

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Белгородский государственный технологический университет  
им. В.Г.Шухова

А.В.Корнилов, А.В.Сабылинский

## **ЗАДАЧИ ПО ФИЗИКЕ С РЕШЕНИЯМИ И ОТВЕТАМИ**

*Утверждено ученым советом университета в качестве  
учебного пособия для студентов очной формы обучения  
всех специальностей*

Белгород  
2012

УДК 53(07)  
ББК 22я7  
К67

Рецензенты:

Кандидат физико-математических наук, доцент Белгородского государственного национального исследовательского университета (НИУ «БелГУ») И.Н.Кузьменко

Кандидат технических наук, доцент Белгородской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Я. Горина А.Н.Акупиян

**К67** **Задачи по физике с решениями и ответами:** учебное пособие/А.В.Корнилов, А.В.Сабылинский. - Белгород:Изд-во БГТУ, 2012.- 81с.

Предлагаемое учебное пособие написано в соответствии с программой дисциплины "Общая физика". В него включены примеры решения задач по темам семи основных разделов дисциплины: "Механика", "Молекулярная физика и термодинамика", "Электричество и магнетизм", "Механические и электромагнитные колебания и волны", "Волновая и квантовая оптика", "Квантовая физика и физика атома", "Элементы ядерной физики и физики элементарных частиц".

Учебное пособие предназначено для студентов очной формы обучения всех специальностей и имеет целью помочь им овладеть основными методами решения задач по физике.

УДК 53(07)  
ББК 22я7

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших дисциплин в теоретической и практической подготовке современного инженера является курс физики. Физика знакомит студентов с основами знаний о природе, что позволяет им использовать фундаментальные законы в их профессиональной деятельности.

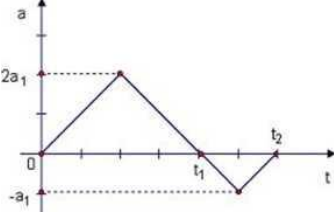
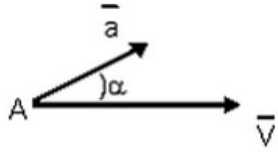
Предлагаемое учебное пособие написано в соответствии с программой дисциплины "Общая физика". В него включены примеры решения задач по темам семи основных разделов дисциплины: "Механика", "Молекулярная физика и термодинамика", "Электричество и магнетизм", "Механические и электромагнитные колебания и волны", "Волновая и квантовая оптика", "Квантовая физика и физика атома", "Элементы ядерной физики и физики элементарных частиц".

Учебное пособие предназначено для студентов очной формы обучения всех специальностей и имеет целью помочь им овладеть основными методами решения задач по физике. Составлено оно с таким расчетом, чтобы им можно было пользоваться и для самостоятельной работы. Разбор задач всех глав проводится по единой схеме, каждую главу можно прорабатывать независимо от других.

При решении задач рекомендуется следующий порядок действий:

1. Прочитать внимательно условие задачи. Ввести буквенные обозначения величин и сделать краткую запись условия.
2. Выразить все заданные величины в единицах СИ.
3. Проанализировать условие задачи; установить, какие физические явления и законы используются в данной задаче.
4. Сделать рисунок, поясняющий содержание задачи, с обозначением на нем данных величин.
5. Решить задачу в общем виде, т. е. получить расчетную формулу в виде уравнения или системы уравнений, включающих в себя как заданные, так и искомые величины
6. Записав общее решение, подставить в окончательную формулу числовые значения величин и вычислить искомую физическую величину.
7. Проверить правильность размерности найденной физической величины и понимание реальности полученного ответа.

Авторы выражают глубокую благодарность преподавателям кафедры физики БГТУ им. В.Г.Шухова, принявшим участие в анализе задач и сделавшим ценные замечания при прочтении рукописи.

Условие задачи	Решение
<b>1. Механика</b>	
<b>1. Кинематика поступательного и вращательного движения.</b>	
<p>Тело брошено с поверхности Земли со скоростью <math>10 \frac{M}{c}</math> под углом <math>45^\circ</math> к горизонту. Если сопротивлением воздуха пренебречь и принять <math>g = 10 \frac{M}{c^2}</math>, то радиус кривизны траектории в верхней точке в м равен ...</p> <p><b>Ответ: R=5м</b></p>	<p>Начальная скорость <math>v_0 = 10 \frac{M}{c}</math> направлена под углом <math>\alpha = 45^\circ</math> к горизонту. Проекция скорости на горизонтальное направление остается неизменной, <math>v_x = v_0 \cos \alpha = const</math>. В верхней точке траектории скорость направлена горизонтально и ускорение свободного падения становится нормальным ускорением. По формуле для нормального ускорения <math>a_n = \frac{v^2}{R}</math> находим радиус кривизны траектории:</p> $R = \frac{v_x^2}{g} = \frac{v_0^2 \cos^2 \alpha}{g}$ <p>Подставляя числовые значения, получим <b><math>R = 5 \text{ м}</math></b>.</p>
<p>На графике показано изменение с течением времени ускорения точки на прямолинейном отрезке пути. Начальная скорость равна нулю. Скорость точки в момент времени <math>t_2</math> равна ...</p> <p><b>Ответ:</b> <math>\frac{3}{4} a_1 t_1</math></p> 	<p>Площадь, ограниченная графиком, представляет собой приращение скорости. За время движения <math>t_1</math> приращение скорости положительно и равно <math>a_1 t_1</math>. За время <math>t_2 - t_1</math> приращение скорости отрицательно и равно <math>-\frac{1}{4} a_1 t_1</math>. Поскольку начальная скорость равна нулю, то скорость в момент времени <math>t_2</math> равна</p> $v_{t_2} = v(t_2) = a_1 t_1 - \frac{1}{4} a_1 t_1 = \frac{3}{4} a_1 t_1$
<p>В точке А траектории угол между векторами скорости и ускорения <math>\alpha = 60^\circ</math>, ускорение <math>a = 2 \frac{M}{c^2}</math>, скорость направлена горизонтально. За время <math>\Delta t = 1 \text{ с}</math> (считать его малым приращением) приращение скорости по модулю составит ...</p>  <p><b>Ответ:</b> <math>1 \frac{M}{c}</math></p> <p><b>Варианты ответа</b></p> <p>1. <math>1 \frac{M}{c}</math>   2. <math>-1 \frac{M}{c}</math>   3. <math>2 \frac{M}{c}</math>   4. <math>\sqrt{3} \frac{M}{c}</math></p>	<p>Изменение скорости по модулю обусловлено тангенциальным ускорением <math>a_\tau = \frac{dv}{dt} = a \cdot \cos \alpha</math>. За время <math>\Delta t = 1 \text{ с}</math> приращение скорости по модулю составит</p> $\Delta v = a \cdot \cos \alpha \cdot \Delta t = 1 \frac{M}{c}$

Зависимость от времени линейной скорости лопатки турбины, расположенной на расстоянии 1 м от оси вращения, задается уравнением  $\vartheta = 2t + 0,2t^2$  (в единицах СИ). Через 15с после пуска величина углового ускорения лопатки турбины будет равна ...

Ответ  $\varepsilon = 8 \text{ с}^{-2}$

Варианты ответа

1.  $5 \text{ с}^{-2}$    2.  $10 \text{ с}^{-2}$    3.  $8 \text{ с}^{-2}$    4.  $2 \text{ с}^{-2}$

По данной линейной скорости находим зависимость угловой скорости от времени

$$\omega = \frac{\vartheta}{r} = 2t + 0,2t^2$$

(в единицах СИ). Находим угловое ускорение в зависимости от времени

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} = 2 + 0,4t$$

(в единицах СИ). Подставляя время

$$t = 15 \text{ с}, \text{ получим } \varepsilon = 8 \text{ с}^{-2}$$

Прямолинейное движение точки описывается уравнением  $x = -1 + 3t^2 - 2t^3$  (в единицах СИ). Средняя скорость точки за время движения до остановки в  $\frac{m}{c}$  равна ...

Ответ 1м/с

Найдем скорость:  $v = \frac{dx}{dt} = 6t - 6t^2$ .

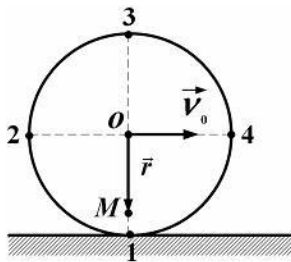
При  $t = 1 \text{ с}$   $v = 0$ . Следовательно,

время движения до остановки равно 1 с. Средняя скорость за время

движения до остановки

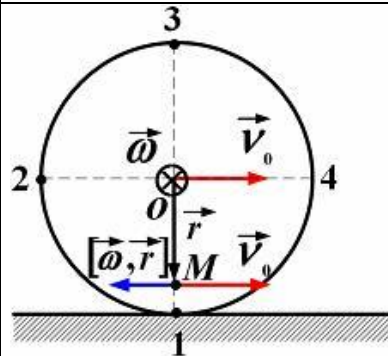
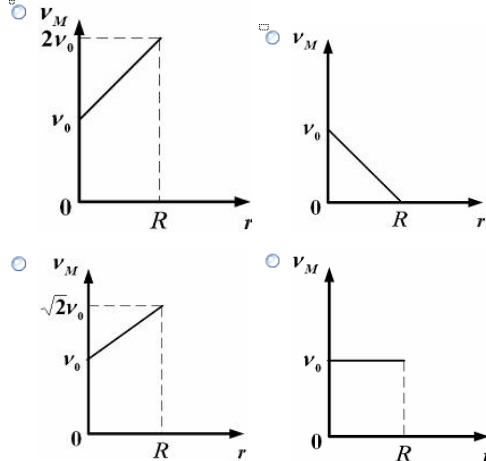
$$v_{cp} = \frac{x(1) - x(0)}{t} = 1 \frac{m}{c}. \text{ Ответ: } 1 \frac{m}{c}.$$

Цилиндр радиуса  $R$  катится без скольжения по горизонтальной плоскости со скоростью  $\vec{v}_0$ .



Точка  $M$  расположена на нижней половине вертикального диаметра цилиндра на расстоянии  $r$  от центра цилиндра. Зависимость мгновенной скорости точки  $M$  от расстояния до центра цилиндра имеет вид ...

