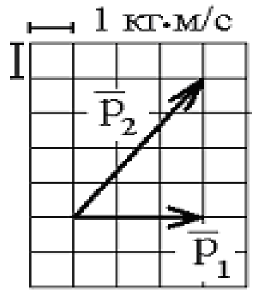
1) 1 кг · м/с;
2) 2 кг · м/с;
3) 3 кг · м/с;
4) 4 кг · м/с.

Решение

Согласно второму закону Ньютона (2.2) изменение импульса $\Delta\vec{p} = \vec{F}\Delta t = 3$ кг · м/с и направлено вправо. $\Delta\vec{p} = \vec{p}_2 - \vec{p}_1$, отсюда $\vec{p}_1 = \vec{p}_2 - \Delta\vec{p}$..

Из правила сложения векторов следует, что вектор $p_1 = 1$ кг·м/с и направлен вниз. Правильный ответ № 1.

Задание 21(2)



Теннисный мяч летел с импульсом $\vec{p}_1$ (масштаб и направления указаны на рисунке). Теннисист произвел по мячу резкий удар с средней силой 80 Н. Изменившийся импульс мяча стал $\vec{p}_2$. Какое время действовала на мяч сила?

1) 0,2 с;
2) 2 с;
3) 0,5 с;
4) 0,05 с.

Решение

Согласно второму закону Ньютона (2.2) время действия силы на мяч равно изменению импульса мяча, деленному на среднюю силу: $\Delta t = \frac{\Delta \vec{p}}{\vec{F}}$. Изменение импульса найдем из рисунка как разность векторов p_2 и p_1: это вектор, соединяющий конец начального импульса с конечным: он направлен вверх и равен четырем клеткам. В заданном масштабе $\Delta p = 4 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$. Тогда $\Delta t = \frac{4 \text{ кг} \cdot \text{м/с}}{80 \text{ Н}} = 0,05 \text{ с}$. Правильный ответ № 4.

Задание 22(2)

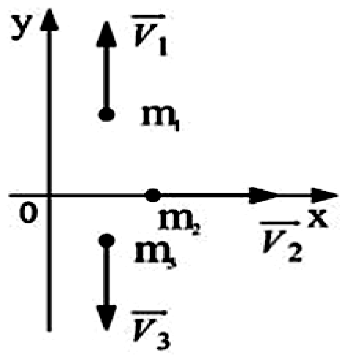
К потолку лифта, поднимающегося вверх тормозясь, на нити подвешено тело массой 10 кг. Модуль вектора скорости изменения импульса тела равен 50 кг·м/с^2. Сила натяжения нити равна…

1) 50 кг · м/с^2;
2) 150 кг · м/с^2;
3) 0 кг · м/с^2;
4) 100 кг · м/с^2.

Решение

Согласно второму закону Ньютона (2.2) модуль вектора скорости изменения импульса тела – это модуль равнодействующей всех сил, приложенных к телу. На тело действует две силы: сила тяжести mg (2.9), направленная вниз и равная 100 Н, и сила натяжения нити, направленная вверх. Чтобы равнодействующая (2.5) была равна 50 Н и была направлена вниз (как и ускорение тела), нужно чтобы сила натяжения нити была равна 50 Н. Правильный ответ № 1.

Задание 23(2)



Система состоит из трех шаров с массами m_1 = 2 кг, m_2 = 2 кг, m_3 = 3 кг, которые двигаются так, как показано на рисунке. Как направлен вектор скорости центра масс этой системы, если скорости шаров равны V_1 = 3 м/с, V_2 = 2 м/с, V_3 = 2 м/с?

1) вдоль оси *ox*;

2) вдоль оси *oy*;

3) противоположно оси *oy*;

4) под углом к обеим осям.

Решение

Скорость центра масс системы определяется формулой (2.7). Импульсы первого и третьего тела в сумме дают 0. Вектор скорости центра масс этой системы направлен по импульсу второго тела. Правильный ответ № 1.

Задание 24(2)

Взаимодействие между однородным стержнем массой M и длиной L и материальной точкой m, находящейся на линии продолжения стержня на расстоянии r от его середины, можно рассматривать как взаимодействие двух точечных масс, если…

1) $r = L$;

2) $r < L$;

3) $r >> L$;

4) $r << L$.

Решение

Тело можно считать материальной точкой, если его размеры пренебрежимо малы по сравнению с расстояниями до других тел. Правильный ответ № 3.

Тема 3. ДИНАМИКА ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Необходимо знать:

– динамические характеристики: момент силы относительно точки, момент инерции, момент импульса;

– основной закон динамики вращательного движения.

Краткая теория

Момент силы относительно точки – это величина, равная векторному произведению радиус-вектора, проведенного от заданной точки к точке приложения силы, на вектор этой силы:

$$\vec{M} = [\vec{r}, \vec{F}]. \tag{3.1}$$

Можно трактовать как вектор, направленный вдоль оси вращения и связанный с силой правилом «правого винта».

Момент силы относительно неподвижной оси – это скалярная величина, равная проекции на эту ось момента силы относительно произвольной точки данной оси:

$$M_Z = M \cdot \cos\beta \text{ или} \tag{3.2}$$

$$M = F \cdot l, \tag{3.3}$$

где l – плечо силы; F – кратчайшее расстояние от оси вращения до линии действия этой силы.

Момент инерции материальной точки относительно неподвижной оси определяется формулой

$$I = mr^2, \tag{3.4}$$

где r – кратчайшее расстояние от точки массой m до оси вращения.

Момент инерции твердого тела – скалярная аддитивная величина, являющаяся мерой инертности тела во вращательном движении вокруг оси.

Для дискретного распределения массы:

$$I = \sum_{i=1}^{N} I_i = \sum_{i=1}^{N} m_i r_i^2. \tag{3.5}$$

Для непрерывного распределения массы:

$$I = \int_V r^2 dm. \tag{3.6}$$

Момент инерции обруча (полого цилиндра) относительно оси симметрии:

$$I_{обруча} = mR^2. \tag{3.7}$$

Момент инерции диска (сплошного цилиндра) относительно его оси симметрии:

$$I_{диска} = \frac{1}{2} mR^2. \tag{3.8}$$

Момент инерции шара относительно его оси симметрии:

$$I_{шара} = \frac{2}{5} mR^2. \tag{3.9}$$

Момент инерции стержня относительно оси, проходящей перпендикулярно стержню через его середину:

$$I_{стержня} = \frac{1}{12} ml^2. \tag{3.10}$$

Теорема Штейнера: «Момент инерции тела относительно произвольной оси вращения равен сумме момента инерции I_c относительно параллельной оси, проходящей через центр инерции тела, и величины произведения массы тела на квадрат расстояния между ними, где m масса тела, d – расстояние от центра инерции тела до выбранной оси вращения»:

$$I = I_c + md^2. \tag{3.11}$$

Момент импульса материальной точки относительно точки полюса – это векторная величина, равная векторному произведению радиус-вектора, проведённого из полюса в место нахождения материальной точки, на вектор её импульса:

$$\vec{L} = [\vec{r}\ , \vec{p}] = [\vec{r}\ , m\vec{V}]; \tag{3.12}$$

$$L = mVr\sin(\alpha). \tag{3.13}$$

Момент импульса твердого тела относительно оси – это скалярная величина, равная произведению момента инерции тела относительно этой оси на его угловую скорость:

$$L_z = I_z \omega_z. \tag{3.14}$$

Основной закон динамики вращательного движения: «Скорость изменения момента импульса тела относительно оси вращения z равна результирующему моменту действующих на тело сил относительно этой же оси»:

$$\frac{dL_Z}{dt} = M_Z. \tag{3.15}$$

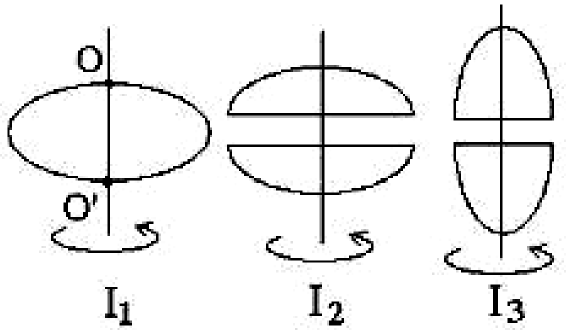
Если момент инерции постоянный, то можно *использовать другую формулировку основного закона динамики вращательного движения*: «Угловое ускорение твердого тела прямо пропорционально суммарному моменту сил и обратно пропорционально моменту инерции твердого тела относительно этой же оси»:

$$I_z \varepsilon_z = M_z. \tag{3.16}$$

Типовые тестовые задания

Задание 25(3)

Из жести вырезали три одинаковые детали в виде эллипса. Две детали разрезали пополам вдоль разных осей симметрии. Затем все части отодвинули друг от друга на одинаковое расстояние и расставили симметрично относительно оси *OO*'.



Сравните моменты инерции I_1, I_2 и I_3.

1) $I_1 > I_2 > I_3$;

2) $I_1 = I_2 > I_3$;

3) $I_1 = I_2 = I_3$;

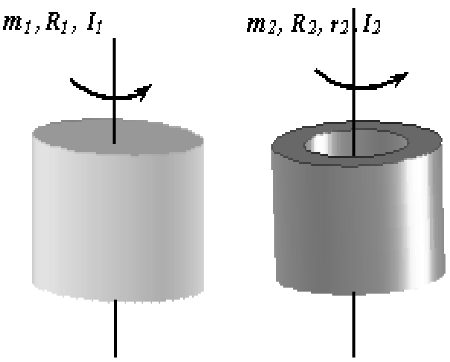
4) $I_1 < I_2 < I_3$.

Решение

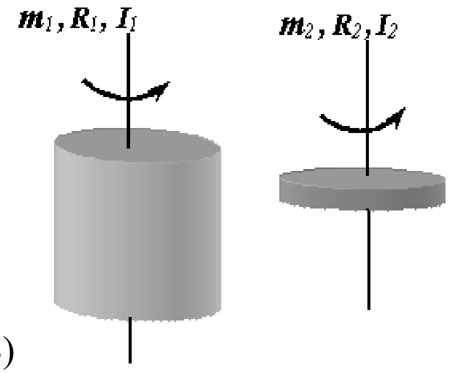
В первом и втором случае точки тела одинаково распределены относительно оси вращения, значит моменты инерции в этих случаях одинаковы (3.4), (3.5). В третьем случае точки тела расположены ближе к оси вращения, значит момент инерции меньше. Правильный ответ № 2.

Задание 26(3)

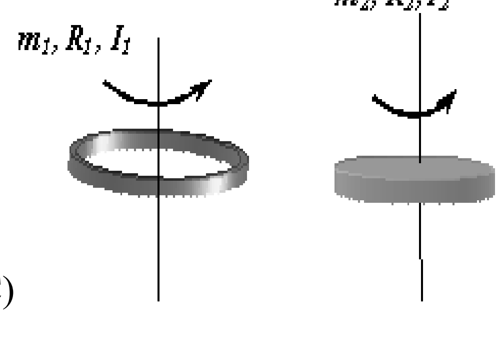
Сравните моменты инерции тел, представленных на рисунках, если массы тел и внешние радиусы равны: $m_1 = m_2$, $R_1 = R_2$.



(A)



(B)



(C)

1) $I_1 > I_2$;
2) $I_1 < I_2$;
3) $I_1 = I_2$.

Решение

В случае А масса полого цилиндра распределена дальше от оси вращения, чем у сплошного и его момент инерции больше (3.7), (3.8). Правильный ответ № 2. В случае В массы цилиндров распределены одинаково относительно оси вращения, моменты инерции одинаковые (3.8). Правильный ответ № 3. В случае С масса полого кольца распределена дальше от оси вращения, чем у сплошного диска и его момент инерции больше (3.7), (3.8). Правильный ответ № 1.

Задание 27(3)

Два сплошных цилиндра имеют равные массы и различные моменты инерции: $m_1 = m_2$, $I_1 = 9I_2$. Отношение их радиусов $\frac{R_2}{R_1}$ равно…

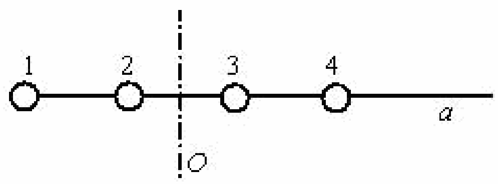
1) 9;
2) 1/9;
3) 3;
4) 1/3.

Решение

Согласно формуле (3.8) радиус цилиндра $R = \sqrt{\frac{2I}{m}}$. Отсюда, с учетом равенства масс, $\frac{R_2}{R_1} = \sqrt{\frac{I_2}{I_1}} = \frac{1}{3}$. Правильный ответ № 4.

Задание 28(3)

Четыре шарика расположены вдоль прямой a. Расстояния между соседними шариками одинаковы. Массы шариков слева направо: 1, 2, 3, 4 г.



Если поменять местами шарики 2 и 4 , то момент инерции этой системы относительно оси O, перпендикулярной прямой a и проходящей через середину системы…

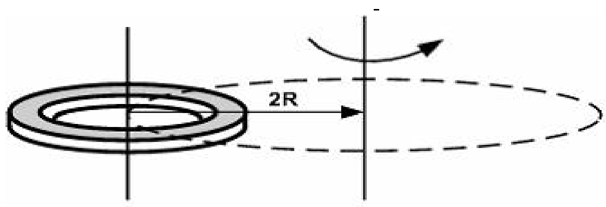
1) увеличится;
2) уменьшится;
3) не изменится.

Решение

Тяжелый шарик будет расположен ближе к оси вращения, чем более легкий, масса системы перераспределится ближе к оси вращения. Момент инерции системы маленьких шариков уменьшится согласно формулам (3.4), (3.5). Правильный ответ № 2.

Задание 29(3)

При расчете моментов инерции тела относительно осей, не проходящих через центр масс, используют теорему Штейнера. Как изменится момент инерции, если ось вращения тонкого кольца перенести из центра масс на расстояние 2R?



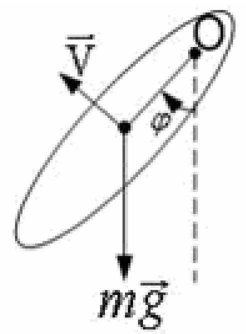
1) увеличится в 2 раза;
2) увеличится в 3 раза;
3) увеличится в 5 раз;
4) увеличится в 6 раз.

Решение

Момент инерции кольца определяется формулой (3.7). Согласно теореме Штейнера (3.11) после перенесения оси вращения момент инерции кольца будет $I = mR^2 + m(2R)^2 = 5mR^2 = 5I_0$. Правильный ответ № 3.

Задание 30(3)

Физический маятник совершает колебания вокруг оси, проходящей через точку O перпендикулярно плоскости рисунка. Момент силы тяжести для данного положения маятника направлен...



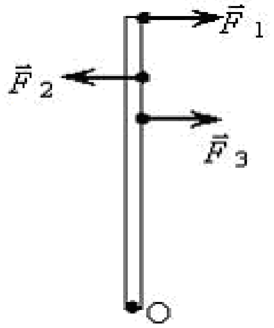
1) вниз;
2) влево;
3) на нас;
4) от нас.

Решение

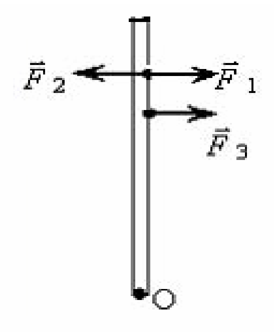
Согласно формуле (3.1) момент силы определяется по правилу векторного произведения векторов (правилу «правого винта») или в проекциях на ось вращения (3.3): момент сил, вращающих маятник против часовой стрелки, направлен на нас. Правильный ответ № 3.

Задание 31(3)

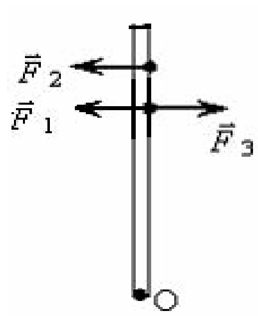
К стержню приложены три одинаковые по модулю силы, как показано на рисунках (А–С). Ось вращения перпендикулярна плоскости рисунка и проходит через точку *O*. Для каждого случая определить направление вектора углового ускорения.



(А)



(В)



(С)

1) влево;
2) вправо;
3) на нас;
4) от нас.

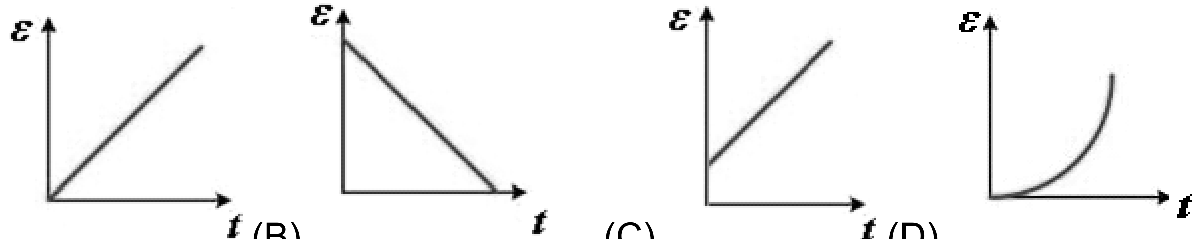
Решение

Вектор углового ускорения сонаправлен с вектором результирующего момента силы (3.16). Момент будет больше у сил, приложенных дальше от оси вращения (3.3). Согласно определению момента силы (3.1) момент сил, вращающих стержень по часовой стрелке, направлен от нас, а момент сил, вращающих стержень против часовой стрелки, направлен на нас. В случае А суммарный момент сил F_1 и F_3 будет больше момента силы F_2 и будет вращать стержень по часовой стрелке. Правильный ответ № 4. В случае В суммарный момент сил F_1 и F_2 будет равен 0, момент силы F_3 будет вращать стержень по часовой стрелке. Правильный ответ № 4. В случае С суммарный момент сил F_1 и F_3 будет равен 0, момент силы F_2 будет вращать стержень против часовой стрелки. Правильный ответ № 3.