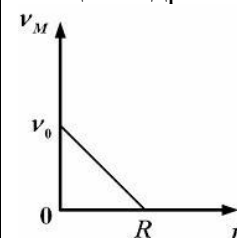
Варианты ответа:



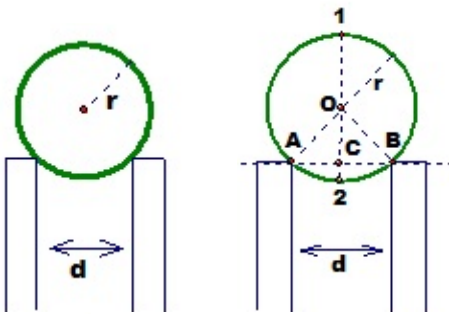
Движение точек цилиндра можно представить как результат сложения двух движений: поступательного со скоростью  $\vec{v}_0$  и вращательного относительно

оси цилиндра с угловой скоростью  $\omega = \frac{v_0}{R}$ . Линейная скорость вращения относительно оси цилиндра равна  $v = \omega r$ . Для точек на нижней половине вертикального диаметра цилиндра эти скорости направлены противоположно. Поэтому скорость точки

$M$  равна  $v_M = v_0 - \frac{v_0}{R} r$ , и график зависимости мгновенной скорости точки  $M$  от расстояния  $r$  до оси цилиндра имеет вид:



Шарик радиусом  $r = 5$  см катится равномерно без проскальзывания по двум параллельным линейкам, расстояние между которыми  $d = 8$  см, и за  $2$  с проходит  $120$  см. Угловая скорость вращения шарика равна ...



$$: 20 \text{ с}^{-1}$$

Ответ

Варианты ответа

1.  $6 \text{ с}^{-1}$     2.  $12 \text{ с}^{-1}$     3.  $20 \text{ с}^{-1}$     4.  $15 \text{ с}^{-1}$

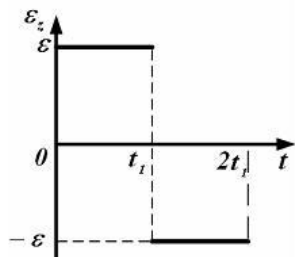
Скорость центра шарика  $v_0 = \frac{120 \text{ см}}{2 \text{ с}} = 60 \frac{\text{см}}{\text{с}}$ . Прямая АВ, проходящая через точки касания шарика и линеек, является мгновенной осью вращения шарика. Из  $\triangle AOC$  или  $\triangle OBC$  найдем

$$R = OC = \sqrt{r^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} = 3 \text{ см}$$

Угловая скорость вращения шарика равна

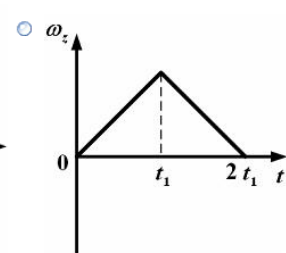
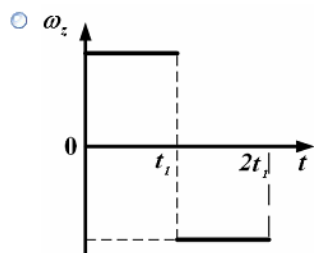
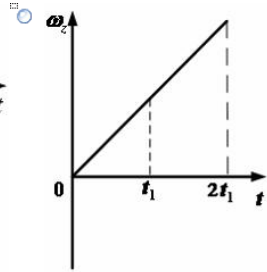
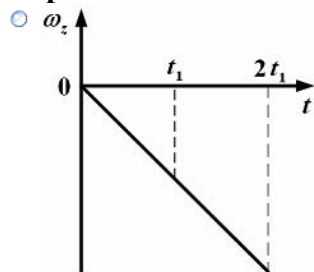
$$\omega = \frac{v_0}{R} = \frac{60}{3} = 20 \text{ с}^{-1}$$

Твердое тело начинает вращаться вокруг оси  $Z$ . Зависимость углового ускорения  $\varepsilon_z$  от времени  $t$  представлена на графике.



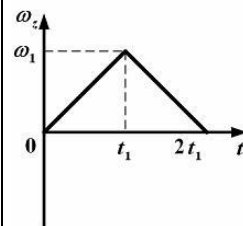
Соответствующая зависимость угловой скорости  $\omega_z$  от времени представлена графиком

Варианты ответа

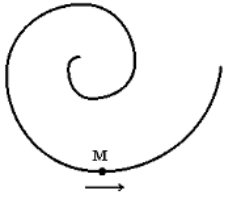


Угловое ускорение характеризует быстроту изменения угловой скорости тела  $\bar{\varepsilon} = \frac{d\bar{\omega}}{dt}$ . При неизменной оси вращения векторы  $\bar{\varepsilon}$  и  $\bar{\omega}$  совпадают по направлению, если  $d\omega/dt > 0$  (угловая скорость возрастает) и направлены противоположно, если  $d\omega/dt < 0$  (скорость вращения уменьшается).

По условию задания в интервале времени от  $0$  до  $t_1$  твердое тело начинает вращаться вокруг оси  $Z$  с постоянным угловым ускорением  $\varepsilon_z = \varepsilon > 0$ , следовательно, в этом интервале времени угловая скорость  $\omega_z$  линейно возрастает от  $0$  до значения  $\omega_1 = \varepsilon t_1$  (см. рис.). В интервале времени от  $t_1$  до  $2t_1$  проекция углового ускорения меняет знак,  $\varepsilon_z = -\varepsilon < 0$ , значит, угловая скорость в этом интервале будет линейно убывать от значения  $\omega_1$  до  $0$  (см. рис.).



Точка М движется по спирали с постоянной по величине скоростью в направлении, указанном стрелкой. При этом величина нормального ускорения ...

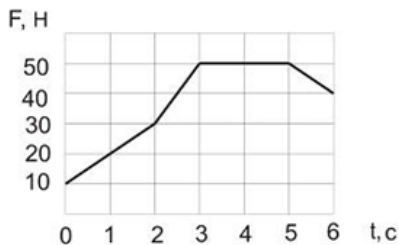


**Варианты ответа:**

1. уменьшается
2. равна нулю
3. увеличивается
4. не изменяется

Нормальная составляющая ускорения определяется формулой  $\vec{a}_n = \frac{v^2}{R} \vec{n}$ , где  $R$  – радиус кривизны траектории в данной точке;  $\vec{n}$  – единичный вектор, перпендикулярный к касательной траектории в данной точке;  $v$  – модуль вектора скорости точки. При движении по спирали в направлении, указанном стрелкой, радиус кривизны  $R$  увеличивается. Следовательно, при постоянной скорости  $v$  величина нормального ускорения  $a_n = \frac{v^2}{R}$  уменьшается.

## 2. Динамика поступательного движения.



За первые 3 секунды импульс тела изменится на .

**Ответ: 80 Н\*с**

**Варианты ответа:**

1. 50Н\*с
2. 150Н\*с
3. 80Н\*с
4. 300Н\*с

Согласно второму закону Ньютона,

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

В проекции на ось координат

$$F = \frac{dp}{dt}. \text{ Следовательно, } \Delta p = \int_{t_1}^{t_2} F dt. \text{ По}$$

геометрическому смыслу определенного интеграла он равен площади под графиком функции. Площадь под графиком функции в интервале времени от 0 до 3 с равна  $80 \text{ Н} \cdot \text{с}$ , следовательно, импульс тела изменится на  $\Delta p = 80 \text{ Н} \cdot \text{с}$ .

На покоящееся тело массы  $m_1 = 2 \text{ кг}$  налетает с некоторой скоростью  $v$  тело массы  $m_2 = 5 \text{ кг}$ . Сила, возникающая при взаимодействии тел, линейно зависящая от времени, растет от 0 до значения  $F_0 = 4 \text{ Н}$  за время  $t_0 = 3 \text{ с}$ , а затем равномерно убывает до нуля за то же время  $t_0$ . Все движения происходят по одной прямой. Скорость первого

тела массы  $m_1$  в  $\frac{m}{c}$  после взаимодействия...

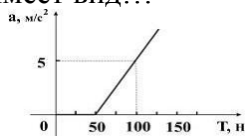
**Ответ: 6м/с**

Поскольку на тело действует переменная сила, применим второй закон Ньютона в виде  $F \Delta t = \Delta p$ . Импульс силы равен изменению механического импульса. Импульс силы взаимодействия равен  $F \Delta t = \int F dt = F_0 t_0$  (интеграл можно

найти, вычислив площадь под графиком функции  $F(t)$ ), изменение механического импульса  $\Delta p = m_1 v_1$ . Находим скорость первого тела мас-

сы  $m_1$  после взаимодействия  $v_1 = \frac{F_0 t_0}{m_1} = 6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

Тело, находящееся на горизонтальной плоскости, тянут за нить в горизонтальном направлении. Масса тела равна 10 кг. Первоначально тело покоилось. Коэффициент трения равен 0,5. График зависимости ускорения от силы натяжения нити имеет вид...



**Ответ:**

Максимальная сила трения покоя равна силе трения скольжения

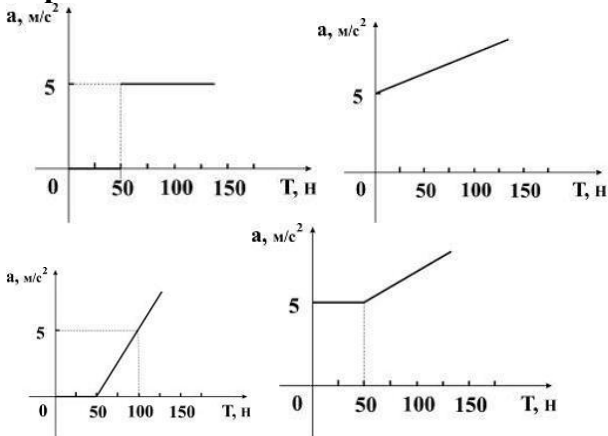
$$F_{mp} = kmg = 0.5 * 10 * 10 \text{ Н} = 50 \text{ Н}$$

Пока сила натяжения нити  $T < 50 \text{ Н}$ , тело покоится и ускорение равно нулю. Тело начинает двигаться с ускорением, если  $T > 50 \text{ Н}$ . Ускорение

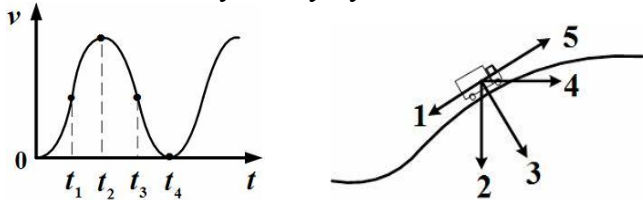
$$a = \frac{1}{m} (T - F_{mp}) = \frac{1}{10} (T - 50)$$

, следовательно, ускорение возрастает пропорционально разности сил

**Варианты ответа:**

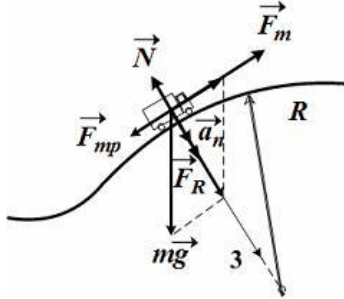


Модуль скорости автомобиля изменялся со временем, как показано на графике зависимости  $v(t)$ . В момент времени  $t_2$  автомобиль поднимался по участку дуги.



Направление результирующей всех сил, действующих на автомобиль в этот момент времени, правильно отображает вектор...

**Ответ: вектор 3**

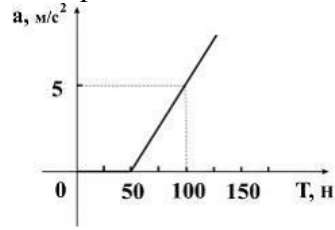


**Варианты ответа:** 1-1, 2-2, 3-3, 4-4

Обруч, раскрученный в вертикальной плоскости и посланный по полу рукой гимнастки, через несколько секунд сам возвращается к ней. Начальная скорость центра обруча равна  $v = 10 \frac{M}{c}$ , коэффициент трения между обручем и полом равен  $\mu = 0,5$ . Расстояние, на которое откатывается обруч, в  $M$  равно...

**Ответ: 10м**

натяжения нити и трения скольжения.



В системе отсчета, связанной с Землей, ускорение автомобиля  $\vec{a}$  и результирующая действующих на него сил  $\vec{F}_R$  связаны вторым законом Ньютона:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_R}{m} \text{ и } \vec{F}_R \uparrow \vec{a}$$

на: Полное ускорение  $\vec{a} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n$ ,  $\vec{a}_\tau = \frac{dv}{dt} \vec{\tau}$  – тангенциальная составляющая ускорения,

$\vec{a}_n = \frac{v^2}{R} \vec{n}$  – нормальная составляющая ускорения. Как следует из графика зависимости модуля скорости от времени, в момент  $t_2$  модуль скорости автомобиля достигает максимального значения  $v_{max}$  и  $\vec{a}_\tau = 0$ . Поскольку автомобиль движется в этот момент по криволинейному участку траектории, то  $\vec{a}_n \neq 0$ . Следовательно,  $\vec{F}_R \uparrow \vec{a}_n$  и ее направление совпадает с направлением вектора 3.

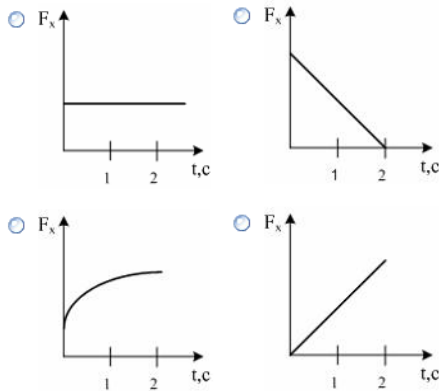
В горизонтальном направлении на обруч действует только сила трения  $F_{mp} = \mu mg$ , где  $\mu$  - коэффициент трения. Согласно теореме о движении центра масс, центр обруча движется, как материальная точка с массой  $m$ , равной массе обруча, к которой приложена сила трения. Ускорение торможения

равно  $a = \mu g$ , время торможения  $t = \frac{v}{\mu g}$ , пройденное до остановки расстояние

$$l = \frac{v^2}{2a} = \frac{v^2}{2\mu g} = \frac{100}{2 \cdot 0,5 \cdot 10} = 10 \text{ м}$$



Зависимость импульса частицы от времени описывается законом  $\vec{p} = 2t\vec{i} + 3t^2\vec{j}$ , где  $\vec{i}$  и  $\vec{j}$  – единичные векторы координатных осей  $X, Y$  соответственно. Зависимость горизонтальной проекции силы  $F_x$ , действующей на частицу, от времени представлена на графике ...



Сила  $\vec{F}$ , действующая на материальную точку, равна скорости изменения ее импульса

$\vec{p}$ :  $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$ . В нашем случае

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d}{dt}(2t\vec{i} + 3t^2\vec{j}) = 2\vec{i} + 6t\vec{j}, \text{ и,}$$

сравнивая  $\vec{F} = F_x\vec{i} + F_y\vec{j}$ , находим

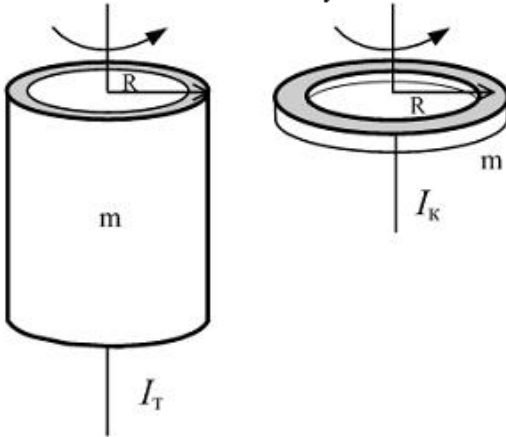
$$F_x = 2H = \text{const} \text{ и } F_y = 6tH.$$

Проекция силы  $\vec{F}$  на ось  $x$   $F_x = 2H > 0$ ;

следовательно, с течением времени горизонтальная составляющая силы не меняется.

### 3. Динамика вращательного движения.

Тонкостенная трубка и кольцо, имеющие одинаковые массы и радиусы, вращаются с одинаковой угловой скоростью. Отношение величины момента импульса трубки к величине момента импульса кольца равно ...



Величина момента импульса тела, вращающегося вокруг неподвижной оси, определяется по формуле  $L = J\omega$ , где  $J$  – момент инерции тела относительно заданной оси,  $\omega$  – угловая скорость. Момент инерции тонкостенной трубки равен  $J_T = mR^2$ ;

момент инерции кольца, имеющего такую же массу и радиус, равен моменту инерции трубки, то есть  $J_K = mR^2$ . Отношение

величин моментов импульсов трубки и кольца

$$\text{равно: } \frac{L_T}{L_K} = \frac{J_T\omega}{J_K\omega} = \frac{mR^2\omega}{mR^2\omega} = 1.$$

Шар, цилиндр (сплошной) и тонкостенный цилиндр с равными массами и радиусами раскрутили каждый вокруг своей оси до одной и той же угловой скорости и приложили одинаковый тормозящий момент. Раньше других тел остановится ...

Ответ: Шар

Варианты ответа:

- 1.цилиндр с шаром
- 2.цилиндр
- 3.шар
- 4.тонкостенный цилиндр

При одинаковом моменте сил угловое ускорение обратно пропорционально моменту

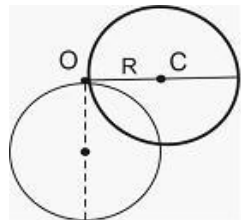
инерции тела. Момент инерции шара  $I_1 = \frac{2}{5}mR^2$ , мо-

мент инерции цилиндра  $I_2 = \frac{1}{2}mR^2$ , момент инерции

тонкостенного цилиндра  $I_3 = mR^2$ . Следовательно, ускорение торможения будет большим для шара и первым остановится шар.

Тонкий обруч радиусом 1 м, способный свободно вращаться вокруг горизонтальной оси, проходящей через точку O перпендикулярно плоскости рисунка, отклонили от вертикали на угол  $\frac{\pi}{2}$  и отпустили. В начальный момент времени угловое ускорение обруча равно ...

Ответ  $5c^{-2}$

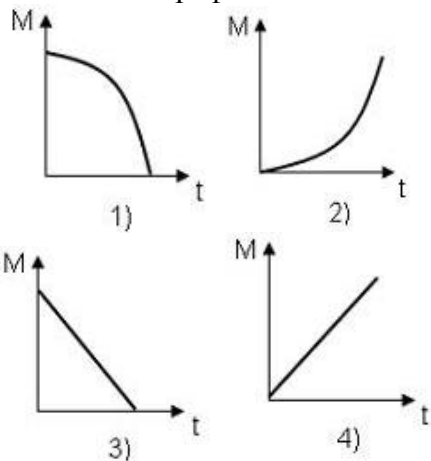


Варианты ответа:

1.  $5 \cdot c^{-2}$  2.  $10 \cdot c^{-2}$  3.  $20 \cdot c^{-2}$  4.  $7 \cdot c^{-2}$

Момент силы тяжести относительно оси, проходящей через точку O, равен  $M = mgR$ , где  $R$  – радиус обруча и плечо силы. Момент инерции обруча относительно оси, проходящей через центр тяжести (точку C), равен  $J_C = mR^2$ ; а момент инерции обруча относительно оси, проходящей через точку O, найдем по теореме Штейнера:  $J_O = J_C + mR^2 = 2mR^2$ . Используя основной закон динамики вращательного движения твердого тела вокруг неподвижной оси, можем определить угловое ускорение:  $\varepsilon = \frac{M}{J} = \frac{mgR}{2mR^2} = \frac{g}{2R} = 5 \cdot c^{-2}$

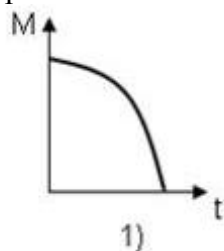
Величина момента импульса тела относительно неподвижной оси изменяется по закону  $L(t) = -\frac{1}{3}t^3 + 4t$ ; при этом зависимость величины момента сил, действующих на тело, описывается графиком ...



Скорость изменения величины момента импульса относительно какой-то неподвижной оси равна величине суммарного момента внешних сил относительно этой оси, т.е.  $\frac{dL}{dt} = M$ , где  $L$  – величина момента импульса,  $M$  – величина момента силы от времени.

$$\frac{dL}{dt} = -t^2 + 4 = M(t)$$

Графиком этой функции является убывающая ветвь параболы.



На барабан радиусом  $R = 0,5$  м намотан шнур, к концу которого привязан груз массой  $m = 10$  кг. Груз опускается с ускорением  $a = 2 \frac{m}{c^2}$ . Момент инерции барабана равен ...

Ответ:  $10 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$

Варианты ответа:

1.  $12,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$  2.  $10 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$   
3.  $2,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$  4.  $15 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$

Запишем уравнение движения груза  $mg - T = ma$ , где  $T$  – сила натяжения шнура, под действием которой также происходит вращение барабана. Уравнение вращения барабана:  $TR = I\varepsilon$ . Ускорение поступательного движения груза совпадает с линейным ускорением точек на поверхности барабана, поэтому ускорение груза  $a$  и угловое ускорение барабана  $\varepsilon$  связаны соотношением  $a = \varepsilon R$ . Из этих уравнений найдем

$I = \frac{g - a}{a} mR^2$ . Подставляя числовые значения, получим  $I = \frac{10 - 2}{2} \cdot 10 \cdot 0,5^2 = 10 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ .

### 4. Работа. Энергия.

На рисунке показан график зависимости потенциальной энергии  $W_p$  от координаты  $x$ .

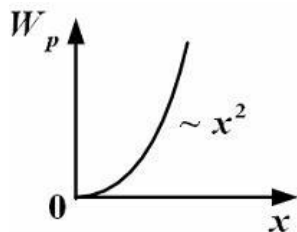
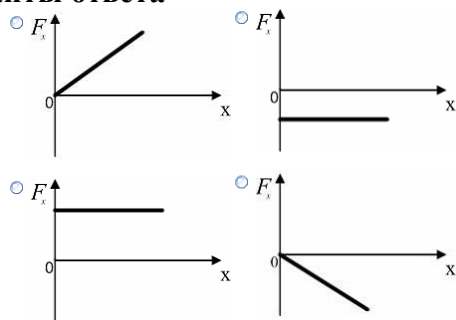


График зависимости проекции силы  $F_x$  от координаты  $x$  имеет вид ...

**Варианты ответа**



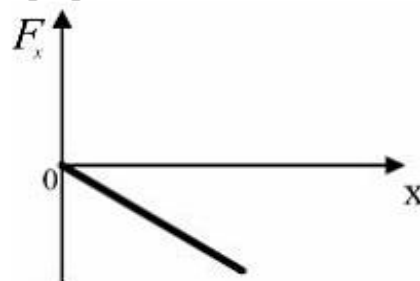
Потенциальная энергия, как видно из графика, пропорциональна квадрату координаты  $x$ :  $W_p = kx^2$ ,

где  $k$  – коэффициент пропорциональности.

Проекция вектора силы  $F_x$  на ось  $X$  связана с потенциальной энергией соотношением  $F_x = -\frac{\partial W_p}{\partial x}$  и равна

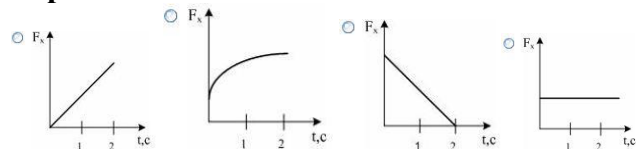
$$F_x = -2kx.$$

График этой зависимости имеет вид



Зависимость импульса частицы от времени описывается законом  $\vec{p} = 2t\vec{i} + 3t^2\vec{j}$ , где  $\vec{i}$  и  $\vec{j}$  – единичные векторы координатных осей  $X, Y$  соответственно. Зависимость горизонтальной проекции силы  $F_x$ , действующей на частицу, от времени представлена на графике ...