Задание 32(3)

На каком графике представлена соответствующая зависимость от времени углового ускорения тела, если момент силы, приложенный к вращающемуся телу, изменяется по закону:

1) $M = At$;
2) $M = At^2$;
3) $M = B - At$;
4) $M = B + At$.



(A) (B) (C) (D)

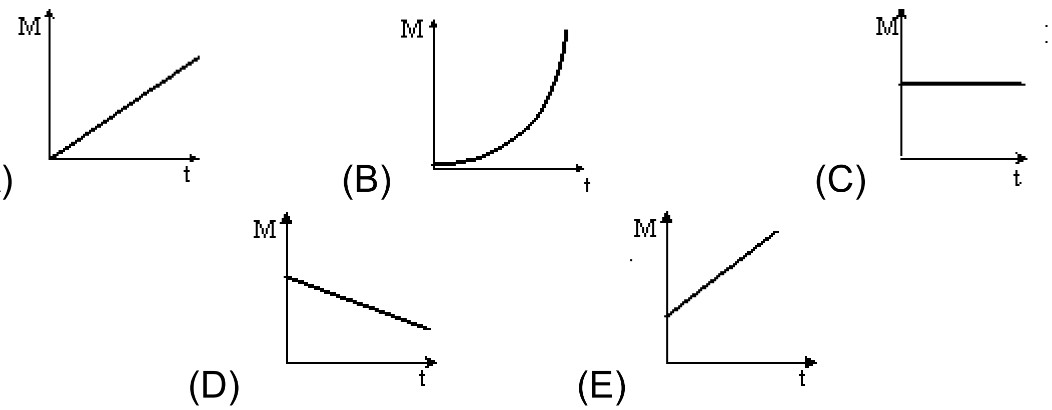
Решение

Пропорциональная зависимость между угловым ускорением и моментом силы (для тела с постоянным моментом инерции) определяется основным законом динамики вращательного движения (3.16), поэтому зависимость от времени двух этих величин будет одинаковая. Графику А соответствует уравнение № 1; графику В соответствует уравнение № 3; графику С соответствует уравнение № 4; графику D соответствует уравнение № 2.

Задание 33(3)

Укажите, какой из приведенных графиков правильно отражает зависимость величины момента сил, действующих на тело, если момент импульса тела относительно неподвижной оси изменяется по закону:

1) $L = at^2 + bt$;
2) $L = at^3$;
3) $L = at + b$;
4) $L = at - bt^2$;
5) $L = at^2$.



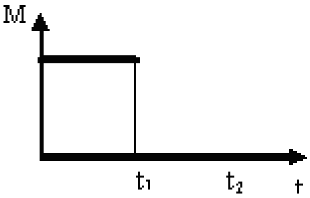
(A) (B) (C) (D) (E)

Решение

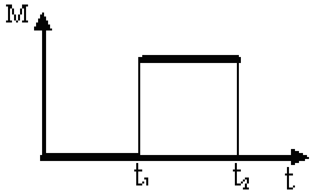
Зависимость между моментом силы и моментом импульса вращающегося тела определяется основным законом динамики вращательного движения (3.15). Согласно ему момент силы является производной по времени от момента импульса. В первом случае $M = L_t' = 2at + b$, этому уравнению соответствует график E. Во втором случае $M = L_t' = 3at^2$, этому уравнению соответствует график B. В третьем случае $M = L_t' = a$, этому уравнению соответствует график C. В четвертом случае $M = L_t' = a - 2bt$, этому уравнению соответствует график D. В пятом случае $M = L_t' = 2at$, этому уравнению соответствует график A.

Задание 34(3)

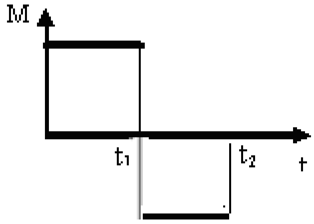
Диск начинает вращаться под действием момента сил, графики временной зависимости которого даны на рисунках (1–3).



(1)

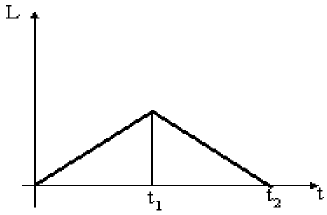


(2)

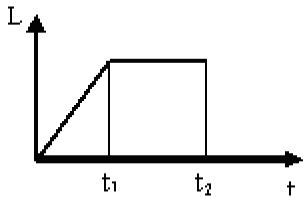


(3)

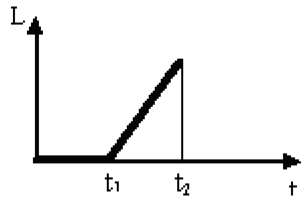
Для каждого случая укажите график, правильно отражающий зависимость момента импульса диска от времени.



(A)



(B)



(C)

Решение

Зависимость между моментом силы и моментом импульса вращающегося тела определяется основным законом динамики вращательного движения (3.15). Согласно ему момент силы является производной по времени от момента импульса. Первому графику зависимости $M(t)$ соответствует график B зависимости $L(t)$: сначала момент силы постоянный положительный – момент импульса равномерно возрастает, затем момент силы отсутствует – момент импульса не изменяется. Второму графику зависимости $M(t)$ соответствует график C зависимости $L(t)$: сначала момент силы отсутствует – момент импульса постоянный, затем момент силы постоянный положительный – момент импульса равномерно увеличивается. Третьему графику зависимости $M(t)$ соответствует график A зависимости $L(t)$: сначала момент силы постоянный положительный – момент импульса равномерно возрастает, затем момент силы постоянный отрицательный – момент импульса равномерно убывает.

Тема 4. РАБОТА И ЭНЕРГИЯ

Необходимо знать:
– работа силы;
– кинетическая и потенциальная энергия;
– связь силы и потенциальной энергии;
– связь механической энергии с работой;
– механическая мощность;
– работа и мощность вращательного движения.

Краткая теория

Механическая работа – это скалярная физическая величина, являющаяся количественной мерой действия силы или сил на тело или систему тел.

При поступательном движении работа

$$A_{12} = \int_{s_{12}} \vec{F} d\vec{s} = \int_{s_{12}} F_s ds; \tag{4.1}$$

если F = const, то

$$A = \vec{F} \cdot \vec{s} = Fs \cos \alpha. \tag{4.2}$$

При вращательном движении работа

$$A_{12} = \int_{\varphi_{12}} M_z d\varphi; \tag{4.3}$$

если M = const, $A = M\varphi$. (4.4)

Механическая энергия – это скалярная физическая величина, связанная с движением объекта или его положением, характеризующая способность совершать механическую работу.

Существует два вида механической энергии: кинетическая и потенциальная.

Кинетическая энергия – это энергия движения:

$E_{к(пост)} = \dfrac{mV^2}{2}$ – при поступательном движении; (4.5)

$E_{к(вр)} = \dfrac{I\omega^2}{2}$ – при вращательном движении; (4.6)

$E_к = \dfrac{mV^2}{2} + \dfrac{I\omega^2}{2}$ – полная кинетическая энергия. (4.7)

Потенциальная энергия – это энергия взаимодействия:

Потенциальная энергия гравитационного взаимодействия:

$$E_п = -\frac{G \cdot m_1 \cdot m_2}{r}. \tag{4.8}$$

Потенциальная энергия тела в поле Земного тяготения:

$$E_п = mgh. \tag{4.9}$$

Потенциальная энергия упруго деформированного тела:

$$E_{п(упр)} = \frac{kx^2}{2}. \tag{4.10}$$

Связь потенциальной энергии с консервативной силой:

$\vec{F} = -grad\left(E_п\right)$ или (4.11)

$F_r = -\dfrac{dE_п}{dr}$ – в проекциях на направление r. (4.12)

Полная механическая энергия – сумма кинетической и потенциальной энергии тела:

$$E = E_к + E_п. \tag{4.13}$$

Мощность – скалярная величина, характеризующая быстроту совершения работы:

$$N = \frac{\delta A}{dt}. \tag{4.14}$$

$N = \dfrac{\delta A}{dt} = \vec{F} \cdot \vec{V}$ – при поступательном движении; (4.15)

$N = \dfrac{\delta A}{dt} = \vec{M} \cdot \vec{\omega}$ – при вращательном движении. (4.16)

Связь работы с механической энергией:

Работа всех сил, приложенных к телу, равна приращению кинетической энергии тела:

$$A_{всех\ сил} = E_{к2} - E_{к1} = \Delta E_к. \tag{4.17}$$

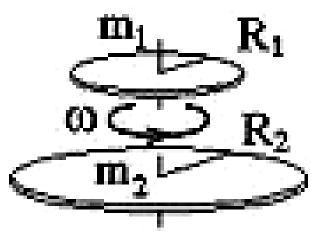
Работа консервативных сил, приложенных к телу, равна убыли потенциальной энергии тела:

$$A_{конс} = -\Delta E_п. \tag{4.18}$$

Типовые тестовые задания

Задание 35(4)

Для того чтобы раскрутить диск массы m_1 и радиуса R_1 вокруг своей оси до угловой скорости ω, необходимо совершить работу A_1. Для того чтобы раскрутить до той же угловой скорости диск массы $m_2 = m_1/2$ и радиуса $R_2 = 2R_1$, необходимо совершить работу …



1) $A_2 = A_1$;
2) $A_2 = \frac{1}{2}A_1$;
3) $A_2 = 4A_1$;
4) $A_2 = 2A_1$.

Решение

Работа связана с изменением кинетической энергии (4.17). Чтобы раскрутить диск, нужно совершить работу, равную конечной кинетической энергии диска (4.6). Отношение работ в двух случаях $\frac{A_2}{A_1} = \frac{I_2\omega^2}{2}\frac{2}{I_1\omega^2} = \frac{I_2}{I_1} =$ $= \frac{(m_1/2)(2R_1)^2}{2}\frac{2}{m_1R_1^2} = 2.$ Правильный ответ № 4.

Задание 36(4)

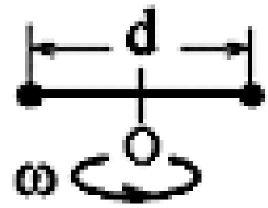
Постоянная сила 10 Н, приложенная по касательной к твердому шару радиусом 1 см, заставила шар совершить один полный оборот вокруг своей оси. Работа этой силы равна...

1) 0,1 Дж;
2) 10 Дж;
3) 0,628 Дж;
4) 3,14 Дж.

Решение

При движении под действием постоянного вращающего момента силы работа определяется формулой (4.4), где момент силы – это $F \cdot l$ (3.3). Отсюда, учитывая что угол измеряется в радианах, $A = Fl\varphi = 10 \cdot 0,01 \cdot 6,28 = 0,628$ Дж. Правильный ответ № 3.

Задание 37(4)



Два маленьких массивных шарика закреплены на концах невесомого стержня длины d. Стержень может вращаться в горизонтальной плоскости вокруг вертикальной оси, проходящей через середину стержня. Стержень раскрутили до угловой скорости ω_1. Под действием трения стержень остановился, при этом выделилось тепло Q_1. Если стержень раскручен до угловой скорости $\omega_2 = 3\omega_1$, то при остановке стержня выделится тепло …

1) $Q_2 = 3Q_1$;
2) $Q_2 = 9Q_1$;
3) $Q_2 = \frac{1}{3}Q_1$;
4) $Q_2 = \frac{1}{9}Q_1$.

Решение

Согласно закону сохранения энергии выделившаяся теплота равна той механической энергии, которой система обладала до остановки. В данном случае это кинетическая энергия вращательного движения (4.6). Сопоставим энергии, которыми обладал стержень в первом и втором случае: $\dfrac{Q_2}{Q_1} = \dfrac{E_2}{E_1} = \dfrac{I\omega_2{}^2}{2}\dfrac{2}{I\omega_1{}^2} = \left(\dfrac{3\omega_1}{\omega_1}\right)^2 = 9.$ Правильный ответ № 2.

Задание 38(4)

На частицу, находящуюся в начале координат, действует сила $\vec{F} = 4\vec{i} + 5\vec{j}$.

Работа, совершенная этой силой при перемещении частицы из начала координат в точку с координатами (4; 3), равна...

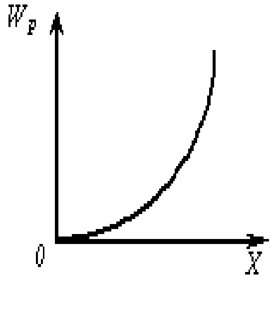
1) 9 Дж;
2) 12 Дж;
3) 27 Дж;
4) 31 Дж.

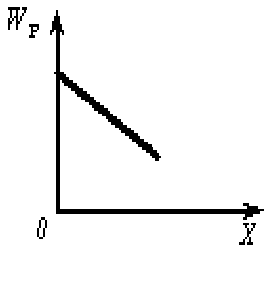
Решение

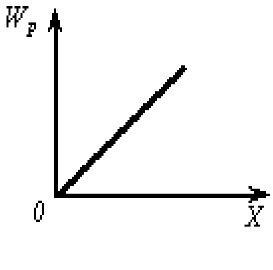
Механическая работа постоянной силы определяется формулой (4.2). Воспользуемся правилом скалярного произведения векторов: $\vec{F} \cdot \vec{r} = F_x r_x + F_y r_y = 4 \cdot 4 + 5 \cdot 3 = 31$ Дж. Правильный ответ № 4.

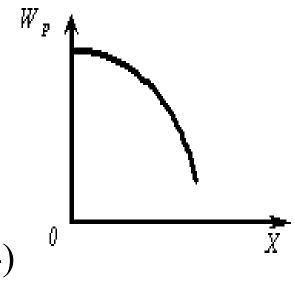
Задание 39(4)

В потенциальном поле сила определяется градиентом потенциальной энергии W_p. На рисунках (1–4) представлены зависимости потенциальной энергии W_p от координаты.

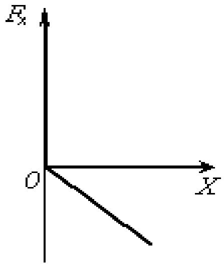
(1) 

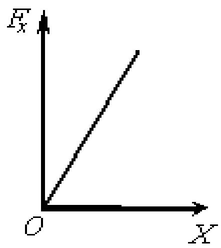
(2) 

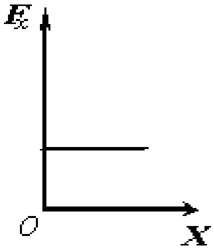
(3) 

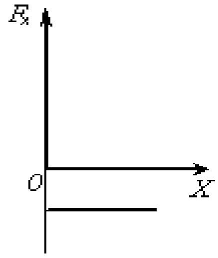
(4) 

Для каждого случая соответствующая зависимость проекции силы F_x на ось x будет…

(A) 

(B) 

(C) 

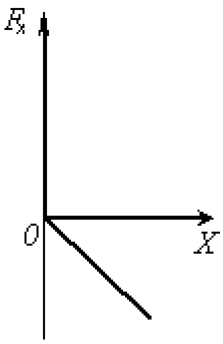
(D) 

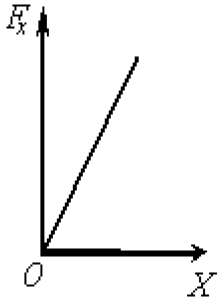
Решение

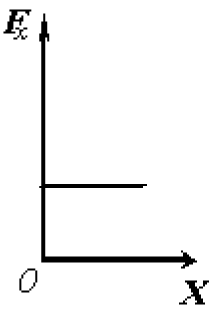
В потенциальном поле сила определяется градиентом потенциальной энергии (4.11), для проекций на ось x выберем формулу (4.12). На первом графике зависимость потенциальной энергии от координаты задается параболой – это квадратичная зависимость $W_p = ax^2$. Производной от этой функции будет линейная функция. С учетом минуса перед градиентом, правильный ответ на графике А. На втором графике зависимость потенциальной энергии от координаты задается прямой – это линейная зависимость $W_p = b - kx$. Производной от этой функции будет константа. С учетом минуса перед градиентом, правильный ответ на графике С. На третьем графике зависимость потенциальной энергии от координаты задается прямой – это линейная зависимость $W_p = kx$. Производной от этой функции будет константа. С учетом минуса перед градиентом, правильный ответ на графике D. На четвертом графике зависимость потенциальной энергии от координаты задается параболой – это квадратичная зависимость $W_p = -ax^2 + b$. Производной от этой функции будет линейная функция. С учетом минуса перед градиентом, правильный ответ на графике В.

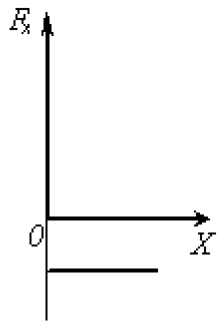
Задание 40(4)

Укажите, какой график дает зависимость проекции силы F_x на ось x, если потенциальная энергия равна $W_p = ax^2 - by^2$.