**Варианты ответа:**



Сила  $\vec{F}$ , действующая на материальную точку, равна скорости изменения ее импульса  $\vec{p}$ :  $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$ . В нашем случае

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d}{dt}(2t\vec{i} + 3t^2\vec{j}) = 2\vec{i} + 6t\vec{j}, \text{ и, сравнивая } \vec{F} = F_x\vec{i} + F_y\vec{j},$$

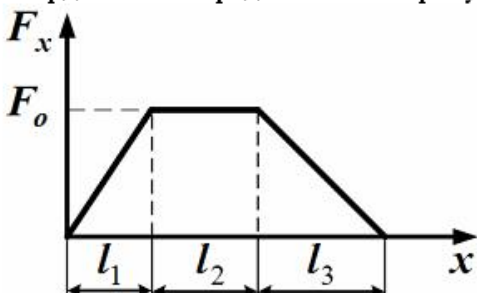
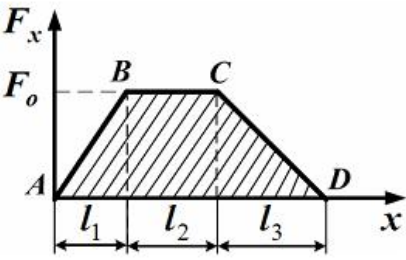
находим  $F_x = 2H = \text{const}$  и  $F_y = 6tH$ .

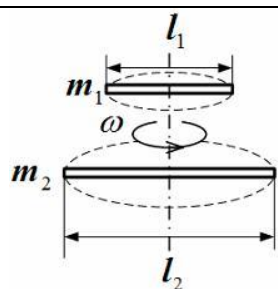
Проекция силы  $\vec{F}$  на ось  $x$   $F_x = 2H > 0$ ; следовательно, с течением времени горизонтальная составляющая силы не меняется.

Кинетическая энергия тела (спутника), движущегося по круговой орбите вокруг Земли, меньше его гравитационной потенциальной энергии, взятой по модулю, в \_\_\_\_\_ раза.

**Ответ:** в 2 раза

Уравнение движения по круговой орбите вокруг Земли:  $\frac{mv^2}{r} = G \frac{mM}{r^2}$ . Отсюда следует:  $\frac{mv^2}{2} = \frac{1}{2} G \frac{mM}{r}$ . Потенциальная энергия тела в гравитационном поле Земли  $U = -G \frac{mM}{r}$ , т.е. кинетическая энергия в 2 раза меньше гравитационной потенциальной энергии, взятой по модулю.

<p>Тело движется вдоль оси <math>x</math> под действием силы, зависимость которой от координаты <math>x</math> представлена на рисунке:</p>  <p>Работа силы на пути <math>l = l_1 + l_2 + l_3</math> определяется выражением ...</p> <p>Ответ: <math>\frac{l_1 + 2l_2 + l_3}{2} F_0</math></p> <p>Варианты ответа</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="radio"/> <math>(l_1 + 2l_2 + l_3)F_0</math></li> <li><input type="radio"/> <math>(l_1 + l_2 + l_3)F_0</math></li> <li><input type="radio"/> <math>\frac{l_1 + 2l_2 + l_3}{2} F_0</math></li> <li><input type="radio"/> <math>\frac{l_1 + l_2 + l_3}{2} F_0</math></li> </ul>	<p>Работа переменной силы в случае одномерного движения на участке <math>[x_1, x_2]</math> определяется как интеграл: <math>A = \int_{x_1}^{x_2} F_x dx</math></p> <p>. На графике зависимости силы от координаты искомая работа представлена площадью, ограниченной кривой зависимости и осью координат (геометрический смысл интеграла). Следовательно, искомая работа численно равна площади трапеции ABCD, то есть произведению полусуммы оснований на высоту:</p> $A = \frac{(AD) + (BC)}{2} F_0 = \frac{(l_1 + l_2 + l_3) + l_2}{2} F_0 = \frac{l_1 + 2l_2 + l_3}{2} F_0$ 
<p>Тело массы <math>m = 1 \text{ кг}</math> поднимают по наклонной плоскости. Высота наклонной плоскости <math>h = 1 \text{ м}</math>, длина ее основания <math>a = 2 \text{ м}</math>, коэффициент трения <math>k = 0,2</math>. Минимальная работа, которую надо совершить, в джоулях равна ...</p> <p>Ответ: <math>A = 14 \text{ Дж}</math></p>	<p>Минимальная сила, которую надо приложить к телу, чтобы поднимать его по наклонной плоскости без ускорения, равна сумме составляющей силы тяжести, параллельной наклонной плоскости, и силы трения: <math>F = mg \sin \alpha + kmg \cos \alpha</math>. Работа равна <math>A = F \cdot l</math>, где <math>l</math> – длина наклонной плоскости. Учитывая, что <math>l \sin \alpha = h</math> и <math>l \cos \alpha = a</math>, получим <math>A = mg(h + ka)</math>. Следовательно, минимальная работа <math>A = 14 \text{ Дж}</math>.</p>
<p>Шар радиуса <math>R</math> и массы <math>M</math> вращается с угловой скоростью <math>\omega</math>. Работа, необходимая для увеличения скорости его вращения в 2 раза, равна...</p> <p>Ответ: <math>A = 0,6MR^2\omega^2</math></p> <p>Варианты ответа:</p> <p>1. <math>0,6MR^2\omega^2</math> 2. <math>MR^2\omega^2</math> 3. <math>0,75MR^2\omega^2</math> 4. <math>1,5MR^2\omega^2</math></p>	<p>Кинетическая энергия вращающегося тела <math>E = \frac{1}{2} I \omega^2</math>, где <math>I</math> – момент инерции тела.</p> <p>Момент инерции шара <math>I = \frac{2}{5} MR^2</math>. Работа равна увеличению кинетической энергии шара</p> $A = \Delta E = E_2 - E_1 = \frac{1}{2} I (2\omega)^2 - \frac{1}{2} I \omega^2 = \frac{3}{2} I \omega^2$ <p>Подставляя значение момента инерции, получим <math>A = 0,6MR^2\omega^2</math></p>
<p>Для того чтобы раскрутить стержень массы <math>m_1</math> и длины <math>l_1</math> (см. рисунок) вокруг вертикальной оси, проходящей перпендикулярно через его середину, до угловой скорости <math>\omega</math>, необходимо совершить работу <math>A_1</math>.</p>	<p>Совершенная работа равна кинетической энергии вращательного движения стержня <math>W_{2к} = \frac{J\omega^2}{2}</math>, где момент инерции стержня <math>J</math> пропорционален массе и квадрату длины, <math>J \sim ml^2</math> (момент инерции стерж-</p>



Для того чтобы раскрутить до той же угловой скорости стержень массы  $m_2 = \frac{m_1}{2}$  и длины  $l_2 = 2l_1$  необходимо совершить работу

... Ответ:  $A_2 = 2A_1$

Варианты ответа:

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

ня массы  $m$  и длины  $l$  относительно оси, проходящей перпендикулярно ему через середину стерж-

ня, равен  $J = \frac{1}{12}ml^2$ ). Следовательно, работа по раскручиванию до такой же угловой скорости  $\omega$  стержня вдвое меньшей массы, но в 2 раза длиннее будет в 2 раза больше:  $A_2 = 2A_1$ .

### 5. Законы сохранения в механике.

Тело брошено вертикально вверх с начальной скоростью  $v_0$ . Его скорость на высоте, равной  $1/3$  от максимальной высоты подъема, равна ...

Ответ:  $v = v_0 \sqrt{\frac{2}{3}}$

Варианты ответа:

1.  $\sqrt{\frac{1}{3}}v_0$  2.  $\sqrt{\frac{2}{3}}v_0$  3.  $\frac{1}{3}v_0$  4.  $\frac{2}{3}v_0$

Применяем закон сохранения энергии:

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = mgh_{\text{м}} = \frac{1}{2}mv^2 + mg \frac{h_{\text{м}}}{3}$$

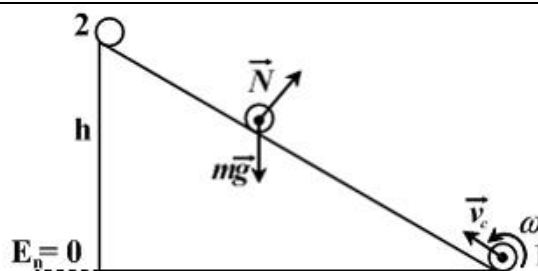
Отсюда находим  $v = v_0 \sqrt{\frac{2}{3}}$

Шар и полая сфера, имеющие одинаковые массы и радиусы, вкатываются без проскальзывания на горку. Если начальные скорости этих тел одинаковы, то ...

Варианты ответа:

1. выше поднимется шар
2. высоту подъема тел невозможно определить
3. оба тела поднимутся на одну и ту же высоту
4. выше поднимется полая сфера

Ответ: выше поднимется полая сфера





Воспользуемся законом сохранения механической энергии. Полная энергия тел не изменяется, поэтому  $E_{k1} + E_{n1} = E_{k2} + E_{n2}$ . Здесь 1 и 2 – состояния системы,  $E_n$  – потенциальная энергия тела, причем  $E_{n1} = 0$ , и кинетическая энергия плоского движения твердого тела равна сумме кинетической энергии поступательного движения и кинетической энергии вращения вокруг оси, проходящей через центр масс:

$$E_k = E_{\text{пост}} + E_{\text{вр}} = \frac{mv_c^2}{2} + \frac{I_c \omega^2}{2}.$$

В последней формуле  $I_c$  – момент инерции тела относительно оси, проходящий через его центр масс;  $v_c$  – скорость его центра масс. Из условия отсутствия проскальзывания следует, что мгновенные скорости точек касания тела о горку равны нулю, то есть угловая скорость  $\omega = \frac{v_c}{R}$ .

В нашем случае, энергии тела в первом и во втором состояниях равны:

$$E_{k1} = \frac{mv_c^2}{2} + \frac{I_c \omega^2}{2}, \quad E_{n1} = 0, \quad E_{k2} = 0, \quad E_{n2} = mgh.$$

Из закона сохранения энергии

$$\frac{mv_c^2}{2} + \frac{I_c \omega^2}{2} = mgh \quad \text{следует} \quad \frac{mv_c^2}{2} + \frac{I_c v_c^2}{2R^2} = mgh \Rightarrow$$

$$h = \frac{v_c^2}{2g} + \frac{I_c}{2mg} \left( \frac{v_c}{R} \right)^2.$$

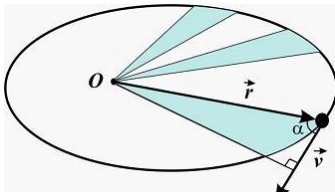
Анализируя последнюю формулу, видим, что при равенстве масс, скоростей, радиусов однородного шара и поллой сферы  $h \sim I_c$ . Сравним моменты инерции тел, обозначив их у шара  $I_{c1}$ , у поллой сферы –  $I_{c2}$ .

Момент инерции  $I$  – величина, характеризующая распределение массы тела относительно оси вращения и являющаяся мерой инертности тела при вращательном движении. Вся масса поллой сферы находится на расстоянии  $R$  от оси вращения, а у шара распределена равномерно вдоль радиуса сферы. Тогда  $I_{c1} < I_{c2}$ , следовательно,

$h_1 < h_2$ . Значит, поллая сфера поднимется на горку выше, чем однородный шар.