(1) 

(2) 

(3) 

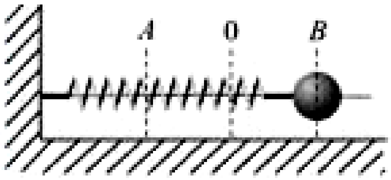
(4) 

Решение

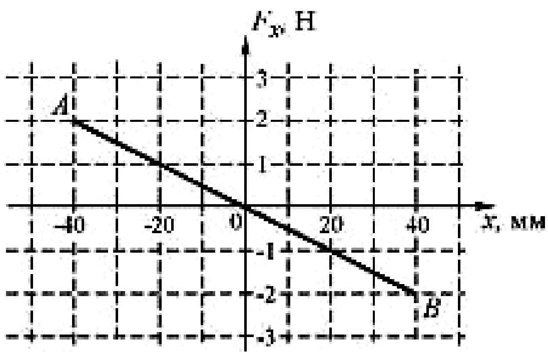
В потенциальном поле сила определяется градиентом потенциальной энергии W_p (4.11). Графики отражают зависимость силы только от координаты x. Координата y, присутствующая в функции потенциальной энергии, на результат не влияет, воспользуемся формулой (4.12). Зависимость потенциальной энергии от координаты x квадратичная. Производной от этой функции будет линейная функция. С учетом минуса перед градиентом, правильный ответ – график № 1.

Задание 41(4)

Шарик, прикрепленный к пружине и насаженный на горизонтальную направляющую, совершает гармонические колебания. Положение равновесия соответствует точке 0.



На графике представлена зависимость проекции силы упругости пружины на положительное направление оси x от координаты шарика.



Работа силы упругости на этапе 0 – A – B равна...

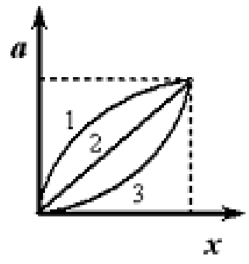
1) 0Дж;
2) 0,04 Дж;
3) 0,08 Дж;
4) – 0,04 Дж.

Решение

Численно работу можно определить как площадь под графиком $F(x)$ (4.1). На участке 0 – A работа силы упругости отрицательна, на участке A – 0 – положительна, эти работы равны по модулю и в сумме дают 0. На участке 0 – B работа силы упругости отрицательна (так как шарик движется вправо, а сила упругости направлена влево) и равна площади под графиком – 0,04 Дж. Правильный ответ № 4.

Задание 42(4)

На рисунке изображены зависимости ускорений трех прямолинейно движущихся материальных точек одинаковой массы от координаты x.



Для работ A_1, A_2, A_3 сил, действующих на точки, справедливо следующее соотношение:

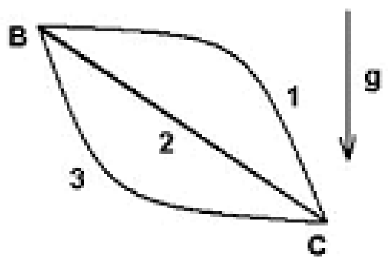
1) $A_1<A_2<A_3$;
2) $A_1<A_2>A_3$;
3) $A_1>A_2<A_3$;
4) $A_1>A_2>A_3$.

Решение

Ускорение, сообщаемое точке, пропорционально силе, действующей на точку (2.3). В первом случае как ускорение, так и сила были наибольшими, а значит и работа A_1 – наибольшая (4.1). Во втором случае все величины меньше, а в третьем – наименьшие. Перемещение везде одинаково. Правильный ответ № 4.

Задание 43(4)

Соотношение работ силы тяжести при движении тела из точки B в точку C по разным траекториям имеет вид, показанный на рисунке.



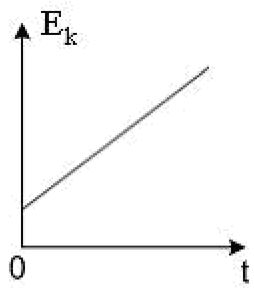
1) $A_1 < A_2 < A_3$;
2) $A_1 = A_2 = A_3 \neq 0$;
3) $A_1 > A_2 > A_3$;
4) $A_1 = A_3 > A_2$;
5) $A_1 = A_2 = A_3 = 0$.

Решение

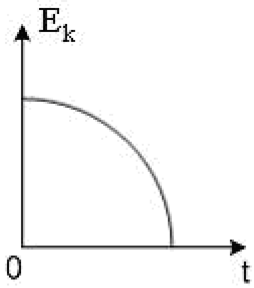
Работа любой консервативной силы, в том числе силы тяжести, равна изменению потенциальной энергии, взятому с обратным знаком (4.18). Изменение потенциальной энергии при перемещении из точки B в точку C одинаково во всех трех случаях и не равно 0, так как точки находятся на разной высоте. Работы тоже одинаковы и не равны 0. Правильный ответ № 2.

Задание 44(4)

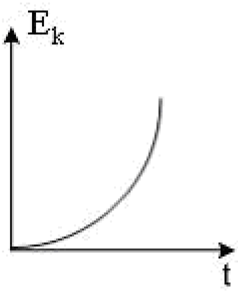
Тело брошено горизонтально с некоторой высоты с начальной скоростью. Какой из графиков дает зависимость от времени кинетической энергии тела.



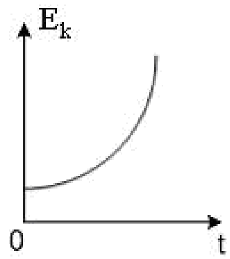
(1)



(2)



(3)



(4)

Решение

Скорость тела в данном случае зависит от времени линейно (1.11), так как тело движется с постоянным ускорением. Кинетическая энергия квадратично зависит от скорости (4.5), а значит и от времени. В начальный момент времени тело обладало скоростью и некоторой ненулевой кинетической энергией (4.5). Правильный ответ № 4.

Тема 5. ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В МЕХАНИКЕ

Необходимо знать:

– законы сохранения: импульса, момента импульса, полной механической энергии.

Краткая теория

Закон сохранения импульса: «Импульс замкнутой системы тел остается постоянным»:

$$\vec{p} = \text{const}. \tag{5.1}$$

Замкнутая механическая система – это система тел, взаимодействующих между собой и не взаимодействующих с другими телами.

Закон сохранения момента импульса: «Момент импульса замкнутой системы тел остается постоянным»:

$$\vec{L} = \text{const}. \tag{5.2}$$

Закон сохранения механической энергии: «Полная механическая энергия системы тел остается постоянной, если в ней действуют только консервативные силы»:

$$E = \text{const}. \tag{5.3}$$

Консервативные силы – это силы, работа которых по любой замкнутой траектории равна нулю. В механике консервативными являются сила тяготения, сила тяжести, сила упругости.

Диссипативные (*неконсервативные*) *силы* – силы, при действии которых на механическую систему её полная механическая энергия убывает, переходя в другие немеханические формы энергии, например в теплоту. В механике к диссипативным относятся сила трения, сила сопротивления.

Типовые тестовые задания

Задание 45(4)

Сплошной и полый цилиндры, имеющие одинаковые массы и радиусы, *вкатываются* на горку с одинаковой начальной скоростью.

Какой из цилиндров поднимется выше?
1) сплошной;
2) полый;
3) оба одинаково.

Решение

На цилиндры действуют только консервативные силы, значит их полная механическая энергия будет сохраняться (5.3). При этом кинетическая энергия будет переходить в потенциальную. Кинетические энергии поступательного движения (4.5) у цилиндров одинаковые. Кинетическая энергия вращательного движения (4.6) у полого цилиндра больше, так как у него больше момент инерции (3.7), (3.8), значит конечная потенциальная энергия у него будет больше и на горку он закатится выше (4.9). Правильный ответ № 2.

Задание 46(5)

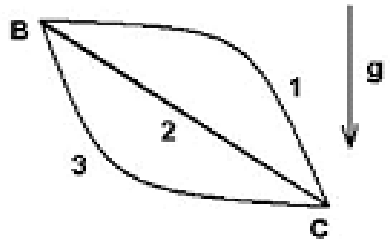
Обруч и диск, имеющие одинаковые массы и радиусы, *скатываются* с горки с одинаковой высоты.

У какого тела при скатывании скорость будет больше?
1) у диска;
2) у обруча;
3) у обоих одинаковая.

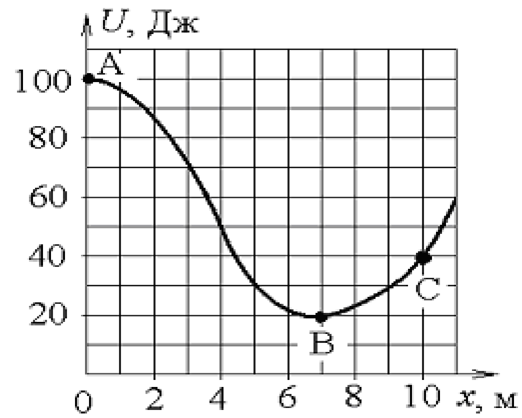
Решение

На диск и обруч действуют только консервативные силы, значит их полная механическая энергия будет сохраняться (5.3). При этом их потенциальная энергия будет переходить в кинетическую энергию поступательного и вращательного движения. Потенциальные энергии диска и обруча одинаковы (4.9), значит и кинетические энергии после скатывания будут одинаковыми (4.7). Согласно формуле (4.7) при одинаковой кинетической энергии, чем больше момент инерции тела, тем меньше его угловая скорость и тем медленнее оно будет скатываться. Момент инерции диска меньше, чем у кольца (3.7), (3.8), значит скатится с большей скоростью диск. Правильный ответ № 1.

Задание 47(5)



Небольшая шайба начинает движение без начальной скорости по гладкой ледяной горке из точки А. Сопротивление воздуха пренебрежимо мало. Зависимость *потенциальной энергии* шайбы от координаты изображена на графике $U(x)$,



Кинетическая энергия шайбы в точке С …

1) в 1,33 раза больше , чем в точке В;
2) в 2 раза меньше, чем в точке В;
3) в 2 раза больше, чем в точке В;
4) в 1,33 раза меньше, чем в точке В.

Решение

В точке А покоящаяся шайба обладала только потенциальной энергией, равной 100 Дж. Полная механическая энергия шайбы тоже равна 100 Дж (4.13). Так как горка гладкая и сопротивления воздуха нет, на шайбу действуют только сила тяжести и сила реакции опоры, и полная механическая энергия сохраняется (5.3). В точке В она складывается (4.13) из потенциальной энергии, равной

20 Дж, и кинетической энергии, равной 80 Дж. В точке С она складывается (4.13) из потенциальной энергии, равной 40 Дж, и кинетической энергии, равной 60 Дж. Отношение кинетической энергии в точке С к кинетической энергии в точке В равно 1,33. Правильный ответ № 4.

Задание 48(5)

Два тела двигались к стенке с одинаковыми скоростями и при ударе остановились. Первое тело катилось, второе скользило. Сравните массы тел, если при ударе выделилось одинаковое количество тепла.

1) масса первого тела больше;
2) масса второго тела больше;
3) массы одинаковы;
4) массы могут быть любыми.

Решение

Первое тело обладало кинетической энергией как поступательного, так и вращательного движения (4.7), а второе – только поступательного (4.5). При ударе кинетические энергии тел перешли в тепло. По условию теплота выделилась одинаковая, значит и кинетическая энергия тел была одинаковая. При этом кинетическая энергия поступательного движения второго тела больше. Скорости тел одинаковы, значит масса второго тела больше (4.5). Правильный ответ № 2.

Задание 49(5)

На неподвижный бильярдный шар налетел другой такой же с импульсом p = 0,5 кг·м/с. После удара шары разлетелись под углом 90° так, что импульс первого шара стал p_1 = 0,3 кг·м/с. Импульс второго шара после удара…

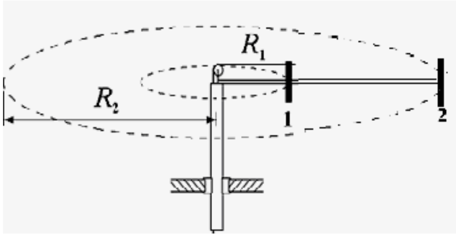
1) 0,2 кг · м/с;
2) 0,4 кг · м/с;
3) 0,3 кг · м/с;
4) 0,5 кг · м/с.

Решение

Согласно закону сохранения импульса (5.1) суммарный импульс шаров после удара равен импульсу движущегося шара до удара: $\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2$. Из правила сложения векторов следует, что импульсы p_1 и p_2 являются катетами прямоугольного треугольника, а импульс p – гипотенузой. По теореме Пифагора p_2 = 0,4 кг · м/с. Правильный ответ № 2.

Задание 50(5)

Вокруг неподвижной оси с угловой скоростью ω_1 свободно вращается система из невесомого стержня и массивной шайбы, которая удерживается нитью на расстоянии R_1 от оси вращения. Нить медленно освобождают, в результате чего шайба соскальзывает на расстояние $R_2 = 2\,R_1$ от оси вращения. Угловая скорость системы, когда шайба окажется в положении 2, равна...



1) $2\omega_1$;
2) $4\omega_1$;
3) $\omega_1/2$;
4) $\omega_1/4$.

Решение

При вращении системы выполняется закон сохранения момента импульса (5.2). Момент импульса определяется произведением момента инерции на угловую скорость (3.14). При удалении шайбы от оси вращения в 2 раза, её момент инерции увеличится в 4 раза (3.4) (шайбу считаем материальной точкой). При этом угловая скорость системы уменьшится в 4 раза (3.14). Правильный ответ № 4.

Задание 51(5)

Какие законы сохранения выполняются в системе, если на ее тела: А) не действуют внешние силы, а среди внутренних сил есть диссипативные? В) действуют только внутренние консервативные силы?

1) закон сохранения импульса;
2) закон сохранения момента импульса;
3) закон сохранения механической энергии.

Решение

В случае А правильные ответы № 1 и № 2 (5.1), (5.2). В случае В правильные ответы № 1, № 2, № 3 (5.1), (5.2), (5.3).

Задание 52(5)

Человек сидит в центре вращающейся по инерции вокруг вертикальной оси карусели и держит в руках длинный шест за его середину. Как изменится частота вращения, если человек повернет шест из горизонтального положения в вертикальное?

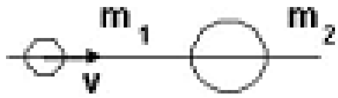
1) увеличится;
2) уменьшится;
3) не изменится.

Решение

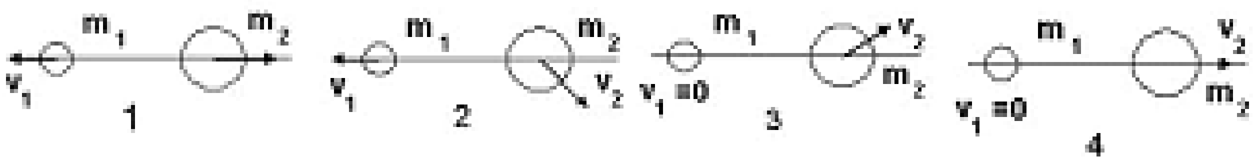
При вращении человека на карусели выполняется закон сохранения момента импульса (5.2). При повороте шеста из горизонтального положения в вертикальное, его момент инерции уменьшится, при этом согласно формуле (3.10), (3.4) увеличится его угловая скорость и частота вращения. Правильный ответ № 1.

Задание 53(5)

Шар массы m_1, имеющий скорость V, налетает на неподвижный шар массы m_2.



Правильный вариант ответа направления скорости V_1 и V_2 после столкновения показан на рисунке…



Решение

Шары после удара будут двигаться согласно закону сохранения импульса (5.1). До удара полный импульс системы был направлен вправо, значит и после удара полный импульс будет направлен вправо. Рисунки 2 и 3 этому условию не удовлетворяют. Первый шар сможет полностью передать свой импульс второму шару (как на рисунке 4), если массы шаров одинаковы. По условию массы шаров разные, правильный ответ показан на рисунке 1.

Задание 54(5)

Шарик массой m падает с высоты h на горизонтальную плиту. Изменение импульса шарика в результате удара, если шарик упруго отскочил от плиты вверх, равно…

1) $2m\sqrt{2gh}$;

2) $m\sqrt{2gh}$;

3) $2m\sqrt{gh}$;

4) $m\sqrt{gh}$.

Решение

Изменение импульса шарика при ударе $\Delta\vec{p} = \vec{p}_2 - \vec{p}_1$. Импульсы p_1 и p_2 равны по модулю и противоположны по направлению, так как удар абсолютно упругий. По модулю изменение импульса $\Delta p = p_1 + p_2 = 2p_1$. Выразим импульс шарика перед ударом p_1 через его энергию. Кинетическая энергия, которой обладал шарик при подлете к плите (4.5) равна $E_к = \frac{mV^2}{2} = \frac{p_1{}^2}{2m}$. Отсюда $p_1 = \sqrt{2mE_к}$. Кинетическую энергию найдем из закона сохранения энергии: при падении на шарик действует только сила тяжести, при этом его полная механическая энергия сохраняется (5.3), потенциальная энергия на высоте h переходит в кинетическую при подлете к плите: $E_к = E_п = mgh$ (4.9). Подставив эти выражения в формулу для изменения импульса, получим: $\Delta p = 2p_1 = 2\sqrt{2mE_к} = 2\sqrt{2mmgh} = 2m\sqrt{2gh}$. Правильный ответ № 1.

Тема 6. СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ (СТО)

Необходимо знать:

– постулаты СТО;

– преобразования Лоренца;

– следствия из преобразований Лоренца: сокращение длины, замедление времени, преобразование скоростей;

– релятивистский импульс;

– релятивистская масса;

– полная энергия;

– энергия покоя;

– кинетическая энергия релятивистской частицы.

Краткая теория

СТО – это теория, описывающая движение, законы механики и пространственно-временные отношения при произвольных скоростях движения тел, меньших скорости света в вакууме, в том числе близких к скорости света.

Первый постулат СТО (*Принцип относительности Эйнштейна*): «Все законы природы инвариантны по отношению к переходу от одной инерциальной системы отсчета к другой. Это означает, что во всех инерциальных системах физические законы (не только механические) имеют одинаковую форму».

Второй постулат СТО (*Принцип постоянства скорости света*): «Скорость света в вакууме не зависит от скорости движения источника света или наблюдателя и одинакова во всех инерциальных системах отсчета. Это предельная скорость передачи взаимодействий и сигналов из одной точки пространства в другую».

$c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме.

Преобразования Лоренца – кинематические формулы преобразования координат и времени в СТО. Они устанавливают связь между координатами (x, y, z) и моментом времени t события, наблюдаемого в системе отсчета K, и координатами (x', y', z') и моментом времени t' этого же события, наблюдаемого в системе отсчета K'. В частности, если K'-система движется вдоль оси x K-системы со скоростью V = const, близкой к скорости света в вакууме:

При переходе $K \to K'$:

$$x' = \frac{x - Vt}{\sqrt{1-(V/c)^2}}, \tag{6.1}$$

$$y' = y, \tag{6.3}$$

$$z' = z, \tag{6.5}$$

$$t' = \frac{t - xV/c^2}{\sqrt{1-(V/c)^2}}. \tag{6.7}$$

При переходе $K' \to K$:

$$x = \frac{x' + Vt'}{\sqrt{1-(V/c)^2}}, \tag{6.2}$$

$$y = y', \tag{6.4}$$

$$z = z', \tag{6.6}$$

$$t = \frac{t' + x'V/c^2}{\sqrt{1-(V/c)^2}}. \tag{6.8}$$

Следствия из преобразований Лоренца:

1.*Относительность одновременности*: «События, происходящие одновременно в одной системе отсчета могут быть неодновременными в другой системе отсчета; принцип причинности при этом не нарушается».

2. *Относительность длительности событий*: «Длительность события, происходящего в некоторой точке, различна в разных системах отсчета. Наименьшую длительность событие имеет в той системе отсчета, в которой оно покоится»:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1-(V/c)^2}}. \tag{6.9}$$

3. *Относительность размеров тел*: «Длина тела, измеренная в разных системах отсчета, различна. Линейные размеры тела наибольшие в той системе отсчета, в которой тело покоится»:

$$l = l_0\sqrt{1-(V/c)^2}. \tag{6.10}$$

4. *Релятивистский закон сложения скоростей*: При движении частицы в K'-системе со скоростью U'_x её скорость в K-системе, относительно которой K'-система движется со скоростью V:

$$U_x = \frac{U'_x + V}{1 + V \cdot U'_x / c^2}. \tag{6.11}$$

5. *Пространственно-временной интервал* является инвариантом, т.е. не изменяется при переходе из одной инерциальной системы в другую.

Пространственно-временной интервал – это величина, характеризующая событие в четырехмерном пространстве-времени Эйнштейна.

$$\Delta S = \sqrt{c^2(t_2 - t_1)^2 - (x_2 - x_1)^2 - (y_2 - y_1)^2 - (z_2 - z_1)^2} \qquad (6.12)$$

или $\Delta S = \sqrt{c^2 \Delta t^2 - l^2}$. (6.13)

Релятивистская масса частицы увеличивается с увеличением её скорости:

$m = \dfrac{m_0}{\sqrt{1-(V/c)^2}}$, , где m_0 – масса покоя частицы. (6.14)

Релятивистский импульс частицы:

$$\vec{p} = m\vec{V} = \frac{m_0\vec{V}}{\sqrt{1-(V/c)^2}}. \qquad (6.15)$$

Энергия покоя – это энергия, которой обладает покоящееся тело:

$$E_0 = m_0 c^2, \qquad (6.16)$$

где m_0 – масса покоящегося тела.

Полная энергия – это сумма энергии покоя и кинетической энергии системы:

$$E = m_0 c^2 + E_к. \qquad (6.17)$$

Закон взаимосвязи массы и энергии: «Полная энергия системы равна произведению её массы на квадрат скорости света в вакууме»:

$$E = mc^2. \qquad (6.18)$$

Отсюда *кинетическую энергию релятивистской частицы* можно представить как разность полной энергии и энергии покоя:

$$E_к = E - m_0 c^2. \qquad (6.19)$$

Типовые тестовые задания

Задание 55(6)

Космический корабль с двумя космонавтами летит со скоростью $V = 0{,}6\ c$ (c – скорость света в вакууме). Один из космонавтов медленно поворачивает метровый стержень из положения 1, перпендикулярного направлению движения, в положение 2, параллельное этому направлению. Тогда длина стержня с точки зрения другого космонавта…

1) изменится с 1,0 м в положении 1 до 1,67 м в положении 2;
2) равна 1,0 м при любой его ориентации;
3) изменится от 1,0 м в положении 1 до 0,6 м в положении 2;
4) изменится от 0,6 м в положении 1 до 1,0 м в положении 2.

Решение

Так как стержень покоится относительно обоих космонавтов, его размеры не меняются (6.10). Правильный ответ № 2.

Задание 56(6)

Космический корабль удаляется от Земли со скоростью $V = 0{,}8\ c$ (c – скорость света в вакууме). Космонавт, находящийся на корабле, медленно поворачивает метровый стержень из положения 1, параллельного направлению движения, в положение 2, перпендикулярное этому направлению. Длина стержня с точки зрения земного наблюдателя...

1) изменится с 1,0 м в положении 1 до 1,67 м в положении 2;
2) равна 1,0 м при любой его ориентации;
3) изменится от 1,0 м в положении 1 до 0,6 м в положении 2;
4) изменится от 0,6 м в положении 1 до 1,0 м в положении 2.

Решение

Стержень вместе с кораблем движется относительно земного наблюдателя. При этом его линейные размеры сокращаются в направлении движения. Поперечные размеры тела не изменяются (6.3). В положении 1 согласно формуле (6.10) длина стержня составляла $l = l_0\sqrt{1-(V/c)^2} = 1\sqrt{1-(0{,}8c/c)^2} = 0{,}6$ м.

При повороте перпендикулярно направлению движения длина стержня составила 1 м. Таким образом, длина стержня с точки зрения наблюдателя, находящегося на Земле, изменяется от 0,6 м в положении 1 до 1,0 м в положении 2. Правильный ответ № 4.

Задание 57(6)

Космический корабль приближается к Земле со скоростью $V = 0{,}6\ c$ (c – скорость света в вакууме). Космонавт и земной наблюдатель измеряют длительность некоторого процесса, происходящего на корабле. По часам космонавта длительность этого процесса равна 6,0 с. Длительность того же процесса (в секундах) по часам земного наблюдателя составляет...

1) 6,0 с;
2) 6,6 с;
3) 7,5 с;
4) 9,6 с.

Решение

Время течет по-разному в системе отсчета, связанной с кораблем, и в системе отсчета, связанной с Землей (6.9). Относительно космонавта событие покоится, значит он измеряет его собственное время. По часам земного наблюдателя пройдет $\Delta t = \dfrac{\Delta \mathrm{t}_0}{\sqrt{1-(V/c)^2}} = \dfrac{6{,}0}{\sqrt{1-(0{,}6c/c)^2}} = 7{,}5$ с. Правильный ответ № 3.

Задание 58(6)

Космический корабль удаляется от Земли со скоростью $V = 0{,}6\ c$ (c – скорость света в вакууме). Космонавт и земной наблюдатель измеряют длительность некоторого процесса, происходящего на Земле. По часам земного наблюдателя длительность этого процесса равна 12,0 с. Найти длительность того же процесса (в секундах) по часам космонавта.

1) 6,0 с;
2) 7,2 с;
3) 12,0 с;
4) 15,0 с.

Решение

Время течет по-разному в системе отсчета, связанной с кораблем, и в системе отсчета, связанной с Землей (6.9). Относительно земного наблюдателя событие покоится, значит он измеряет его собственное время. По часам движущегося космонавта пройдет $\Delta t = \dfrac{\Delta \mathrm{t}_0}{\sqrt{1-(V/c)^2}} = \dfrac{12{,}0}{\sqrt{1-(0{,}6c/c)^2}} = 15$ с. Правильный ответ № 4.

Задание 59(6)

Пи-ноль-мезон, двигавшийся со скоростью 0,8 c (где c – скорость света в вакууме) в лабораторной системе отсчета, распадается на два фотона γ_1 и γ_2. В собственной системе отсчета мезона фотон γ_1 был испущен вперед, а фотон γ_2 – назад относительно направления полета мезона. Чему равна скорость фотона γ_2 в лабораторной системе отсчета?

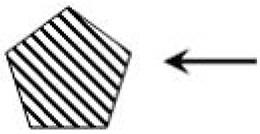
1) –1,0 с;
2) 1,8 с;
3) –0,2 с;
4) 1,0 с.

Решение

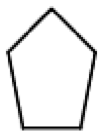
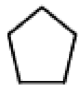
Фотон может существовать, только двигаясь со скоростью c, т. е. со скоростью света в вакууме. Согласно второму постулату скорость света в вакууме не зависит от движения источника света и, следовательно, одинакова во всех инерциальных системах отсчета. Поэтому скорость фотона Y_2 с учетом направления его движения в лабораторной системе отсчета равна –1,0 с. Правильный ответ № 1.

Задание 60(6)

На борту космического корабля нанесена эмблема в виде геометрической фигуры.



Из-за релятивистского сокращения длины эта фигура изменяет свою форму. Если корабль движется в направлении, указанном на рисунке стрелкой, со скоростью, сравнимой со скоростью света, то в неподвижной системе отсчета эмблема примет форму, указанную на рисунке…

(1)  (2)  (3) 

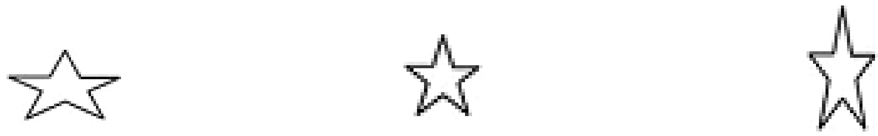
Решение

Размер тела, движущегося с релятивистской скоростью, сокращается в направлении скорости (6.10). Другие размеры тела не изменяются. Правильный ответ № 2.

Задание 61(6)

На борту космического корабля нанесена эмблема в виде геометрической фигуры.

Из-за релятивистского сокращения длины эта фигура изменяет свою форму. Если корабль движется в направлении, указанном на рисунке стрелкой со скоростью, сравнимой со скоростью света, то в неподвижной системе отсчета эмблема примет форму, указанную на рисунке…



(1) (2) (3)

Решение

Размер тела сокращается в направлении скорости (6.10). Другие размеры тела не изменяются. Правильный ответ № 1.

Задание 62(6)

Какая из ниже приведенных формул определяет A) кинетическую энергию, B) импульс, C) энергию покоя, D) полную энергию релятивистской частицы:

$$(1)\ \frac{mc^2}{\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}} \qquad (2)\ \frac{mc^2}{\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}} - mc^2 \qquad (3)\ \frac{m\vec{V}}{\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}} \qquad (4)\ mc^2$$

Решение

Согласно теории (6.19), (6.15), (6.16), (6.17) правильный ответ A) –2; B) –3; C) –4; D) –1.

Задание 63(6)

Инвариантной величиной является …
1) импульс частицы;
2) скорость света в вакууме;
3) длина предмета;
4) длительность события.

Решение

Согласно второму постулату Эйнштейна правильный ответ № 2.

Задание 64(6)

Относительной величиной является…
1) барионный заряд;
2) длительность события;
3) скорость света в вакууме;
4) электрический заряд.

Решение

Правильный ответ № 2.

Дидактическая единица № 2

МОЛЕКУЛЯРНАЯ (СТАТИСТИЧЕСКАЯ) ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

Контролируемые темы	7	Распределения Максвелла и Больцмана
	8	Средняя энергия молекул
	9	Второе начало термодинамики. Энтропия. Циклы
	10	I начало термодинамики. Работа при изопроцессах

Тема 7. РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАКСВЕЛЛА И БОЛЬЦМАНА

Необходимо знать:

– распределение молекул идеального газа по скоростям и компонентам скорости;

– наиболее вероятная скорость;

– средняя скорость;

– среднеквадратичная скорость;

– зависимость распределения Максвелла от температуры и массы молекул.

Краткая теория

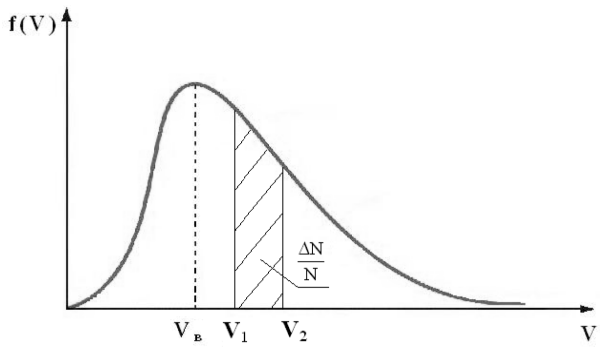
Распределение Максвелла – распределение относительного числа молекул по скоростям – имеет вид:

$$f(\upsilon)=\frac{dN}{N\cdot d\upsilon}=4\pi\left(\frac{m_0}{2\pi kT}\right)^{3/2}\cdot e^{-\frac{m_0\upsilon^2}{2kT}}\cdot\upsilon^2. \qquad (7.1)$$

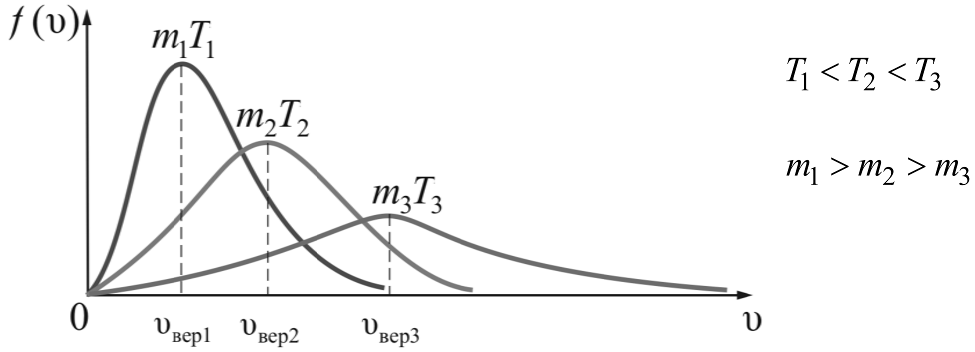
Площадь под кривой определяет общее количество частиц газа, является величиной постоянной и условно для каждого газа принимается за единицу:

$$\int_0^{\infty} f(\upsilon)\,d\upsilon=1. \qquad (7.2)$$

Закон статистический, и выполняется тем лучше, чем больше число молекул (атомов) содержит вещество. Площадь под кривой определяет общее число молекул. Площадь заштрихованной площадки равна относительному числу молекул $\Delta N/N$, имеющих скорость в пределах от υ_1 до υ_2.



Вид распределения молекул газа по скоростям для каждого газа зависит от рода газа (массы молекул m) и от температуры (T). Давление P и объём газа V на распределение молекул не влияют. При повышении температуры T максимум функции распределения молекул по скоростям смещается вправо, кривая растягивается и понижается, а площадь под кривой останется неизменной по условию нормировки. Для газов с большей массой молекул кривая становится выше и уже.



T_1, T_2, T_3 – температуры газа с одной и той же массой молекул;

m_1, m_2, m_3 – массы молекул разных газов при одной и той же температуре.

Наиболее вероятная скорость движения молекул газа, которой соответствует максимум функции распределения Максвелла:

$$\upsilon_{вер} = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{2RT}{M}}. \qquad (7.3)$$

Средняя арифметическая скорость движения молекул газа:

$$\langle \upsilon \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}. \qquad (7.4)$$

Средняя квадратичная скорость движения молекул газа:

$$\upsilon_{кв} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}. \qquad (7.5)$$

Распределение Больцмана – распределение молекул в потенциальном поле в условиях термодинамического равновесия.

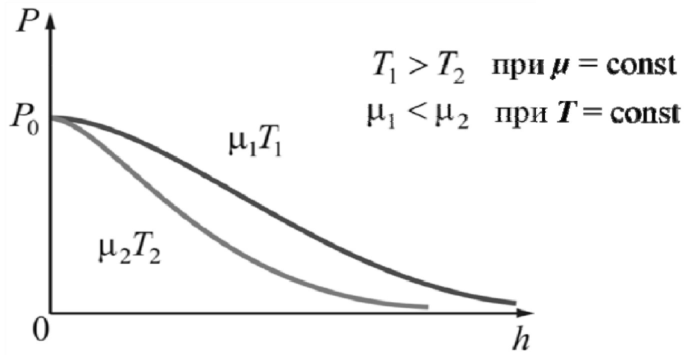
Барометрическая формула характеризует распределение молекул в поле земного тяготения и определяет атмосферное давление на заданной высоте h:

$$p = p_0 \exp\left(-\frac{Mgh}{RT}\right) \qquad (7.6)$$

или концентрацию молекул воздуха на заданной высоте h:

$$n = n_0 \exp\left(-\frac{Mgh}{RT}\right). \qquad (7.7)$$

Вид кривой распределения Больцмана определяется родом газа (молярной массой μ) и его температурой (T). При больших температурах частицы газа обладают большей энергией и могут подняться на большую высоту h, поэтому давление убывает с высотой медленнее. При увеличении массы молекул (молярной массы) газа наблюдается более резкое убывание количества частиц с высотой. Эта зависимость объясняется тем, что более тяжелые молекулы стремятся заполнить положения с наименьшей потенциальной энергией.