В случае действия на тело центральной силы радиус-вектор, проведенный к нему из центра, описывает в равные промежутки времени равные площади. Если в начальный момент расстояние от планеты до Солнца  $r$ , скорость  $v$ , угол между скоростью планеты и радиус-вектором  $r$  равен  $\alpha$ , то за время

Выразим момент импульса тела через заданные параметры начального положения:  $L = mvr \sin \alpha$ . Из закона сохранения момента импульса следует, что величина  $vr \sin \alpha = \text{const}$ , т.е. должна оставаться постоянной в процессе движения. Площадь, описываемая радиус-вектором за бесконечно малый промежуток времени будет равна площади тре-

<p><math>t</math> радиус-вектор, проведенный от Солнца к планете, опишет площадь ...</p> <p>Ответ: <math>\frac{1}{2} v r t \sin \alpha</math></p> 	<p>угольника с гипотенузой <math>r</math>, катетами <math>r \sin \alpha</math> и <math>v dt</math>, т.е. <math>dS = \frac{1}{2} r \sin \alpha v dt</math>. Следовательно, за время <math>t</math> радиус-вектор, проведенный от Солнца к планете, опишет площадь</p> $S = \int_0^t \frac{1}{2} r \sin \alpha v dt = \frac{1}{2} v r \sin \alpha \int_0^t dt = \frac{1}{2} v r t \sin \alpha$
<p>Шарик массой <math>m</math> упал с высоты <math>H</math> на стальную плиту и упруго отскочил от нее вверх. Изменение импульса шарика в результате удара равно ...</p> <p>Ответ: <math>m\sqrt{8gH}</math></p> <p>Варианты ответа:</p> <p>1. <math>2m\sqrt{gH}</math> 2. <math>m\sqrt{\frac{1}{2}gH}</math> 3. <math>m\sqrt{2gH}</math> 4. <math>m\sqrt{8gH}</math></p>	<p>На высоте <math>H</math> шарик обладает потенциальной энергией <math>E_p = mgH</math>. Перед ударом о плиту шарик имеет кинетическую энергию <math>E_k = \frac{mv^2}{2}</math>. Используя закон сохранения механической энергии: <math>mgH = \frac{mv^2}{2}</math>, <math>v = \sqrt{2gH}</math>. Изменение импульса шарика при абсолютно упругом ударе равно: <math>\Delta p = mv - (-mv) = 2mv</math>. Следовательно, <math>\Delta p = 2m\sqrt{2gH} = m\sqrt{8gH}</math>.</p>
<p>Тело массой <math>m</math> движется со скоростью <math>v</math> и ударяется о неподвижное тело такой же массы. Удар центральный и неупругий. Количество тепла, выделившееся при ударе, равно ...</p> <p>Ответ: <math>Q = \frac{1}{4}mv^2</math></p> <p>Варианты ответа:</p> <p>1. <math>Q = \frac{5}{4}mv^2</math> 2. <math>Q = \frac{1}{4}mv^2</math> 3. <math>Q = \frac{1}{2}mv^2</math> 4. <math>Q = \frac{3}{4}mv^2</math></p>	<p>Пусть <math>u</math> – скорость тел после удара. По закону сохранения импульса <math>mv = 2mu</math>. Отсюда находим <math>u = \frac{v}{2}</math>. Количество выделившегося тепла находим как уменьшение кинетической энергии <math>Q = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}(2m)u^2 = \frac{1}{4}mv^2</math>.</p>
<p>При выстреле орудия снаряд вылетел из ствола, расположенного под углом <math>\alpha = 60^\circ</math> к горизонту, вращаясь вокруг своей продольной оси с угловой скоростью <math>\omega = 200 \text{ с}^{-1}</math>. Момент инерции снаряда относительно этой оси <math>I = 15 \text{ кг} \cdot \text{м}^2</math>, время движения снаряда в стволе <math>t = 2 \cdot 10^{-2} \text{ с}</math>. На ствол орудия во время выстрела действует момент сил ...</p> <p>Ответ: <math>15 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м}</math></p> <p>Варианты ответа:</p> <p>1. <math>75 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}</math> 2. 0 3. <math>60 \text{ Н} \cdot \text{м}</math> 4. <math>15 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м}</math></p>	<p>Найдем угловое ускорение вращения снаряда относительно продольной оси при движении в стволе <math>\varepsilon = \frac{\omega}{t}</math>. Со стороны ствола орудия на снаряд действует момент сил <math>M = I\varepsilon</math>. По закону сохранения момента импульса для замкнутой системы такой же по модулю, но противоположно направленный момент сил <math>M_1 = M</math> действует на ствол орудия: <math>M_1 = I \frac{\omega}{t}</math></p> $M_1 = 15 \cdot \frac{200}{2 \cdot 10^{-2}} = 15 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м}$
<p>При выстреле орудия снаряд вылетел из ствола с угловой скоростью <math>\omega = 200 \text{ с}^{-1}</math> под углом <math>\alpha = 60^\circ</math> к горизонту. Момент инерции снаряда относительно его продольной оси <math>I = 15 \text{ кг} \cdot \text{м}^2</math>, расстояние между коле-</p>	<p>Найдем угловое ускорение вращения снаряда относительно продольной оси при выстреле <math>\varepsilon = \frac{\omega}{t}</math>. Со стороны ствола орудия на снаряд действует момент сил <math>M = I\varepsilon</math>. По третьему закону Ньютона такой же по модулю, но противоположно направленный</p>

сами орудия  $l = 1,5 \text{ м}$ , время движения снаряда в стволе  $t = 2 \cdot 10^{-2} \text{ с}$ . Силы давления (в килоньютонах) земли, действующие на колеса во время выстрела, отличаются на ...  
**Ответ:** 50кН

момент сил  $M_1 = M$  действует на ствол орудия. Его проекция на горизонтальную плоскость  $M_{1X} = I\varepsilon \cdot \cos \alpha$  уравнивается моментом, возникающим за счет различия сил реакций опор (давления земли), действующих на колеса,  $\Delta F \cdot l = I\varepsilon \cdot \cos \alpha$ , где  $\Delta F = F_1 - F_2$  - разность сил реакций опор. Отсюда находим

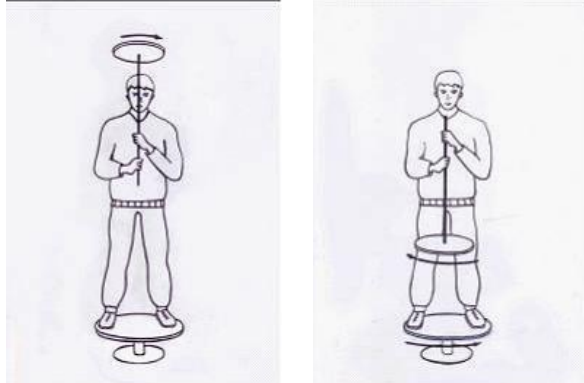
$$\Delta F = \frac{I\omega}{lt} \cos \alpha$$

Вычисляем

$$\Delta F = \frac{15 \cdot 200}{1,5 \cdot 2 \cdot 10^{-2}} \cdot \frac{1}{2} = 5 \cdot 10^4 \text{ Н} = 50 \text{ кН}$$

Экспериментатор, стоящий на неподвижной скамье Жуковского, получает от помощника колесо, вращающееся вокруг вертикальной оси с угловой скоростью  $\omega$ . Если экспериментатор повернет ось вращения колеса на угол  $180^\circ$ , то он вместе с платформой придет во вращение с угловой скоростью  $\omega/5$ .

Воспользуемся законом сохранения момента импульса:  $\vec{L}_1 = \vec{L}_2$ . Векторы момента импульса системы  $\vec{L}_1$  и  $\vec{L}_2$  до поворота и после поворота оси вращения колеса равны:  $\vec{L}_1 = I_{\text{ч}} \cdot 0 + I_{\text{к}} \cdot \vec{\omega}_{\text{к}}$  и  $\vec{L}_2 = I_{\text{ч}} \cdot \vec{\omega}_{\text{ч}} + I_{\text{к}} \cdot \vec{\omega}_{\text{к}}$ , где  $I_{\text{ч}}$  и  $I_{\text{к}}$ ,  $\vec{\omega}_{\text{ч}}$  и  $\vec{\omega}_{\text{к}}$  - моменты инерции и векторы угловых скоростей человека со скамьей и колеса соответственно. Следовательно,  $I_{\text{ч}} \cdot 0 + I_{\text{к}} \cdot \vec{\omega}_{\text{к}} = I_{\text{ч}} \cdot \vec{\omega}_{\text{ч}} + I_{\text{к}} \cdot \vec{\omega}_{\text{к}}$ , а в проекциях на вертикальную ось:  $I_{\text{к}} \cdot \omega_{\text{к}} = I_{\text{ч}} \cdot \omega_{\text{ч}} + (-I_{\text{к}} \cdot \omega_{\text{к}})$ . Знак минус показывает изменение направления момента импульса колеса при повороте его оси вращения на угол  $180^\circ$ . Из последнего уравнения находим отношение момента инерции тела человека вместе со скамьей к моменту инерции колеса:



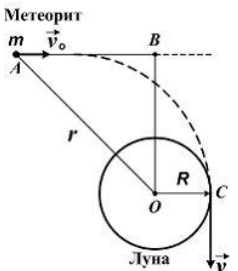
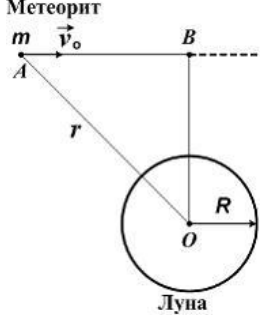
Отношение момента инерции экспериментатора со скамьей к моменту инерции колеса равно ...  
**Ответ:** 10

$$\frac{I_{\text{ч}}}{I_{\text{к}}} = \frac{2 \cdot \omega_{\text{к}}}{\omega_{\text{ч}}} = \frac{2\omega}{\omega/5} = 10$$

**Варианты ответа:** 2,5 5 4 10

Находясь на расстоянии  $r \gg R$ , по направлению к Луне летит метеорит, скорость которого  $v_0$ .

Метеорит массой  $m$  должен двигаться по гиперболической орбите, касающейся поверхности Луны в точке С.



Для расчета минимального прицельного рас-

При движении по этой траектории выполняется закон сохранения механической энергии:



стояния  $OB$ , при котором метеорит не упадет на поверхность Луны, используют законы сохранения механической энергии и момента импульса. Выберите из предложенных вариантов верную запись этих законов. ус  $R$  и массу  $M$  планеты Луна, гравитационную постоянную  $G$ , скорость метеорита вблизи поверхности Луны  $v$  считать известными.

**Варианты ответа:**

- $\frac{mv_0^2}{2} = -G \frac{mM}{R} + \frac{mv^2}{2}$ ,  
 $mv_0(OA) = m vR$ .
- $\frac{mv_0^2}{2} = -G \frac{mM}{R} + \frac{mv^2}{2}$ ,  
 $mv_0 = mv$ .
- $\frac{mv_0^2}{2} = G \frac{mM}{R} + \frac{mv^2}{2}$ ,  
 $mv_0(OB) = m vR$ .
- $\frac{mv_0^2}{2} = -G \frac{mM}{R} + \frac{mv^2}{2}$ ,  
 $mv_0(OB) = m vR$ .

$$\frac{mv_0^2}{2} = -G \frac{mM}{R} + \frac{mv^2}{2},$$

**Ответ:**  $mv_0(OB) = m vR$ .

$\frac{mv_0^2}{2} = -G \frac{mM}{R} + \frac{mv^2}{2}$ , где  $v$  – скорость метеорита вблизи Луны. Действительно, метеорит приближается к Луне под действием силы тяготения. Работа этой силы является мерой увеличения кинетической энергии метеорита (скорость метеорита увеличивается  $v > v_0$ ) и одновременно мерой уменьшения его потенциальной энергии от 0 в точке  $A$  до  $-G \frac{mM}{R}$  в точке  $C$ . Луна из-за большой массы в процессе взаимодействия будет оставаться в покое, а вследствие равенства нулю момента силы притяжения относительно центра Луны момент импульса метеорита относительно центра Луны будет сохраняться:  $mv_0(OB) = m vR$ , где  $OB$  и  $R$  – плечи вектора импульса метеорита вдали от Луны и в момент наибольшего сближения относительно центра Луны соответственно. Итак, для расчета минимального прицельного расстояния  $OB$  используется система уравнений:

$$\frac{mv_0^2}{2} = -G \frac{mM}{R} + \frac{mv^2}{2},$$

$$mv_0(OB) = m vR.$$

Кинетическая энергия тела (спутника), движущегося по круговой орбите вокруг Земли, меньше его гравитационной потенциальной энергии, взятой по модулю, в \_\_\_\_ раза.