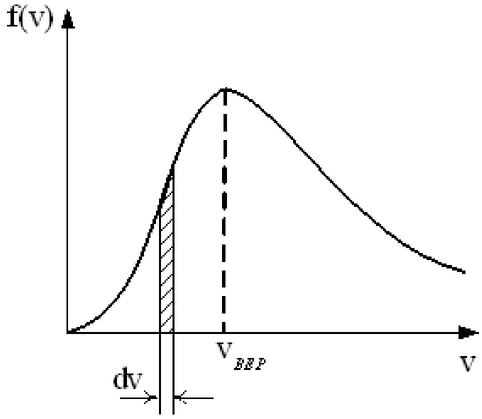
С геометрической точки зрения количество частиц N_{12} в слое сосуда с единичной площадью основания S между уровнями h_1 и h_2 – это площадь под кривой функции распределения Больцмана на интервале [h_1, h_2]. При одинаковом количестве молекул (равенстве площадей под графиками) чем больше масса m_0 молекул газа, тем больше их концентрация n_0 на нулевой высоте.

Типовые тестовые задания

Задание 65(7)

На рисунке представлен график функции распределения молекул идеального газа по скоростям (распределение Максвелла), где $f(v) = \frac{dN}{Ndv}$ – доля молекул, скорости которых заключены в интервале скоростей от v до $v + dv$ в расчете на единицу этого интервала. Для этой функции верными утверждениями являются …

1) площадь заштрихованной полоски равна числу молекул со скоростями в интервале от v до $v + dv$;



2) при понижении температуры величина максимума уменьшается;

3) при понижении температуры площадь под кривой уменьшается;

4) положение максимума кривой зависит как от температуры, так и от природы газа;

5) при изменении температуры положение максимума не изменяется;

6) при изменении температуры площадь под кривой не изменяется;

7) при понижении температуры максимум кривой смещается влево;

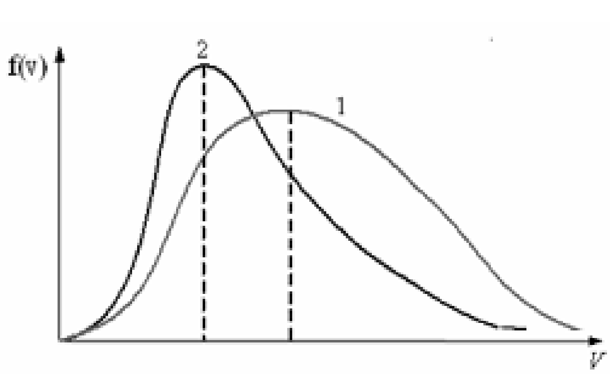
8) площадь заштрихованной полоски с ростом температуры будет уменьшаться.

Решение

Первое утверждение следует из физического смысла функции распределения Максвелла (7.1). Четвертое утверждение следует из вида функции (7.1). Площадь под кривой из условия нормировки (7.2) соответствует общему числу молекул газа и не изменяется при изменении температуры. Максимум кривой соответствует наиболее вероятной скорости движения молекул, при уменьшении температуры скорости движения молекул уменьшаются, наиболее вероятная скорость становится меньше, максимум кривой смещается влево. Площадь заштрихованной полоски с ростом температуры будет уменьшаться, так как при этом будет уменьшаться доля молекул с низкими скоростями. Верными утверждениями являются № 1, № 4, № 6, № 7, № 8.

Задание 66(7)

На рисунке представлены графики функций распределения молекул по скоростям для двух разных идеальных газов при одной и той же температуре (распределение Максвелла), где $f(v) = \frac{dN}{Ndv}$ – доля молекул, скорости которых заключены в интервале скоростей от v до + dv в расчете на единицу этого интервала. Для этих функций верными утверждениями являются…



1) молярная масса первого газа больше, чем второго;

2) при увеличении температуры величина максимумов уменьшается;

3) при увеличении температуры оба максимума сместятся вправо;

4) масса второго газа больше массы первого;

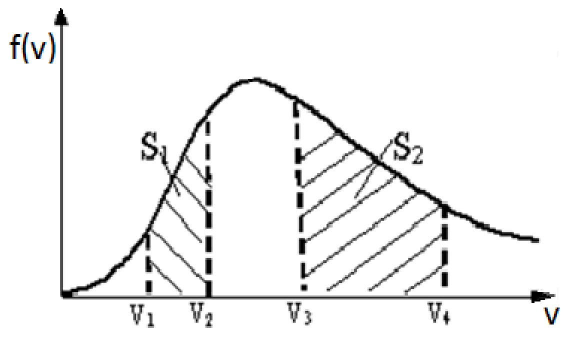
5) наиболее вероятная скорость второго газа меньше, чем первого;

6) количество вещества второго газа больше, чем количество вещества первого газа.

Решение

При одинаковой температуре максимум функции, соответствующий наиболее вероятной скорости, будет расположен левее у газа с большей молярной массой (7.3). В данном случае молярная масса больше у второго газа, у него же наиболее вероятная скорость меньше. Это объясняется тем, что более тяжелые молекулы имеют меньшие скорости. При увеличении температуры максимумы кривых сдвигаются вправо, опускаются ниже, но становятся шире, площади под кривыми остаются неизменными (7.2). Количество вещества и общее количество молекул газа определяется площадью под кривой (7.2), в данном случае для первого газа площадь под кривой незначительно больше, значит и количество вещества первого газа больше. Массы вещества по данным графикам сравнить невозможно, так как они пропорциональны и молярной массе, и количеству вещества (молекул). В данном случае молярная масса второго газа больше, а количество вещества для него меньше, чем для первого. Верные утверждения № 2, № 3, № 5.

Задание 67(7)



На рисунке представлен график функции распределения молекул идеального газа по скоростям (распределение Максвелла), где $f(v)= \frac{dN}{Ndv}$ – доля молекул, скорости которых заключены в интервале скоростей от v до + dv в расчете на единицу этого интервала. Для этой функции верными утверждениями являются…

1) вероятность обнаружить молекулу со скоростью в интервале от V_1 до V_2 больше, чем со скоростью в интервале от V_3 до V_4;

2) число молекул со скоростями от V_1 до V_2 меньше, чем со скоростями от V_3 до V_4;

3) площадь S_2 равна числу молекул, которые имеют скорости от V_3 до V_4;

4) площадь S_1 равна относительному числу молекул, которые имеют скорости от V_1 до V_2;

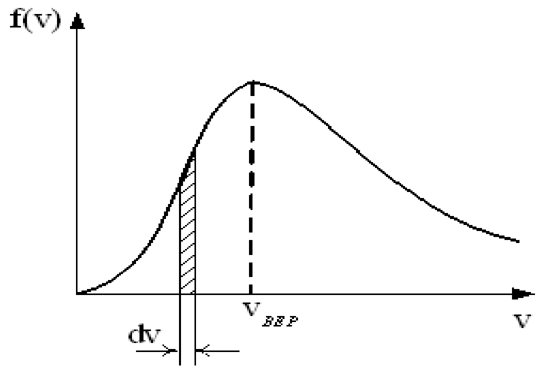
5) число молекул со скоростями в интервале $[V_3\,; V_4]$ равно $S_2 \cdot N$, где N – общее число молекул газа.

Решение

Площадь под кривой определяет относительное число молекул, скорости которых принадлежат данному интервалу скоростей, и вероятность обнаружить молекулу с данной скоростью (7.1). Правильные утверждения № 2, № 4, № 5.

Задание 68(7)

На рисунке представлен график функции распределения молекул идеального газа по скоростям (распределение Максвелла), где $f(v) = \frac{dN}{Ndv}$ – доля молекул, скорости которых заключены в интервале скоростей от v до $+\ dv$ в расчете на единицу этого интервала. Если температура газа повысится, то…



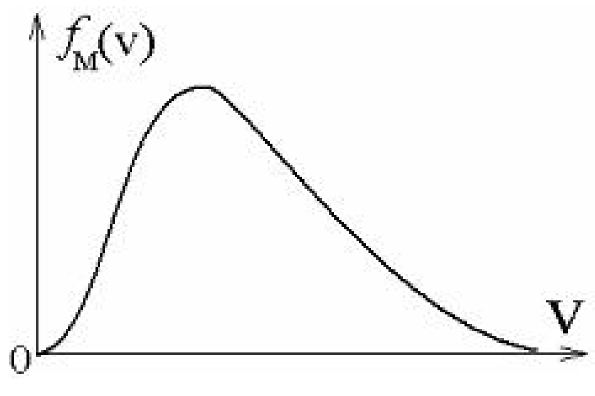
1) максимум кривой сместится влево в сторону меньших скоростей;
2) величина максимума уменьшится;
3) площадь под кривой увеличится;
4) максимум кривой сместится вправо в сторону больших скоростей;
5) величина максимума увеличится;
6) площадь под кривой уменьшится.

Решение

С ростом температуры кривая, описывающая распределение Максвелла, становится ниже и шире, площадь под кривой не изменяется (7.2). Правильные ответы № 2, № 4.

Задание 69(7)

На рисунке представлен график функции распределения молекул идеального газа по величинам скоростей (распределение Максвелла). С ростом температуры T газа площадь под этим графиком будет…



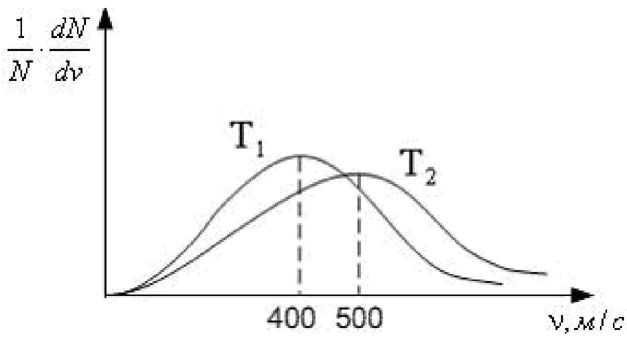
1) расти пропорционально $T^{3/2}$;
2) расти пропорционально T;
3) оставаться неизменной;
4) расти пропорционально $\sqrt{T}$.

Решение

Площадь под кривой характеризует количество частиц газа. С ростом температуры количество молекул газа не изменяется, значит и площадь под кривой меняться не будет (7.2). Правильный ответ № 3.

Задание 70(7)

На рисунке приведены две кривые распределения молекул одного газа по абсолютным скоростям при разных значениях температур. Отношение температур T_2/T_1 равно…



1) 25/16;
2) 4/5;
3) 16/25;
4) 5/4.

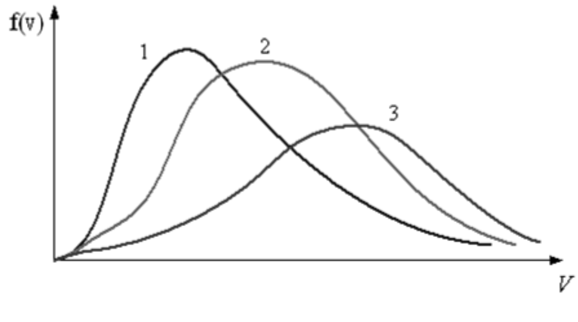
Решение

Максимумы кривых соответствуют наиболее вероятным скоростям молекул газа при температурах T_1 и T_2. Из формулы для наиболее вероятной скорости (7.3) следует, что температуры газов пропорциональны квадратам наиболее вероятных скоростей $T = \frac{\upsilon^2{}_{вер}\mu}{2R}$; отсюда $\frac{T_2}{T_1} = \frac{\upsilon^2{}_{вер2}}{\upsilon^2{}_{вер1}} = \frac{500^2}{400^2} = \frac{25}{16}$. Правильный ответ № 1.

Задание 71(7)

В трех одинаковых сосудах находится одинаковое количество газа, причем $T_1 > T_2 > T_3$.

Распределение скоростей молекул в сосуде с температурой T_3 будет описывать кривая…

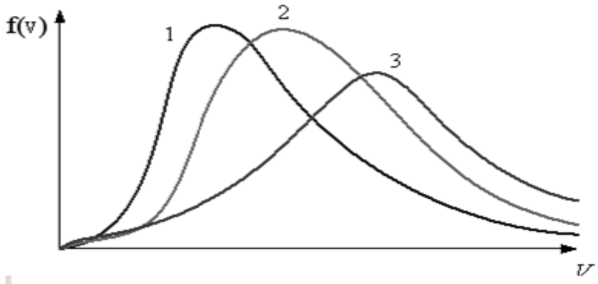


1) 1;
2) 2;
3) 3.

Решение

Самой низкой температуре соответствует кривая, максимум которой достигается при самой низкой скорости молекул, т. е. расположен левее остальных (7.3). Правильный ответ № 1.

Задание 72(7)



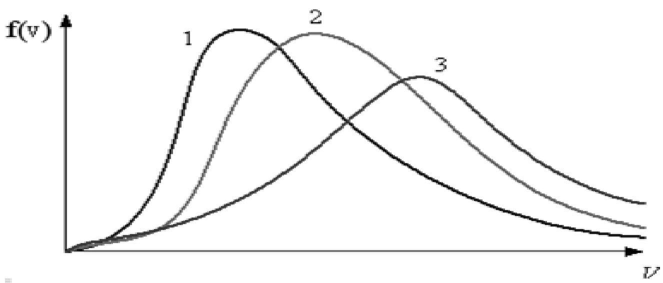
В трех одинаковых сосудах при равных условиях находится одинаковое количество водорода, гелия и азота: H_2; He; N_2. Распределение скоростей молекул гелия будет описывать кривая…

1) 1;
2) 2;
3) 3.

Решение

Представленные газы имеют различные молярные массы, которые можно определить по таблице Менделеева. Наименьшая молярная масса у водорода, наибольшая – у азота. При одинаковой температуре более тяжелые молекулы движутся медленнее, для них кривая смещается влево (7.3). Гелию будет соответствовать кривая со средним положением максимума, так как его молярная масса занимает промежуточное значение между молярными массами водорода и азота. Правильный ответ № 2.

Задание 73(7)



В трех одинаковых сосудах при равных условиях находится одинаковое количество водорода, углекислого газа и кислорода: H_2 , CO_2 , O_2.

Распределение скоростей молекул углекислого газа будет описывать кривая….

1) 1;
2) 2;
3) 3.

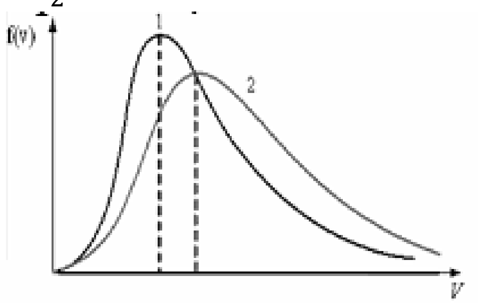
Решение

Представленные газы имеют различные молярные массы, которые можно определить по таблице Менделеева. Наименьшая молярная масса у водорода, наибольшая – у углекислого газа. При одинаковой температуре более тяжелые молекулы движутся медленнее, для них максимум кривой смещается влево (7.3). Углекислому газу будет соответствовать кривая с крайним левым положением максимума, так как его молярная масса наибольшая из трех представленных газов. Правильный ответ № 1.

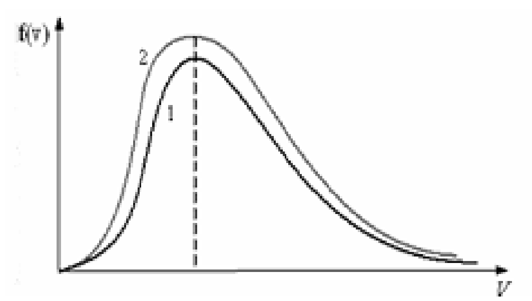
Задание 74(7)

В сосуде, разделенном на равные части неподвижной непроницаемой перегородкой, находится один тот же газ. Температуры газа в каждой части сосуда T_1и T_2. Масса газа в левой и правой половинах сосуда соответственно M_1 и M_2.

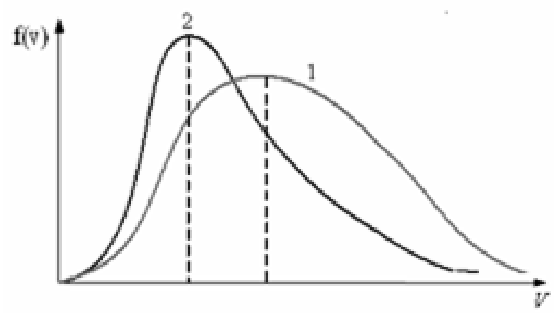
Укажите рисунок, на котором представлены функции распределения $f(v) = {dN}/{dv}$ числа молекул газа по абсолютным значениям их скоростей, если $M_1 > M_2$.



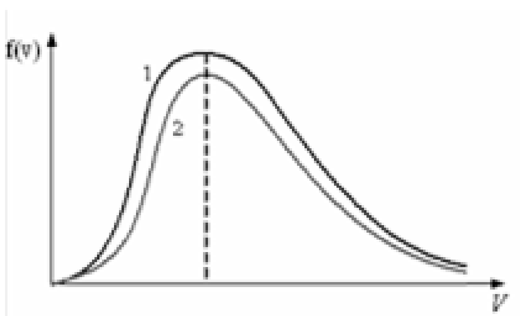
(1)



(2)



(3)



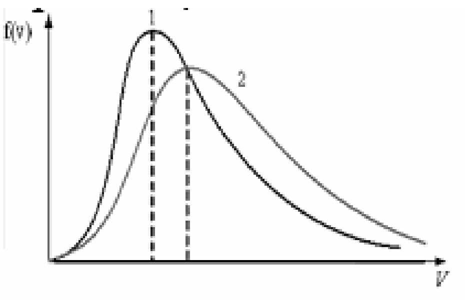
(4)

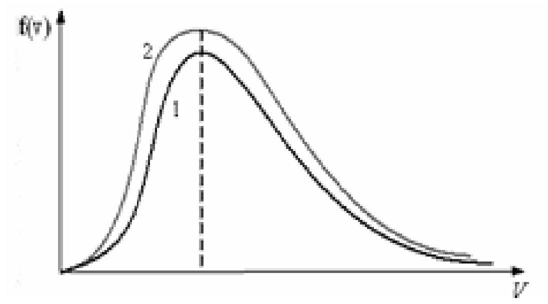
Решение

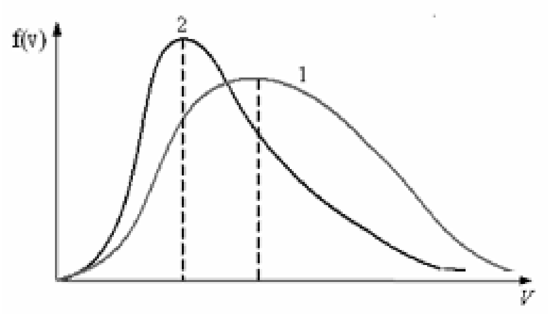
Масса газа в первой половине сосуда больше, значит и количество молекул в этой половине больше. Следовательно, площадь под первой кривой, описывающей распределение молекул в первой части сосуда, тоже больше (7.1), (7.2). Если температуры газа в каждой части сосуда T_1и T_2 не равны, то максимумам кривых будут соответствовать разные скорости (7.3). Правильный ответ № 3.

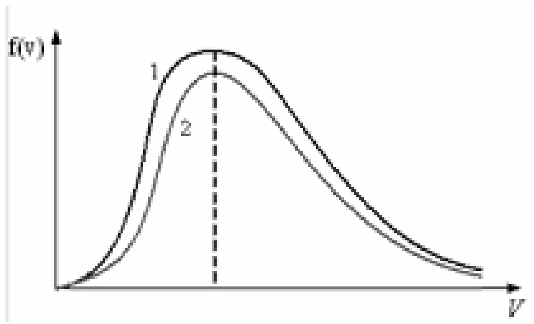
Задание 75(7)

В сосуде, разделенном на равные части неподвижной непроницаемой перегородкой, находятся два различных газа при одинаковой температуре. Молярная масса молекул газа в левой и правой половинах сосуда соответственно M_1 и M_2. Укажите рисунок, на котором представлены функции распределения $f(v) = {dN}/{dv}$ числа молекул газа по абсолютным значениям их скоростей, если $M_1 < M_2$.

(1) 

(2) 

(3) 

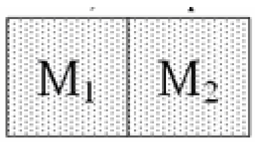
(4) 

Решение

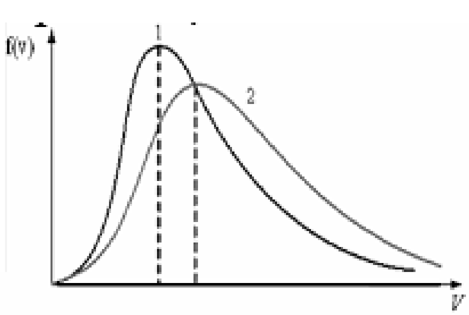
При одинаковой температуре более тяжелые молекулы движутся медленнее, для них максимум кривой смещается влево (7.3). В данном случае максимум второй кривой расположен левее на рисунке 3. Правильный ответ № 3.

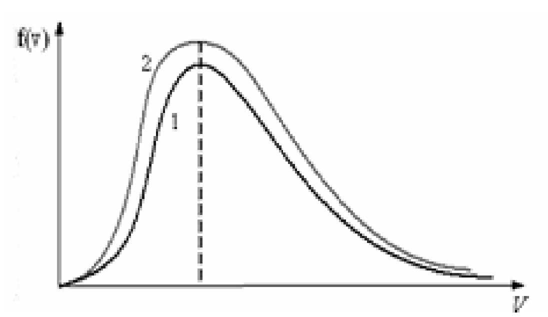
Задание 76(7)

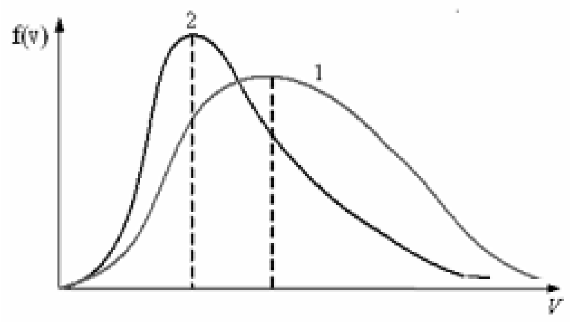
В сосуде, разделенном на равные части неподвижной непроницаемой перегородкой, находится один и тот же газ. Температуры газа в каждой части сосуда равны. Массы газа в левой и правой половинах сосуда соответственно M_1 и M_2.

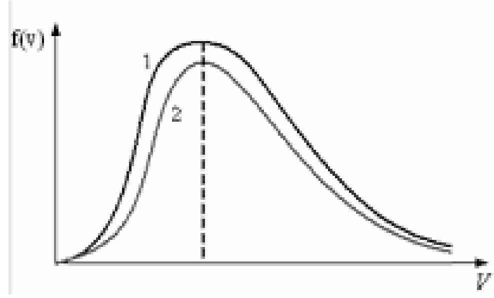


Укажите рисунок, на котором представлены функции распределения $f(v)=dN/dv$ числа молекул газа по абсолютным значениям их скоростей, если $M_1 > M_2$.

(1) 

(2) 

(3) 

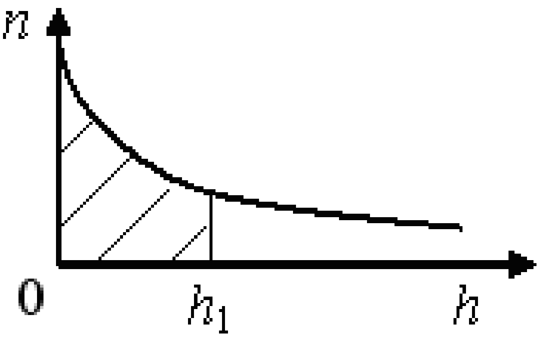
(4) 

Решение

Большей массе газа соответствует большее число молекул и большая площадь под кривой (7.1). Максимумы функций приходятся на одну и ту же наиболее вероятную скорость, так как массы молекул и температура газа в обеих половинах сосуда одинаковы (7.3). Правильный ответ № 4.

Задание 77(7)

На рисунке дан график зависимости концентрации n молекул воздуха от высоты h над поверхностью Земли. Заштрихованная площадь определяет



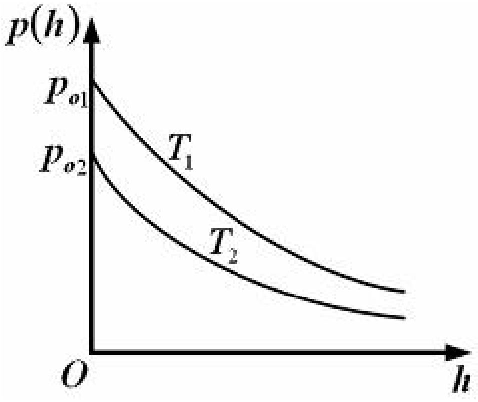
1) концентрацию молекул на высоте h_1;
2) число молекул в столбе высотой h_1 с площадью основания 1 м^2;
3) число молекул в кубе с ребром h_1;
4) среднюю концентрацию молекул на высотах от 0 до h_1.

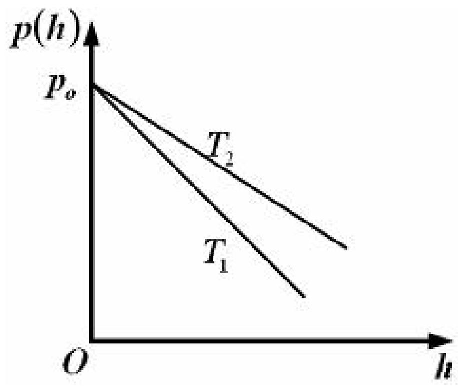
Решение

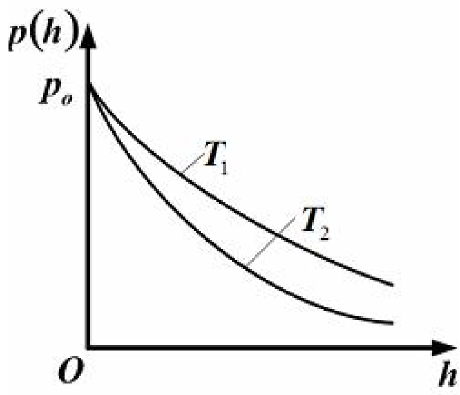
Согласно физическому смыслу распределения Больцмана (7.7), правильный ответ № 2.

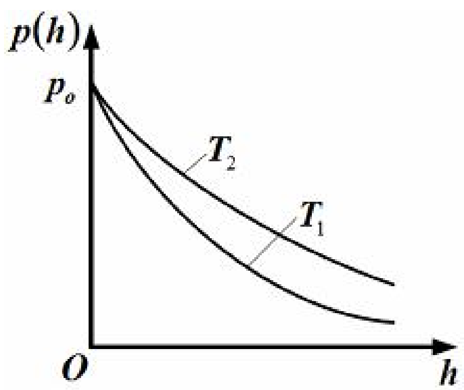
Задание 78(7)

В очень высоком вертикальном цилиндрическом сосуде находится идеальный газ при температуре T_1. Если считать внешнее потенциальное поле сил однородным, то графики зависимости давления от высоты для двух температур T_1 и $T_2 > T_1$ имеют вид, представленный на рисунке…

(1) 

(2) 

(3) 

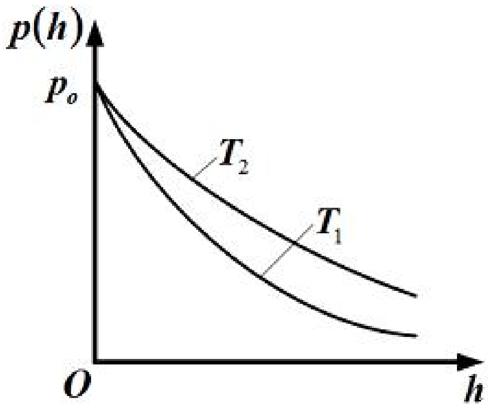
(4) 

Решение

Зависимость давления идеального газа от высоты при некоторой температуре определяется барометрической формулой (7.6). Из нее следует, что при постоянной температуре давление газа уменьшается с высотой по экспоненциальному закону тем медленнее, чем больше температура T. Давление идеального газа на дно сосуда p_0 определяется весом газа и не зависит от температуры. Правильный ответ № 4.

Задание 79(7)

Зависимости давления p идеального газа во внешнем однородном поле силы тяжести от высоты h для двух разных температур представлены на рисунке.



Для графиков этих функций *неверными* являются утверждения, что …

1) температура T_1 выше температуры T_2;

2) давление газа на высоте h равно давлению на «нулевом уровне» ($h = 0$), если температура газа стремится к абсолютному нулю;

3) температура T_1 ниже температуры T_2;

4) зависимость давления идеального газа от высоты определяется не только температурой газа, но и массой молекул.

Решение

Из барометрической формулы (7.6) следует, что зависимость давления от высоты определяется как температурой газа, так и массой его молекул. Для одного и того же газа с повышением температуры зависимость становится все более слабо выраженной, так что молекулы оказываются распределенными по высоте почти равномерно. При понижении температуры давление на высотах, отличных от нуля, убывает, обращаясь в нуль. Правильные ответы № 1, № 2.

Тема 8. СРЕДНЯЯ ЭНЕРГИЯ МОЛЕКУЛ

Необходимо знать:

– степени свободы молекул (поступательные, вращательные, колебательные);

– число степеней свободы одно-, двух- и многоатомных молекул;

– закон о равномерном распределении энергии по степеням свободы;

– теплоемкости газов.

Краткая теория

Число степеней свободы – наименьшее число независимых координат, определяющих положение и конфигурацию молекулы в пространстве:

$$i = i_n + i_{вр} + 2i_к, \tag{8.1}$$

где i_n – число поступательных степеней свободы,

$i_{вр}$ – число вращательных степеней свободы,

$i_к$ – число колебательных степеней свободы.

Для одноатомной молекулы: $i_n = 3$, $i_{вр} = 0$, $i_к = 0$, $i = 3$;

Для двухатомной молекулы с жесткой связью: $i_n = 3$, $i_{вр} = 2$, $i_к = 0$, $i = 5$;

Для многоатомной молекулы с жесткой связью: $i_n = 3$, $i_{вр} = 3$, $i_к = 0$, $i = 6$.

Закон о равномерном распределении энергии по степеням свободы: «На каждую степень свободы молекулы приходится в среднем одинаковая энергия, равная

$$\langle E_k \rangle = \frac{1}{2}kT, \tag{8.2}$$

где $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана».

Средняя кинетическая энергия *поступательного движения* для любых молекул равна

$$\langle E_k \rangle = \frac{3}{2} kT. \tag{8.3}$$

Средняя кинетическая энергия молекул равна

$$\langle E_k \rangle = \frac{i}{2} kT. \tag{8.4}$$

Теплоемкость – это физическая величина, характеризующая количество теплоты, необходимой телу для его нагревания на 1 градус. Различные по природе тела одинаковой массы требуют для своего нагревания различное количество тепла:

$$C = \frac{Q}{\Delta T}. \tag{8.5}$$

Удельная теплоемкость – это физическая величина, характеризующая количество теплоты, которое необходимо передать 1 кг вещества для его нагревания на 1 градус:

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T}. \tag{8.6}$$

Молярная теплоемкость – это физическая величина, характеризующая количество теплоты, которое необходимо передать 1 молю вещества для его нагревания на 1 градус:

$$C_{\mu} = \frac{Q}{\nu \cdot \Delta T}. \tag{8.7}$$

Связь удельной теплоемкости с молярной: $C_{\mu} = c \cdot M.$ (8.8)

Для газов теплоемкость зависит от процесса, в котором происходит их нагревание.

Теплоемкость газа при изохорном нагревании (V = const):

– молярная: $$C_{\mu V} = \frac{i}{2} R, \tag{8.9}$$

– удельная: $$c_V = \frac{i}{2} \frac{R}{M}. \tag{8.10}$$

Теплоемкость газа при изобарном нагревании (p = const):

– молярная: $$C_{\mu p} = \frac{i+2}{2} R, \tag{8.11}$$

– удельная: $$c_p = \frac{(i+2)}{2} \frac{R}{M}. \tag{8.12}$$

Типовые тестовые задания

Задание 80(8)

Средняя кинетическая энергия молекул идеального газа при температуре T равна $\varepsilon = \frac{i}{2}kT$. Здесь $i = n_n + n_{вр} + 2n_K$, где n_n, $n_{вр}$ и n_K – число степеней свободы поступательного, вращательного и колебательного движений молекулы. При условии, что имеют место только поступательное и вращательное движение, для водорода H_2 число i равно…

1) 5;
2) 2;
3) 7;
4) 8.

Решение

Двухатомная молекула имеет 3 поступательные степени свободы и 2 вращательные (8.1), итого $i = 5$. Правильный ответ № 1.

Задание 81(8)

Средняя кинетическая энергия молекул идеального газа при температуре T равна $\varepsilon = \frac{i}{2}kT$. Здесь $i = n_n + n_{вр} + 2n_K$, где n_n, $n_{вр}$ и n_K – число степеней свободы поступательного, вращательного и колебательного движений молекулы. Для атомарного водорода число i равно..

1) 7;
2) 5;
3) 3;
4) 1.

Решение

Атомарный водород – одноатомный. Одноатомная молекула имеет только 3 поступательные степени свободы (8.1), итого $i = 3$. Правильный ответ № 3.

Задание 82(8)

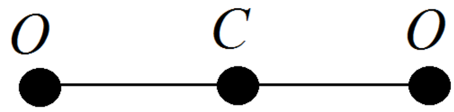
Средняя кинетическая энергия молекул идеального газа при температуре T равна $\varepsilon = \frac{i}{2}kT$. Здесь $i = n_n + n_{вр} + 2n_K$, где n_n, $n_{вр}$ и n_K – число степеней свободы поступательного, вращательного и колебательного движений молекулы. При условии, что имеют место только поступательное и вращательное движение, для водяного пара (H_2O) число i равно…

1) 6;
2) 5;
3) 3;
4) 3/5.