**Ответ:** в 2 раза

Уравнение движения по круговой орбите вокруг Земли:  $\frac{mv^2}{r} = G \frac{mM}{r^2}$ . Отсюда следует:

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{1}{2} G \frac{mM}{r}$$

. Потенциальная энергия тела в гравитационном поле Земли  $U = -G \frac{mM}{r}$ , т.е. кинетическая энергия в 2 раза меньше гравитационной потенциальной энергии, взятой по модулю

## 6. Элементы специальной теории относительности.

На борту космического корабля, летящего со скоростью  $0,8c$  относительно неподвижной системы отсчета, произошли два события, разделенные промежутком времени  $\tau_0 = 6 \text{ сек}$ . В неподвижной системе отсчета длительность этого промежутка равна ...

- 10 сек     6 сек  
 3,6 сек     13 сек

Из преобразований Лоренца следует, что на борту космического корабля, движущегося относительно инерциальной системы отсчета со скоростью, сравнимой со скоростью света, наблюдается эффект замедления хода времени. В неподвижной системе отсчета длительность этого

промежутка равна  $\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ , где  $v$

– скорость движения корабля,  $c$  –

скорость света.  $\tau = \frac{6}{\sqrt{1 - \frac{(0,8c)^2}{c^2}}}$

$$= \frac{6}{\sqrt{0,36}} = 10 \text{ сек}.$$

Установите соответствие между физическими явлениями и теоретическими положениями, объясняющими эти явления.

1. Сумма масс протона и электрона больше массы атома водорода:  $m_p + m_e > M_{am}(^1_1H)$ .

2. Два одинаковых стержня движутся навстречу друг другу. Для наблюдателя в системе отсчета, в которой стержни движутся навстречу друг другу с одинаковыми скоростями, совпадение правых и левых концов стержней происходит одновременно. Для наблюдателя в системе отсчета стержня  $AB$ , в которой стержень  $A_1B_1$  движется в направлении от  $A$  к  $B$ , сначала совпадут левые концы стержней ( $A$  и  $A_1$ ), а затем правые ( $B$  и  $B_1$ ).




В системе отсчета стержня  $A_1B_1$ , в которой движется стержень  $AB$  в направлении от  $B_1$  к  $A_1$ , сначала совпадут правые концы стержней ( $B$  и  $B_1$ ), а затем левые ( $A$  и  $A_1$ ).

3. Длина движущегося тела сокращается в направлении движения в соответствии с формулой  $l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ .

4. Если событие  $B$  является следствием события  $A$ , то наступление события  $A$  предшествует наступлению события  $B$  во всех инерциальных системах отсчета:  $t_A < t_B$ .

Энергия системы свободных (невзаимодействующих) частиц «протон + электрон» больше энергии системы этих частиц в состоянии атома водорода на энергию ионизации атома. В соответствии с формулой Эйнштейна увеличению энергии системы отвечает увеличение массы:  $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$ .

Зависимость последовательности совпадения концов движущихся стержней от выбора системы отсчета – наглядный пример относительности одновременности. События, одновременные в одной системе отсчета, становятся неодновременными в другой, и даже может меняться порядок их наступления во времени. Сокращение размеров движущегося тела устанавливается с помощью преобразований Лоренца, поскольку именно они устанавливают связь между пространственными и временными координатами различных инерциальных систем отсчета. Сохранение причинно-следственных связей, несмотря на относительность одновременности и возможную смену чередования событий во времени, гарантируется инвариантностью интервала между событиями относительно преобразований Лоренца. Принцип относительности – один из двух постулатов, лежащих в основе специальной теории относительности, но для указанных явлений он не дает непосредственного объяснения.

<p>Укажите соответствие для каждого нумерованного элемента задания</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. принцип относительности</li> <li>2. Формула Эйнштейна связи массы и энергии: <math>E = mc^2</math>.</li> <li>3. относительность одновременности</li> <li>4. инвариантность интервала между событиями</li> <li>5. преобразования Лоренца</li> </ol>	
<p>Скорость частицы <math>v = \frac{\sqrt{3}}{2}c \approx 0,87c</math>, где <math>c</math> – скорость света. Отношение полной энергии частицы к ее энергии покоя равно ...</p> <p><b>Ответ: 2</b></p>	<p>Полная энергия частицы <math>E = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}</math>, энергия покоя <math>E_0 = mc^2</math>. Отношение <math>\frac{E}{E_0} = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}</math>. Подставляя <math>\frac{v}{c} = \frac{\sqrt{3}}{2}</math>, получим <math>\frac{E}{E_0} = 2</math>.</p>
<p>В пунктах <math>A</math> и <math>B</math> на Земле, удаленных на расстоянии <math>l = 10 \text{ км}</math>, произошли одновременно два события, например зажглись экраны телевизоров. Число микросекунд, разделяющих эти события с точки зрения наблюдателя на космическом корабле, удаляющемся от Земли вдоль прямой <math>AB</math> со скоростью <math>v = 0,8c</math>, где <math>c</math> – скорость света, равно ...</p> <p><b>Ответ</b> <math>t'_A - t'_B = 44 \text{ мкс}</math></p>	<p>Воспользуемся преобразованиями Лоренца. Запишем уравнение, устанавливающее связь между временами в разных системах отсчета: <math>t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}</math>, где штрихованные величины принадлежат системе отсчета космического корабля, а не штрихованные – системе отсчета Земли. По условию <math>t_A = t_B</math>,</p> <p><math>x_B - x_A = l</math>, <math>\frac{v}{c} = 0,8</math>, <math>\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} = 0,6</math>. Получим</p> <p><math>t'_A - t'_B = \frac{0,8l}{0,6c} = \frac{4}{3} \cdot \frac{10^4}{3 \cdot 10^8} = 44 \cdot 10^{-6}</math> секунды, или <math>t'_A - t'_B = 44 \text{ мкс}</math>.</p>
<p>Если масса тела возросла на 1 г, полная энергия тела должна ...</p> <p><b>Варианты ответа</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. увеличиться на <math>3 \cdot 10^5 \text{ Дж}</math></li> <li>2. уменьшиться на <math>90 \cdot 10^{12} \text{ Дж}</math></li> <li>3. увеличиться на <math>90 \cdot 10^{12} \text{ Дж}</math></li> <li>4. увеличиться на <math>10^{-3} \text{ Дж}</math></li> </ol>	<p>Связь между массой и энергией определяется формулой Эйнштейна <math>E = mc^2</math>, где <math>c</math> – скорость света. Следовательно, энергия тела должна возрасти на <math>\Delta E = \Delta mc^2 = 10^{-3} \cdot 9 \cdot 10^{16} = 90 \cdot 10^{12} \text{ Дж}</math>.</p>
<p>На борту космического корабля нанесена эмблема в виде геометрической фигуры:</p>  <p>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 ...</p> 	<p>Из преобразований Лоренца следует, что линейный размер тела, движущегося относительно инерциальной системы отсчета со скоростью, сравнимой со скоростью света, уменьшается в направлении движения. Поперечные размеры тела не зависят от скорости его движения и одинаковы во всех инерциальных системах отсчета, поэтому форма тела изменится, как показано на рисунке</p> 

## 2. Молекулярная физика и термодинамика

### 7. Распределение Максвелла и Больцмана.

Формула Больцмана  $n = n_0 e^{-\frac{W_p}{kT}}$  характеризует распределение частиц, находящихся в состоянии хаотического теплового движения, в потенциальном силовом поле, в частности распределение молекул по высоте в изотермической атмосфере. Соотнесите рисунки и соответствующие им утверждения.

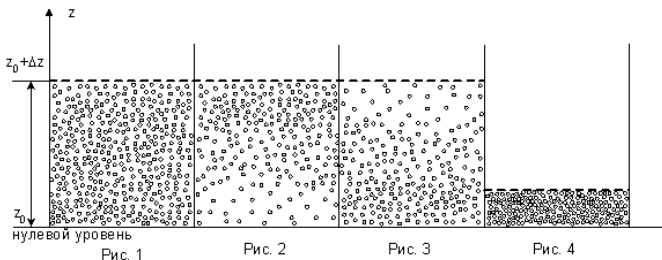


Рис.3. Распределение молекул воздуха в атмосфере Земли.

Рис.4. Распределение молекул в силовом поле при температуре  $T \rightarrow 0$ .

Рис.2. Распределение молекул не является больцмановским и описывается функцией  $n = n_0 e^{\frac{W_p}{kT}}$ .

Рис.1. Распределение молекул в силовом поле при очень высокой температуре, когда энергия хаотического теплового движения значительно превосходит потенциальную энергию молекул.

Д) Распределение молекул по кинетическим энергиям

На рисунке представлен график функции распределения молекул кислорода по скоростям (распределение Максвелла) для температуры  $T=273$  К, при скорости  $380 \text{ м/с}$  функция достигает максимума. Здесь

плотность вероятности или доля молекул, скорости которых заключены в интервале скоростей от  $v$  до  $v + dv$  в расчете на единицу этого интервала. Для распределения Максвелла справедливы утверждения, что ...

$$f(v) = \frac{dP}{dv} = \frac{dN}{Ndv}$$

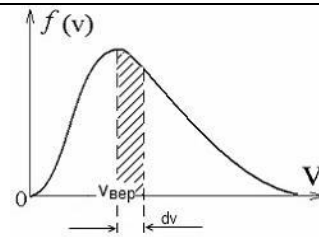
Концентрация молекул в однородном поле силы тяжести убывает с высотой по закону

$$n = n_0 e^{-\frac{Mgz}{RT}} = n_0 e^{-\frac{mgz}{kT}}$$

(распределение Больцмана на рис. 3), где  $n$  – концентрация молекул на высоте  $z$ ,  $n_0$  – концентрация молекул на высоте  $z_0 = 0$ ,  $M$  – молярная масса,  $m$  – масса молекулы,  $g$  – ускорение свободного падения,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура.