Решение

Трехатомная молекула имеет 3 поступательные степени свободы и 3 вращательные (8.1), итого i = 6. Правильный ответ № 1.

Задание 83(8)



Кинетическая энергия вращательного движения линейной молекулы углекислого газа CO_2, согласно модели жесткой связи атомов в молекуле, составляет от полной энергии долю…

1) 2/5;
2) 3/5;
3) 12/3;
4) 3/6.

Решение

Трехатомная *линейная* молекула имеет 3 поступательные степени свободы и 2 вращательные (8.1), итого i = 5. Средняя кинетическая энергия молекул (8.4) $\varepsilon = \frac{i}{2}kT$, энергия вращательного движения $\varepsilon_{вр} = \frac{i_{вр}}{2}kT$. Отношение энергий $\frac{\varepsilon_{вр}}{\varepsilon} = \frac{2kT}{2} \cdot \frac{2}{5kT} = 2/5$ (8.1). Правильный ответ № 1.

Задание 84(8)

Молярная теплоемкость идеального газа при постоянном давлении равна

$$C_p = \frac{9}{2}R,$$

где R = 8,31 Дж/(кг·моль) – универсальная газовая постоянная. Число вращательных степеней свободы молекулы равно…

1) 9;
2) 1;
3) 2;
4) 3.

Решение

Из формулы (8.11) $i + 2 = 9$, $i = 7$. Здесь $i = i_п + i_{вр} + 2i_к$, $i_п = 3$, $i_{вр} = 2$ или 3, так как $2i_к$ – величина четная и не может быть равной 1, то $i_{вр} = 2$. Правильный ответ № 3.

Задание 85(8)

Средняя кинетическая энергия молекулы газа при температуре T зависит от их структуры, что связано с возможностью различных видов движения атомов в молекуле. При условии, что имеют место только поступательное и вращательное движение, средняя энергия молекул азота N_2 равна…

1) $7/2\ kT$;
2) $3/2\ kT$;
3) $1/2\ kT$;
4) $5/2\ kT$.

Решение

Средняя кинетическая энергия молекулы газа определяется по формуле (8.4). Двухатомная молекула имеет 3 поступательные степени свободы и 2 вращательные (8.1), итого $i = 5$. Правильный ответ № 4.

Задание 86(8)

Средняя кинетическая энергия молекулы газа при температуре T зависит от их структуры, что связано с возможностью различных видов движения атомов в молекуле. Средняя кинетическая энергия молекул гелия He равна …

1) $7/2\ kT$;
2) $3/2\ kT$;
3) $1/2\ kT$;
4) $5/2\ kT$.

Решение

Гелий – одноатомный газ. Одноатомная молекула имеет только 3 поступательные степени свободы (8.1), итого $i = 3$. Согласно формуле (8.4) правильный ответ № 2.

Задание 87(8)

Если не учитывать колебательные движения в молекуле водорода при температуре 200 К, то кинетическая энергия (в Дж) всех молекул в 4 граммах водорода равна …

1) 8310;
2) 4986;
3) 3324;
4) 1662.

Решение

Согласно формуле (8.4) средняя кинетическая энергия одной молекулы водорода (двухатомного) равна $\langle E_k \rangle = \frac{5}{2}kT$. В 4 граммах водорода содержится N молекул $N = \nu \cdot N_A = \frac{m}{M} N_A$. Их общая энергия $E_к = \langle E_k \rangle N = \langle E_k \rangle \nu \cdot N_A = = \frac{5}{2}\frac{m}{M} N_A kT = \frac{5}{2}\frac{m}{M} RT$. Получили формулу для внутренней энергии идеального газа (10.9). $E_к = \frac{5}{2}\cdot\frac{4}{2}\cdot 8{,}31 \cdot 200 = 8310$ Дж. Правильный ответ № 1.

Тема 9. ВТОРОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ. ЭНТРОПИЯ. ЦИКЛЫ

Необходимо знать:

– энтропия;
– характер изменения энтропии в различных процессах;
– цикл Карно в различных координатах (p,V), (T,S).

Краткая теория

Циклы – круговые процессы в термодинамике, в которых начальные и конечные параметры, определяющие состояние рабочего тела (давление, объём, температура, энтропия), совпадают.

КПД термодинамического цикла:

$$\eta = \frac{A}{Q_н} \cdot 100\ \% = \frac{Q_н - Q_х}{Q_н} \cdot 100\ \%, \tag{9.1}$$

где $Q_н$ – количество теплоты, полученной за цикл от нагревателя;

$Q_х$ – количество теплоты, отданной за цикл холодильнику;

A – работа за цикл.

Цикл Карно – идеальный термодинамический цикл с максимальным КПД, состоящий из двух изотерм и двух адиабат.

КПД цикла Карно:

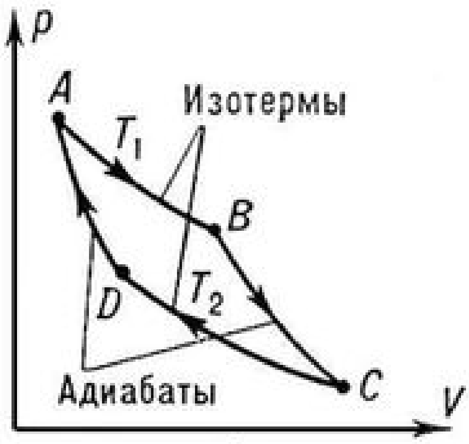
$$\eta = \frac{T_н - T_x}{T_н} \cdot 100\ \%, \tag{9.2}$$

где $T_н$ – температура нагревателя;

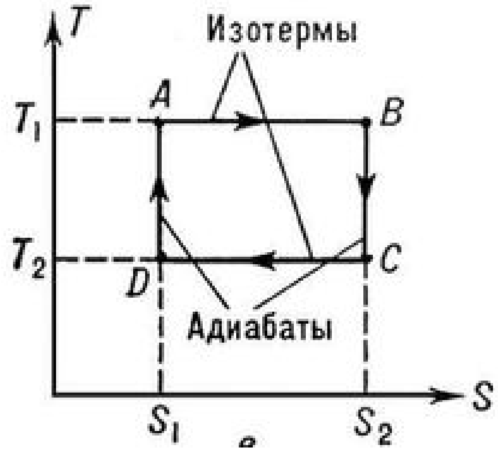
T_x – температура холодильника.

В различных координатах цикл Карно выглядит следующим образом.

В координатах «давление-объем»:



В координатах «температура-давление»:



Второе начало термодинамики – физический принцип, который задает направление протекания термодинамических процессов.

Формулировка II начала термодинамики Клаузиуса: «Невозможен процесс, единственным результатом которого являлась бы передача тепла от более холодного тела к более горячему».

Другая формулировка II начала термодинамики – Закон неубывания энтропии: «Энтропия изолированной системы не может уменьшаться»:

$$\Delta S \geq 0. \tag{9.3}$$

Энтропия – мера беспорядка системы, состоящей из многих элементов, в частности, в статистической физике – мера вероятности осуществления какого-либо макроскопического состояния.

$$S = k \cdot \ln \Omega, \tag{9.4}$$

где Ω – статистический вес состояния – число возможных микросостояний (способов), с помощью которых можно осуществить данное макросостояние.

Малое приращение энтропии определяется через приведенное количество теплоты:

$$dS = \frac{\delta Q}{T}. \tag{9.5}$$

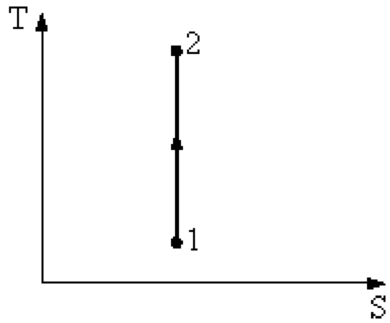
Изменение энтропии в термодинамических процессах при переходе из состояния *A* в состояние *B*:

$$\Delta S = S_B - S_A = \int_A^B \frac{\delta Q}{T}. \tag{9.6}$$

Типовые тестовые задания

Задание 88(9)

Процесс, изображенный на рисунке в координатах (T, S), где S – энтропия, является…

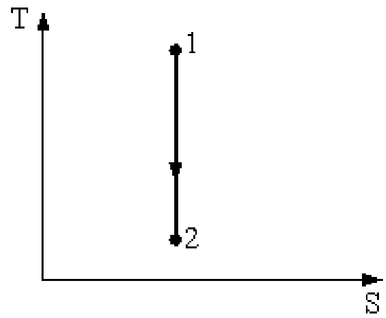


1) изохорным нагреванием;
2) адиабатным сжатием;
3) изобарным расширением;
4) изотермическим расширением.

Решение

S = const, значит процесс адиабатный (изоэнтропийный) (9.5), (10.7). Температура увеличивается, значит объем уменьшается согласно формуле (10.6). Ответ № 2.

Задание 89(9)



Процесс, изображенный на рисунке в координатах (T, S), где S – энтропия, является…

1) изохорным охлаждением;
2) изобарным сжатием;
3) изотермическим сжатием;
4) адиабатным расширением.

Решение

S = const, значит процесс адиабатный (изоэнтропийный) (9.5). Температура уменьшается, значит объем увеличивается согласно формуле (10.6). Ответ № 4.

Задание 90(9)

Энтропия изолированной термодинамической системы в ходе *необратимого* процесса…

1) только убывает;
2) остается постоянной;

3) только увеличивается;

4) остается постоянной или убывает.

Решение

Согласно второму началу термодинамики (9.3) правильный ответ № 3.

Задание 91(9)

В ходе необратимого процесса при поступлении в неизолированную термодинамическую систему тепла для приращения энтропии верным будет соотношение …

1) $dS > \frac{\delta Q}{T}$;

2) $dS = \frac{\delta Q}{T}$;

3) $dS < \frac{\delta Q}{T}$;

4) $dS \leq \frac{\delta Q}{T}$.

Решение

Согласно второму началу термодинамики (9.3) в изолированных системах энтропия не может убывать при любых происходящих в ней процессах: $dS \geq 0$. Знак равенства относится к обратимым процессам, а знак «больше» – к необратимым процессам. Если в неизолированную систему поступает тепло и происходит необратимый процесс, то энтропия возрастает за счет не только полученного тепла, но и необратимости процесса: $dS > \frac{\delta Q}{T}$. Правильный ответ № 1.

Задание 92(9)

Энтропия изолированной термодинамической системы в ходе *обратимого* процесса…

1) только убывает;

2) остается постоянной;

3) только увеличивается.

Решение

Согласно второму началу термодинамики (9.3) правильный ответ № 2.

Задание 93(9)

В процессе изотермического сообщения тепла постоянной массе идеального газа его энтропия …

1) увеличивается;
2) не изменяется;
3) уменьшается.

Решение

По определению изменения энтропии (9.6), если система получает теплоту, то энтропия увеличивается. Правильный ответ № 1.

Задание 94(9)

В процессе изохорического охлаждения постоянной массы идеального газа его энтропия …

1) не меняется;
2) уменьшается;
3) увеличивается.

Решение

При изохорическом охлаждении система отдает теплоту без совершения работы (10.8), (10.12). По определению изменения энтропии (9.6), если система отдает теплоту, то энтропия уменьшается. Правильный ответ № 2.

Задание 95(9)

Энтропия неизолированной термодинамической системы в процессе плавления вещества в ней …

1) увеличивается;
2) убывает;
3) может как убывать, так и оставаться постоянной;
4) остается постоянной.

Решение

При плавлении система получает теплоту (10.14). По определению изменения энтропии (9.6), если система получает теплоту, то энтропия увеличивается. Правильный ответ № 1.

Задание 96(9)

При изотермическом сжатии идеального газа энтропия …

1) уменьшается;
2) увеличивается;

3) сначала увеличивается, потом уменьшается;

4) не изменяется.

Решение

При изотермическом сжатии система отдает теплоту (так как внутренняя энергия не изменяется (10.12), а работа сжатия отрицательна (10.9)) согласно I началу термодинамики (10.8). По определению изменения энтропии (9.6), если система отдает теплоту, то энтропия уменьшается. Правильный ответ № 1.

Задание 97(9)

При адиабатическом расширении идеального газа …

1) температура понижается, энтропия не изменяется;

2) температура и энтропия не изменяются;

3) температура понижается, энтропия возрастает;

4) температура и энтропия возрастают.

Решение

Адиабатический процесс – изоэнтропийный (10.7), т. е. энтропия не изменяется. Если объем адиабатически увеличивается, то температура уменьшается согласно формуле (10.6). Правильный ответ № 1.

Задание 98(9)

Теплоемкость металлов при низких температурах линейно зависит от температуры: $C = \alpha T$. Если энтропия при абсолютном нуле температуры равна нулю, то зависимость энтропии от температуры имеет вид…

1) $S = \alpha T^2$;

2) энтропия от температуры не зависит;

3) $S = \alpha T$.

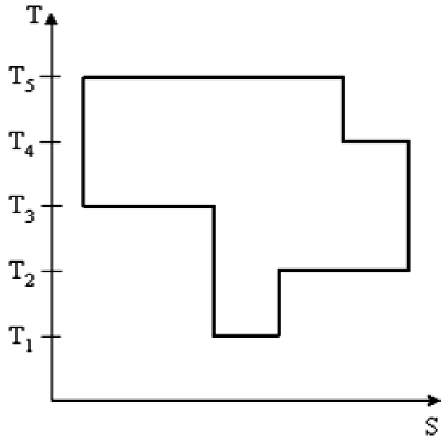
Решение

Если энтропия при абсолютном нуле равна нулю (9.4), то изменение энтропии равно энтропии в конечном состоянии и может быть вычислено по формуле для изменения энтропии (9.6). $\Delta S = S = \int_0^T \frac{CdT}{T} = \int_0^T \frac{\alpha T dT}{T} = \alpha \int_0^T dT = \alpha T.$

Правильный ответ № 3.

Задание 99(9)

На рисунке представлен цикл тепловой машины в координатах T, S, где T – термодинамическая температура, S – энтропия. Укажите температуры нагревателей (теплоисточников) и холодильников (теплоприемников), которые осуществляли теплообмен с рабочим телом в этом циклическом процессе.



1) нагреватели – T_3,T_5, холодильники – T_1, T_2, T_4;

2) нагреватели – T_4, T_5; холодильники – T_1, T_2, T_3;

3) нагреватели – T_4, T_5, T_2; холодильники – T_1 , T_3;

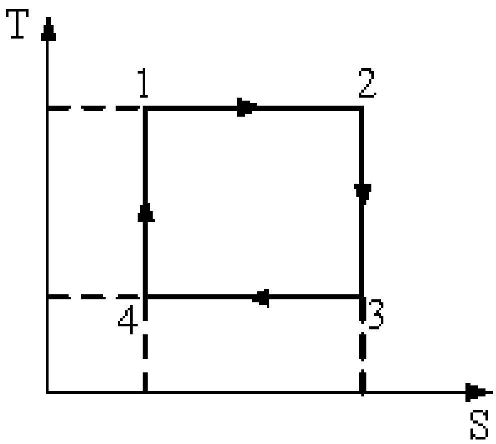
4) нагреватели – T_4, T_5, T_3; холодильники – T_1, T_2.

Решение

Цикл тепловой машины идет «по часовой стрелке». На участках, где энтропия изотермически увеличивается, система получает теплоту от нагревателя (9.6). Нагреватели имеют температуры T_4, T_5. На участках, где энтропия уменьшается, система отдает теплоту холодильнику (9.6). Холодильники имеют температуры T_1, T_2, T_3. Правильный ответ № 2.

Задание 100(9)

На рисунке изображен цикл Карно в координатах (T, S), где S – энтропия. Адиабатное сжатие происходит на этапе…



1) 2–3;

2) 1–2;

3) 3–4;

4) 4–1.

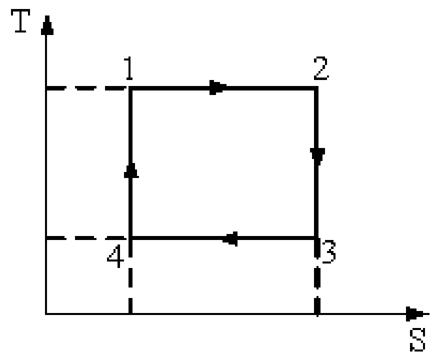
Решение

В адиабатном процессе энтропия остается постоянной (10.7), это участки 2–3 и 4–1. При сжатии объем газа уменьшается, а температура увеличивается (10.6). Правильный ответ № 4.

Задание 101(9)

На рисунке изображен цикл Карно в координатах (T, S), где S – энтропия. Теплота подводится к системе на этапе...

1) 2–3;
2) 1–2;
3) 3–4;
4) 4–1.



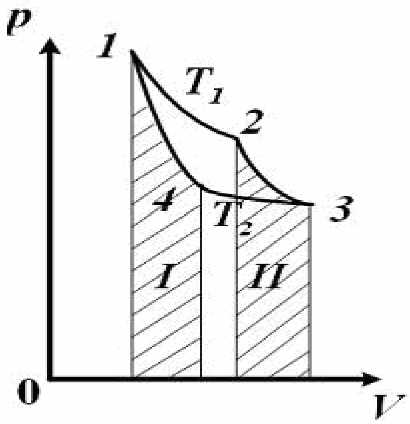
Решение

Если теплота подводится к телу, то его энтропия меняется (9.5). При постоянной температуре энтропия при получении теплоты будет увеличиваться (9.6), что соответствует участку 1–2. Правильный ответ № 2.