В предельных случаях: если  $T \rightarrow \infty$ , то  $n \rightarrow n_0$  и молекулы равномерно распределяются по высоте (рис. 1); если  $T \rightarrow 0$ , то  $n \rightarrow 0$  и молекулы располагаются на нулевом уровне (рис. 4). Если число молекул, имеющих большую потенциальную энергию, увеличивается по экспоненциальному закону  $n = n_0 e^{\frac{W_p}{kT}}$ , то такое распределение можно назвать «антибольцмановским», или инверсным (рис. 2)

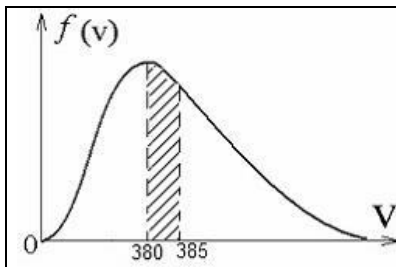
по экспоненциальному закону  $n = n_0 e^{\frac{W_p}{kT}}$ , то такое распределение можно назвать «антибольцмановским», или инверсным (рис. 2)



Функция распределения Максвелла  $f(v)$  имеет смысл плотности вероятности  $f(v) = \frac{dP}{dv} = \frac{dN}{Ndv}$ ,

где  $\frac{dN}{N}$  – доля молекул, скорости которых заключены в интервале от  $v$  до  $v + dv$ . В нашем случае  $dv = 5 \text{ м/с}$  вблизи  $v_{вер} = 380 \text{ м/с}$  – наиболее вероятной скорости молекул, близкой к которой

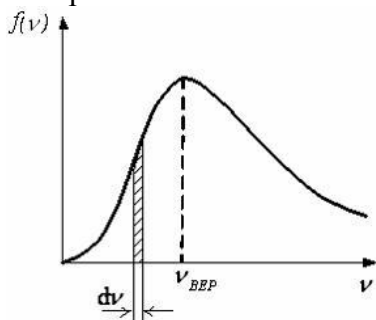
наиболее вероятной скорости молекул, близкой к которой



- с понижением температуры площадь под кривой уменьшается
- с ростом температуры наиболее вероятная скорость молекул увеличится
- отлична от нуля вероятность того, что молекула кислорода при  $T=273$  К имеет скорость, точно равную  $380 \text{ м/с}$
- площадь заштрихованной полоски равна доле молекул со скоростями в интервале от  $v_1 = 380 \text{ м/с}$  до  $v_2 = 385 \text{ м/с}$  или вероятности того, что скорость молекулы имеет значение в этом интервале скоростей

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 является верным утверждение, что ...

1. с увеличением температуры величина максимума функции увеличивается
2. при изменении температуры положение максимума не изменяется
3. при изменении температуры площадь под кривой не изменяется
4. с уменьшением температуры величина мак-

двигается большее число молекул.  $dN$  – число молекул, скорости которых заключены в интервале от  $380 \text{ м/с}$  до  $385 \text{ м/с}$ ,  $N$  – число всех молекул газа. Площадь заштрихованной полос-

$$S_{\text{заштрихованная}} = \int_v^{v+dv} f(v)dv = dP = \frac{dN}{N}$$

ки определяет долю молекул, скорости которых заключены в интервале от  $380 \text{ м/с}$  до  $385 \text{ м/с}$ . С ростом температуры максимум кривой смещается вправо, высота максимума убывает. Наиболее вероятная ско-

рость  $v_{\text{вер}} = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}}$  зависит от температуры газа: она увеличивается с повышением температуры. Вероятность того, что величина скорости может принять хотя бы какое-нибудь значение (достоверное

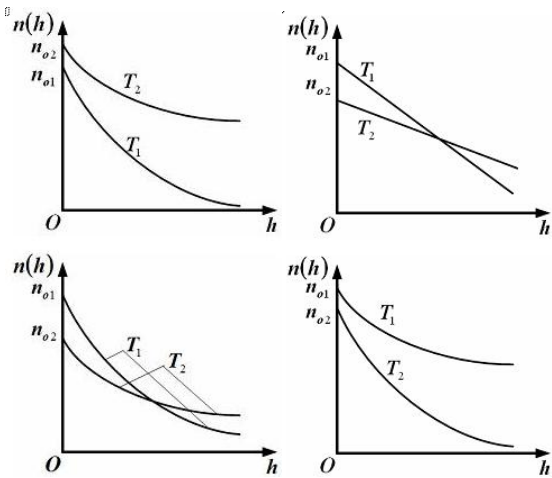
событие), равна единице  $\int_0^{\infty} f(v)dv = 1$ , поэтому при изменении температуры площадь под кривой остается равной единице. Если точно задана скорость ( $v_{\text{вер}} = 380, (0) \text{ м/с}$ ), то  $dv = 0$ , следовательно, вероятность  $dP = 0$ .

Полная вероятность равна:  $\int_0^{\infty} f(v)dv = 1$ , т.е. площадь, ограниченная кривой распределения Максвелла, равна единице и при изменении температуры не изменяется. Из формулы наиболее вероятной скорости  $v_{\text{вер}} = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}}$ , при которой функция  $f(v)$  максимальна, следует, что при повышении температуры максимум функции сместится вправо



сумма функции уменьшается

Зависимость концентрации молекул идеального газа во внешнем однородном поле силы тяжести от высоты для двух разных температур ( $T_2 > T_1$ ) представлена на рисунке ...

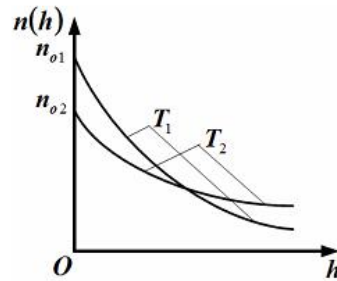


Зависимость концентрации молекул идеального газа от высоты  $h$  для некоторой температуры  $T$  определяется распределением Больцмана:

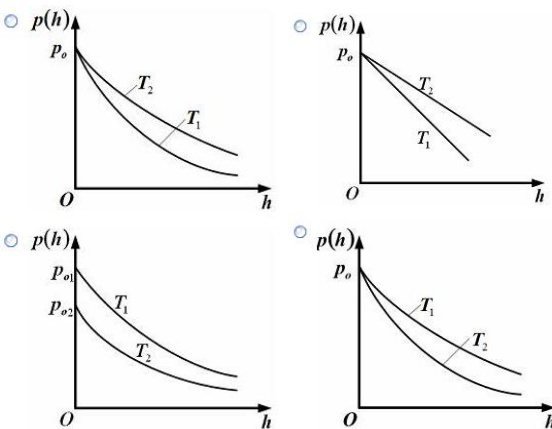
$$n(h) = n_o \exp\left(-\frac{m_o g h}{kT}\right) = n_o \exp\left(-\frac{W_p}{kT}\right), \text{ где } n_o -$$

концентрация молекул на высоте  $h = 0$ ,  $m_o$  – масса молекулы,  $g$  – ускорение свободного падения,  $k$  – постоянная Больцмана. Из формулы следует, что при постоянной температуре концентрация газа больше там, где меньше потенциальная энергия его молекул  $W_p$ , и уменьшается с высотой по экспоненциальному закону тем медленнее, чем больше температура:  $T_2 > T_1$ .

С повышением температуры из-за увеличения энергии хаотического теплового движения молекулы более равномерно распределяются по высоте, и поэтому концентрация молекул газа на «нулевом уровне» ( $h = 0$ ) уменьшается, а на высоте  $h$  увеличивается.



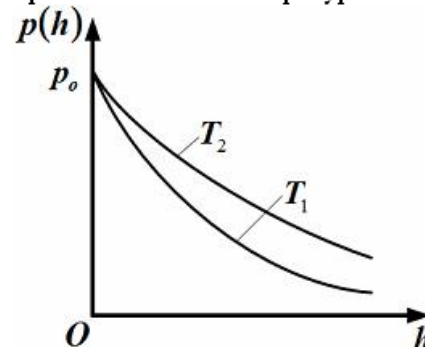
Зависимость давления идеального газа во внешнем однородном поле силы тяжести от высоты для двух разных температур ( $T_2 > T_1$ ) представлена на рисунке ...



Зависимость давления идеального газа от высоты  $h$  для некоторой температуры  $T$  определяется барометрической формулой:

$$p(h) = p_o \exp\left(-\frac{m_o g h}{kT}\right), \text{ где } p_o - \text{давление на}$$

высоте  $h = 0$ ,  $m_o$  – масса молекулы,  $g$  – ускорение свободного падения,  $k$  – постоянная Больцмана. Из формулы следует, что при постоянной температуре давление газа уменьшается с высотой по экспоненциальному закону тем медленнее, чем больше температура  $T$ . Давление  $p_o$  определяется весом всего газа и не меняется при изменении температуры.



## 8. Средняя энергия молекул.

<p>Кинетическая энергия вращательного движения всех молекул в 2 г водорода при температуре 100 К равна...</p>	<p>Средняя кинетическая энергия одной молекулы равна <math>\langle E \rangle = \frac{i}{2} kT</math>, где <math>k</math> – постоянная Больцмана, <math>T</math> – термодинамическая температура, <math>i</math> – сумма числа поступательных, числа вращательных и удвоенного числа колебательных степеней свободы молекулы <math>i = n_{\text{пост}} + n_{\text{вр}} + 2n_{\text{колеб}}</math>. Молекула водорода <math>H_2</math> имеет 2 вращательные степени свободы, следовательно, <math>\langle E_{\text{вр}} \rangle = \frac{2}{2} kT = kT</math>. В 2 г водорода содержится <math>N = \frac{m}{M} N_A</math> молекул, где <math>m</math> – масса газа, <math>M</math> – молярная масса водорода, <math>N_A</math> – число Авогадро. Кинетическая энергия вращательного движения всех молекул будет равна:  <math display="block">W_{\text{вр.}} = \frac{m}{M} N_A kT = \frac{m}{M} RT = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}} \cdot 8,31 \cdot 100 = 831 \text{ Дж}</math></p>
<p>Уравнение кинетической теории для давления идеального газа имеет вид <math>p = \frac{2}{3} n \langle E \rangle</math>, где <math>n</math> – концентрация молекул. Для газа водорода <math>\langle E \rangle</math> равно ...</p>	<p>Давление газа обусловлено ударами молекул о стенку сосуда и определяется средним значением кинетической энергии поступательного движения молекул, а значит, поступательными степенями свободы <math>i_{\text{пост.}} = 3</math>. Следовательно, и не зависит от вида газа.</p>
<p>Если для многоатомных молекул газа при температурах <math>10^2 \text{ K}</math> вклад энергии колебания ядер в теплоемкость газа пренебрежимо мал, то из предложенных ниже идеальных газов (водород, азот, гелий, водяной пар) изохорную теплоемкость <math>C_V = 3R</math> (универсальная газовая постоянная) имеет один моль ...  <b>Ответ:</b> водяной пар  <b>Варианты ответа:</b>  1) азота  2) водяного пара  3) гелия  4) водорода</p>	<p>Молярная теплоемкость газа при изохорном процессе равна <math>C_V = \frac{i}{2} R</math>, где по условию задачи число степеней свободы <math>i = i_{\text{пост}} + i_{\text{вращ}}</math>. В нашем случае <math>3R = \frac{i}{2} R</math>, следовательно, <math>i = 6</math>. Максимальное число поступательных степеней свободы равно 3, значит, <math>6 = 3_{\text{пост}} + 3_{\text{вращ}}</math>. Это возможно, когда газ имеет более двух атомов в нелинейной молекуле. Из предложенных газов это водяной пар.</p>
<p>На каждую степень свободы движения молекулы приходится одинаковая энергия, равная <math>\frac{1}{2} kT</math> (<math>k</math> – постоянная Больцмана, <math>T</math> – температура по шкале Кельвина). Средняя кинетическая энергия атомарного водорода равна <math>\langle E \rangle = \frac{3}{2} kT</math>  ... <b>Ответ</b>  <b>Варианты ответа:</b>  1. <math>\frac{5}{2} kT</math> 2. <math>\frac{1}{2} kT</math> 3. <math>3kT</math> 4. <math>\frac{3}{2} kT</math></p>	<p>Средняя кинетическая энергия молекулы равна <math>\langle E \rangle = \frac{i}{2} kT</math>, где <math>i</math> – число степеней свободы молекулы. Атомарный водород – это одноатомный газ, атомы которого в данной модели участвуют только в поступательном движении <math>\langle E_{\text{пост}} \rangle = \frac{i_{\text{пост}}}{2} kT</math>. Число степеней свободы <math>i_{\text{пост}} = 3</math>, т.к. положение центра инерции атома задается тремя координатами (<math>x, y, z</math>). Следовательно,  <math>\langle E \rangle = \frac{3}{2} kT</math></p>

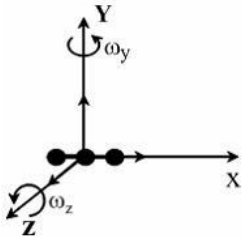
Если не учитывать колебательные движения в линейной молекуле углекислого газа  $CO_2$  (см. рис.), то отношение кинетической энергии вращательного движения к полной кинетической энергии молекулы равно ...