Задание 102(9)

На диаграмме (p, V) изображен цикл Карно для идеального газа. Сравните площади S_{I} и S_{II} заштрихованных криволинейных трапеций I и II.

1) $S_{\mathrm{I}} < S_{\mathrm{II}}$;
2) $S_{\mathrm{I}} > S_{\mathrm{II}}$;
3) $S_{\mathrm{I}} = S_{\mathrm{II}}$;
4) невозможно сравнить.



Решение

Площади заштрихованных фигур численно равны работе (10.9) в адиабатных процессах 2–3 и 4–1. Из первого начала термодинамики (10.8) для адиабатного процесса $Q = 0$, $\Delta U = -A$. Изменение внутренней энергии зависит от разности температур (10.12), в обоих процессах разность одна и та же ($T_2 - T_1$) и ($T_1 - T_2$). Значит и работы, и площади фигур равны. Правильный ответ № 3.

Тема 10. ПЕРВОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ. РАБОТА ПРИ ИЗОПРОЦЕССАХ

Необходимо знать:
– первое начало термодинамики;
– изопроцессы (изотермический, изобарный, изохорный, адиабатный);
– работа при изопроцессах;
– внутренняя энергия.

Краткая теория

Изопроцессы – термодинамические процессы с постоянной массой газа, во время которых одна из физических величин – параметров состояния: давление, объём или температура – остаются неизменными.

Из уравнения состояния идеального газа $pV = \frac{m}{M}RT$ следует: (10.1)

– при постоянном давлении (*изобарный* процесс):

$$p = \text{const, то } \frac{V}{T} = \text{const;} \quad (10.2)$$

– при постоянном объеме (*изохорный* процесс):

$$V = \text{const, то } \frac{p}{T} = \text{const;} \quad (10.3)$$

– при постоянной температуре (*изотермический* процесс):

$$T = \text{const, то } pV = \text{const;} \quad (10.4)$$

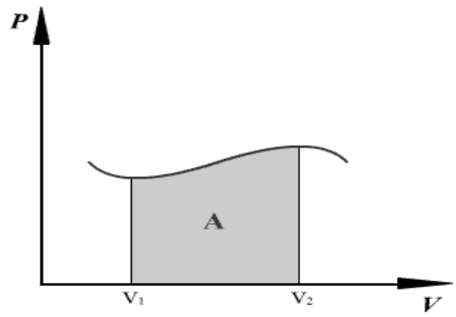
– при постоянной энтропии (*изоэнтропийный процесс*):

$$S = \text{const, то } pV^{\gamma} = \text{const,} \quad (10.5)$$

$$TV^{\gamma-1} = \text{const,} \quad (10.6)$$

он же *адиабатический* процесс ($Q = 0$). (10.7)

Первое начало термодинамики – закон сохранения энергии для термодинамических систем.



Одна из формулировок первого начала термодинамики: «Количество теплоты, полученное системой, идёт на изменение её внутренней энергии и совершение работы против внешних сил»:

$$Q = \Delta U + A. \quad (10.8)$$

Работа газа – это работа, совершенная газом при расширении (или сжатии):

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV. \quad (10.9)$$

Если p = const, то $A = p \cdot \Delta V$. (10.10)

Работа газа может быть определена как площадь под графиком процесса в координатах $P – V$.

Внутренняя энергия – это полная энергия тела за исключением кинетической энергии тела как целого и потенциальной энергии во внешнем силовом поле. Она включает в себя кинетическую энергию хаотического движения молекул тела и потенциальную энергию взаимодействия между молекулами.

Внутренняя энергия идеального газа – это сумма кинетических энергий хаотического движения всех молекул газа:

$$U = \frac{i}{2}\nu RT = \frac{i}{2}pV. \qquad (10.11)$$

Изменение внутренней энергии идеального газа постоянной массы:

$$\Delta U = \frac{i}{2}\nu R\Delta T = \frac{i}{2}\frac{m}{M}R\Delta T. \qquad (10.12)$$

Количество теплоты – это энергия, которую получает или теряет тело при теплопередаче.

Количество теплоты при нагревании/охлаждении тел:

$$Q = m \cdot c \cdot (T_2 - T_1), \qquad (10.13)$$

где c – удельная теплоемкость.

Количество теплоты при плавлении/кристаллизации тел:

$$Q = \pm m \cdot \lambda, \qquad (10.14)$$

где λ – удельная теплота плавления.

Количество тепла при парообразовании/конденсации тел:

$$Q = \pm m \cdot L, \qquad (10.15)$$

где L – удельная теплота парообразования.

Типовые тестовые задания

Задание 103(10)

Чтобы расплавить некоторую массу меди, требуется большее количество теплоты, чем для плавления такой же массы цинка, так как удельная теплота плавления меди в 1,5 раза больше, чем цинка (λ_{Cu}= 1,8 $\cdot 10^5$ Дж/кг, λ_{Zn}= = 1,2 $\cdot 10^5$ Дж/кг). Температура плавления меди примерно в 2 раза выше температуры плавления цинка (T_{Cu}= 1356 K, T_{Zn}= 693 K). Разрушение кристаллической решетки металла при плавлении приводит к возрастанию энтропии. Если энтропия цинка увеличилась на ΔS , то изменение энтропии меди будет равно …

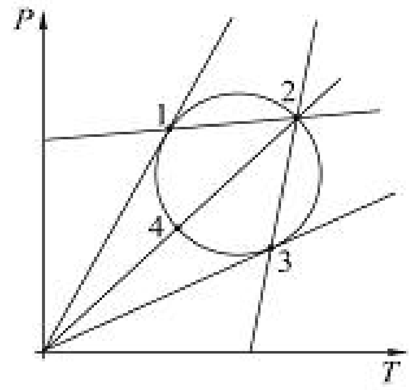
1) 3/2ΔS;
2) 4/3Δ S;
3) 2ΔS;
4) 3/4ΔS.

Решение

Из определения изменения энтропии (9.6) следует, что при плавлении при постоянной температуре $\Delta S = \dfrac{\Delta Q}{T} = \dfrac{\lambda m}{T}$ (9.6), (10.14). Отношение изменения энтропии меди к изменению энтропии цинка $\dfrac{\Delta S_{Cu}}{\Delta S_{Zn}} = \dfrac{\lambda_{Cu} m_{Cu}}{T_{Cu}} \cdot \dfrac{T_{Zn}}{\lambda_{Zn} m_{Zn}} = \dfrac{1,5}{2} = \dfrac{3}{4}$;

$\Delta S_{Cu} = \dfrac{3}{4}\Delta S_{Zn}$. Правильный ответ № 4.

Задание 104(10)



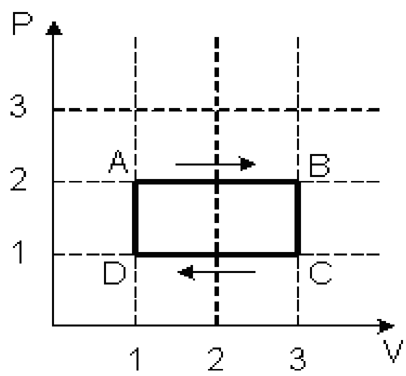
Одинаковому объему для циклического процесса, приведенного на рисунке, соответствуют точки…

1) 2 и 4;
2) 1 и 3;
3) 1 и 2;
4) 2 и 3.

Решение

Точки, соответствующие одинаковому объему, должны лежать на одной изохоре (10.3). Правильный ответ № 1.

Задание 105(10)



На (p, V) диаграмме изображен циклический процесс. На участках BC и CD температура…

1) повышается;
2) понижается,
3) на BC – повышается, на CD – понижается;
4) на BC – понижается, на CD – повышается.

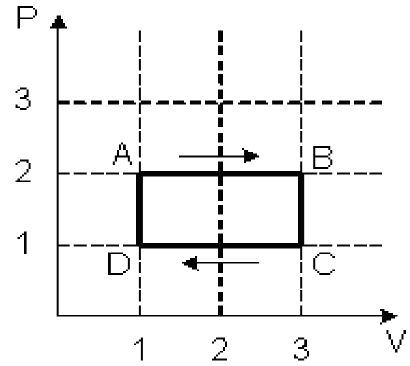
Решение

BC – изохорный процесс, температура уменьшается пропорционально давлению (10.3); CD – изобарный процесс, температура уменьшается пропорционально объему (10.2). Правильный ответ № 2.

Задание 106(10)

На (p, V) диаграмме изображен циклический процесс. На участкеАВ и ВС температура…

1) повышается;
2) на AB – понижается, на BC – повышается;
3) на AB – повышается, на BC – понижается;
4) понижается.



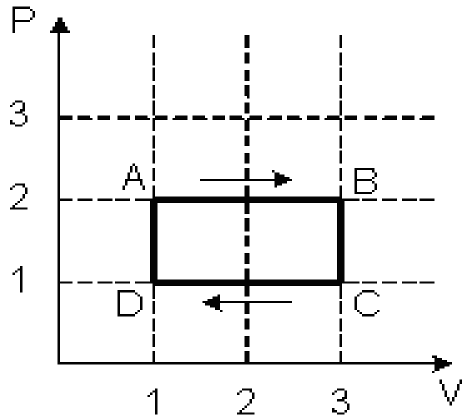
Решение

AB – изобарный процесс, температура увеличивается пропорционально объему (10.2); BC – изохорный процесс, температура уменьшается пропорционально давлению (10.3). Правильный ответ № 3.

Задание 107(10)

На (p, V) диаграмме изображен циклический процесс. На участках DA и AB температура …

1) повышается;
2) на DA – повышается, на AB – понижается;
3) на DA – понижается, на AB – повышается;
4) понижается.



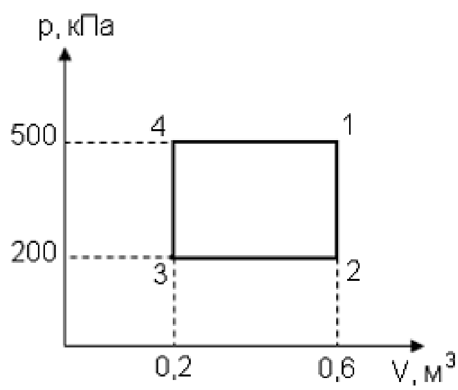
Решение

DA – изохорный процесс, температура повышается пропорционально давлению (10.3); AB – изобарный процесс, температура повышается пропорционально объему (10.2). Правильный ответ № 1.

Задание 108(10)

Диаграмма циклического процесса идеального одноатомного газа представлена на рисунке. Отношение работы за весь цикл к работе при охлаждении газа равно…

1) 3;
2) 1,5;
3) 5;
4) 2,5.



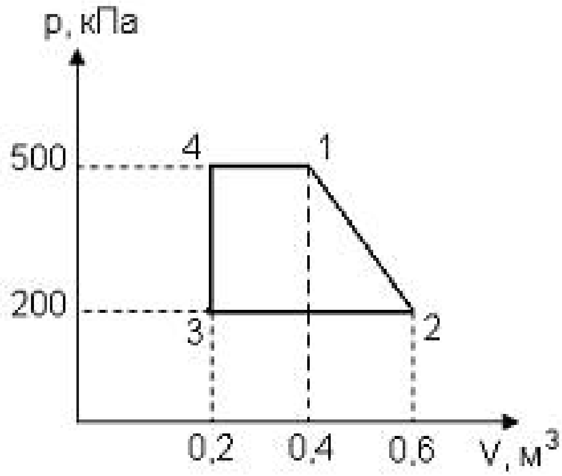
Решение

Работа за цикл численно равна площади фигуры, ограниченной графиком цикла в p–V координатах. В данном случае это прямоугольник площадью $300 \cdot 0{,}4 = 120$ кДж. Работа в процессе численно равна площади фигуры под графиком процесса, изображенного в p–V координатах (10.10). В данном случае охлаждению газа соответствует процессы 1–2 и 2–3 (10.3), (10.2), работа в процессе 1–2 равна 0, работа в процессе 2–3 равна площади прямоугольника под отрезком 2–3, это $200 \cdot 0{,}4 = 80$ кДж. Отношение работ $120/80 = 1{,}5$. Правильный ответ № 2.

Задание 109(10)

Диаграмма циклического процесса идеального одноатомного газа представлена на рисунке. Работа циклического процесса равна …

1) 90 кДж;
2) 20 кДж;
3) 30 кДж;
4) 15 кДж.

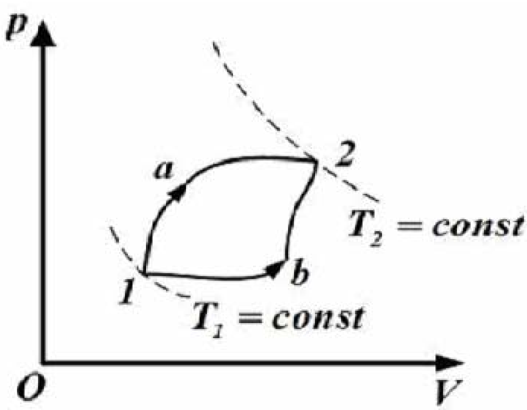


Решение

Работа за цикл численно равна площади фигуры, ограниченной графиком цикла в p–V координатах. В данном случае это трапеция площадью $300 \cdot (0{,}2 + 0{,}4)/2 = 90$ кДж (высота, умноженная на полусумму оснований). Правильный ответ № 1.

Задание 110(10)

Идеальный газ переводится из первого состояния во второе двумя способами (1*a*2 и 1*b*2), как показано на рисунке. Теплота, полученная газом, изменение внутренней энергии и работа газа при переходе его из одного состояния в другое связаны соотношением…



1) $Q_{1a2} > Q_{1b2}$; $\Delta U_{1a2} = \Delta U_{1b2}$; $A_{1a2} > A_{1b2}$;
2) $Q_{1a2} > Q_{1b2}$; $\Delta U_{1a2} > \Delta U_{1b2}$; $A_{1a2} > A_{1b2}$;
3) $Q_{1a2} = Q_{1b2}$; $\Delta U_{1a2} = \Delta U_{1b2}$; $A_{1a2} = A_{1b2}$;
4) $Q_{1a2} = Q_{1b2}$; $\Delta U_{1a2} = \Delta U_{1b2}$; $A_{1a2} > A_{1b2}$.

Решение

Изменение внутренней энергии одинаково в обоих процессах, так как начальные и конечные температуры газа совпадают (10.12). Работа газа больше в процессе $1a2$, так как больше площадь под кривой этого процесса (10.9). Согласно первому началу термодинамики (10.8) теплота, полученная газом, также больше в процессе $1a2$. Правильный ответ № 1.

Задание 111(10)

Количество теплоты, получаемое рабочим телом от нагревателя, – Q_1. Если количество теплоты, отдаваемое рабочим телом холодильнику, – Q_2, увеличивается в два раза, то коэффициент полезного действия тепловой машины…

1) увеличится на $\dfrac{Q_2}{2Q_1}$;

2) уменьшится на $\dfrac{Q_2}{Q_1}$;

3) уменьшится на $\dfrac{Q_2}{2Q_1}$;

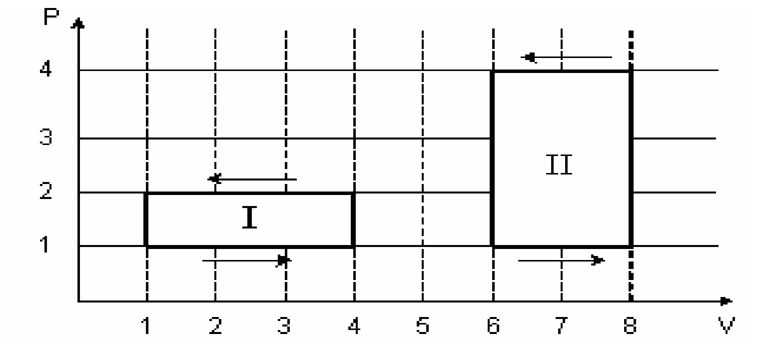
4) увеличится на $\dfrac{Q_2}{Q_1}$.

Решение

Из определения КПД (9.1), выраженного в долях, $\eta_1 = 1 - \dfrac{Q_2}{Q_1}$, $\eta_2 = 1 - \dfrac{2Q_2}{Q_1}$. Разность КПД в первом и втором случае $\eta_1 - \eta_2 = \dfrac{2Q_2}{Q_1} - \dfrac{Q_2}{Q_1} = \dfrac{Q_2}{Q_1}$. Правильный ответ № 2.

Задание 112(10)

На (p, V) диаграмме изображены два циклических процесса. Отношение работ $A_{\mathrm{I}}/A_{\mathrm{II}}$, совершенных в циклах I и II, равно…



1) –2;

2) 1/2;

3) 2;

4) –1/2.

Решение

Работа за цикл численно равна площади фигуры, ограниченной графиком цикла в p–V координатах. В данном случае это прямоугольники. Площадь первого прямоугольника в 2 раза меньше, чем второго. С учетом направления процессов правильный ответ № 2.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 1. Механика. Молекулярная физика / И.В. Савельев. – М. : Наука, 1987. – 432 с.

2. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. – 7-е изд., стер. – М. : Высш. школа, 2003. – 542 с.

3. Детлаф Ф.Ф. Курс физики: учеб. пособие для втузов / Ф.Ф. Детлаф, Б.М. Яворский. – М. : Наука, 1989. – 608 с.

4. Данилов С.В. Классическая и релятивистская механика: конспект лекций / С. В. Данилов. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2008. – 60 с.

5. Суриков В.И. Молекулярная физика и термодинамика: конспект лекций / Вал. И. Суриков. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2008. – 64 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