Ответ:  $\frac{2}{5}$



Варианты ответа

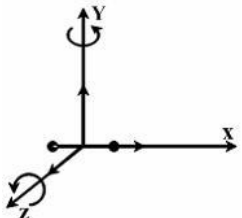
1.  $\frac{2}{13}$     2.  $\frac{3}{6}$     3.  $\frac{2}{5}$     4.  $\frac{3}{5}$



Из предложенных ниже идеальных газов выберите те, для которых отношение молярных теплоемкостей  $C_p/C_v$  равно  $7/5$  (колебаниями атомов внутри молекулы пренебречь).

Ответ воздух и кислород.

- гелий  
 воздух  
 кислород  
 водяной пар



Средняя кинетическая энергия молекулы равна  $\langle E \rangle = \frac{i}{2} kT$ , где  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – термодинамическая температура,  $i$  – сумма числа поступательных, числа вращательных и удвоенного числа колебательных степеней свободы молекулы:  $i = n_{\text{пост}} + n_{\text{вращ}} + 2n_{\text{колеб}}$ .

Для линейной молекулы углекислого газа  $CO_2$  (см. рис.) число степеней свободы поступательного движения  $n_{\text{пост}} = 3$ , вращательного –  $n_{\text{вращ}} = 2$ , колебательного –  $n_{\text{колеб}} = 0$ , поэтому  $i = 3 + 2 + 0 = 5$ .

Следовательно, средняя кинетическая энергия молекулы  $CO_2$  равна  $\langle E \rangle = \frac{5}{2} kT$ . Средняя энергия вращательного движения  $\langle E_{\text{вращ}} \rangle = 2 \cdot \frac{1}{2} kT = kT$  и составляет  $\frac{\langle E_{\text{вращ}} \rangle}{\langle E \rangle} = \left( \frac{2}{2} kT \right) / \left( \frac{5}{2} kT \right) = \frac{2}{5}$  части от полной энергии.

Из отношения  $\frac{C_p}{C_v} = \frac{\left(\frac{i+1}{2}\right)R}{\frac{i}{2}R} = \frac{i+2}{i}$ ;  $\frac{i+2}{i} = \frac{7}{5}$  найдем сумму числа поступательных и числа вращательных степеней свободы молекулы  $i = 5$ ,  $i = n_{\text{пост}} + n_{\text{вращ}} = 3_{\text{пост}} + 2_{\text{вращ}}$ . На рисунке изображена модель молекулы газа, для которой выполняется последнее равенство. Прямыми стрелками показаны вероятные направления поступательного движения молекулы, круглыми – вращательного движения.

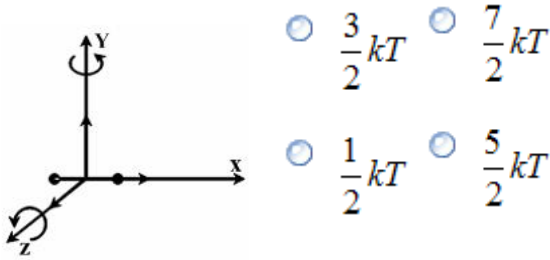
Из предложенных газов этому условию удовлетворяет воздух, т.к. в этой смеси газов большую часть составляют двухатомные газы азот и кислород, и газ кислород.



Средняя кинетическая энергия молекул газа при температуре  $T$  зависит от их конфигурации и структуры, что связано с возможностью различных видов движения атомов в молекуле и самой молекулы. При условии, что имеет место только поступательное и вращательное движение молекулы как целого, средняя кинетическая энергия молекул азота ( $N_2$ ) равна

Ответ:  $E=5/2kT$

Варианты ответа:



Для статистической системы в состоянии термодинамического равновесия на каждую поступательную и вращательную степени свободы приходится в среднем кинетическая энергия, равная  $\frac{kT}{2}$ , а на каждую

колебательную степень —  $kT$ . Средняя кинетическая энергия молекулы равна

$$\langle E \rangle = \frac{i}{2} kT, \text{ где } i - \text{сумма числа}$$

поступательных, числа вращательных и удвоенного числа колебательных степеней свободы молекулы. При условии, что имеют место только поступательное и вращательное движение, сумма числа степеней свободы равна  $i = n_{\text{пост}} + n_{\text{вр}}$ ; где  $n_{\text{пост}}$  — число степеней свободы поступательного движения, равное  $n_{\text{пост}} = 3$ ;  $n_{\text{вр}}$  — число степеней свободы вращательного движения, которое может быть равно  $n_{\text{вр}} = 0, 2, 3$ .

Для молекулярного азота (двухатомной молекулы)  $n_{\text{пост}} = 3$  и  $n_{\text{вр}} = 2$ .

Следовательно,  $i = 3 + 2 = 5$  (3 степени свободы поступательного движения по направлениям осей ординат  $X, Y, Z$  и 2

степени свободы вращательного движения вокруг осей  $Y$  и  $Z$ ) (см. рис.). Тогда средняя энергия молекул азота ( $N_2$ ) равна  $\langle E \rangle = \frac{5}{2} kT$ .

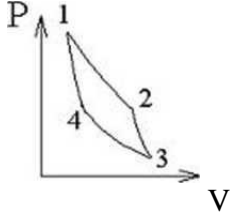
## 9. Второе начало термодинамики. Энтропия. Циклы.

КПД цикла Карно равен 40%. Если на 20% увеличить температуру нагревателя и на 20% уменьшить температуру охладителя, КПД (в %) достигнет значения ...

КПД обратимого цикла Карно равен:  $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} 100\%$  или  $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$  (в долях). После изменения температуры  $T_1^* = 1,2T_1$ ,  $T_2^* = 0,8T_2$ . Первоначальный КПД равен  $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 0,4$ , следовательно,  $0,4 = 1 - \frac{T_2}{T_1}$ , отсюда  $\frac{T_2}{T_1} = 0,6$ . После изменения  $\eta^* = \frac{T_1^* - T_2^*}{T_1^*} = 1 - \frac{T_2^*}{T_1^*} = 1 - \frac{0,8T_2}{1,2T_1} = 1 - \frac{0,8}{1,2} \cdot 0,6 = 0,6 = 60\%$ .

Тепловой двигатель, работающий по циклу Карно (см. рисунок), совершает за цикл работу, равную...

**Ответ:**  $A_{12} + A_{34}$



**Варианты ответа:**

- 1)  $A_{12} + A_{34}$
- 2)  $A_{34} + A_{41}$
- 3)  $A_{23} + A_{41}$
- 4)  $A_{12} + A_{23}$

Цикл Карно состоит из изотермического расширения газа 1-2, адиабатического расширения 2-3, изотермического сжатия 3-4 и адиабатического сжатия 4-1. Работа газа за цикл:  $A_{\text{цикл.}} = A_{12} + A_{23} + A_{34} + A_{41}$ , причем при расширении газ совершает положительную работу, а при сжатии – отрицательную. В адиабатическом процессе работа совершается только за счет изменения внутренней энергии газа. Поскольку температуры газа

$T_1 = T_2$  и  $T_3 = T_4$ , изменение внутренней энергии  $\Delta U_{23} = -\Delta U_{41}$  (в процессе 2-3 газ охлаждается, а в 4-1 – нагревается на одну и ту же температуру). Следовательно,  $A_{23} = -A_{41}$ , а работа за цикл  $A_{\text{цикл.}} = A_{12} + A_{34}$ , причем  $A_{34} < 0$

Если количество теплоты, отдаваемое рабочим телом холодильнику, увеличится в два раза, то коэффициент полезного действия тепловой машины ...

**Ответ:** уменьшится на  $\frac{Q_2}{Q_1}$ .

- уменьшится на  $\frac{Q_2}{2Q_1}$        увеличится на  $\frac{Q_2}{Q_1}$
- уменьшится на  $\frac{Q_2}{Q_1}$        увеличится на  $\frac{Q_2}{2Q_1}$

Коэффициент полезного действия тепловой машины определяется по формуле  $\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$ ,

где  $Q_1$  – количество теплоты, полученное рабочим телом от нагревателя;  $Q_2$  – количество теплоты, отданное рабочим телом холодильнику. При

увеличении в два раза  $Q_2$  коэффициент полезного действия:  $\eta_2 = \frac{Q_1 - 2Q_2}{Q_1} = 1 - 2\frac{Q_2}{Q_1}$ . Найдем изменение

$\eta_2 - \eta_1 = 1 - 2\frac{Q_2}{Q_1} - 1 + \frac{Q_2}{Q_1} = -\frac{Q_2}{Q_1}$ . Коэффициент полезного действия тепловой машины уменьшится на  $\frac{Q_2}{Q_1}$ .

В идеальной тепловой машине, работающей по циклу Карно, абсолютная температура нагревателя в 2 раза превышает температуру холодильника. Если температура холодильника уменьшится вдвое при неизменной температуре нагревателя, то КПД машины станет равным...

**Ответ:** 75%

КПД обратимого цикла Карно равен

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} 100\%$$

, где  $T_1$  температура нагревателя,  $T_2$  температура холодильника.

По условию для начального состояния  $T_1 = 2T_2$ , а

$$T_1^* = T_1, T_2^* = \frac{T_2}{2}$$

для конечного состояния

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{2T_2} = \frac{1}{2}$$

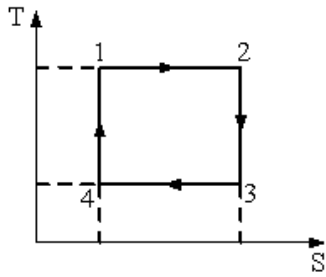
Тогда  $\eta = \frac{1}{2} 100\% = 50\%$  или

$$\eta = \frac{1}{2} 100\% = 50\%$$

После понижения температуры холодильника

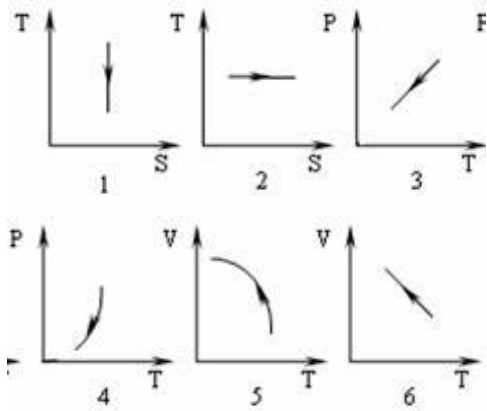
$$\eta^* = 1 - \frac{T_2^*}{T_1^*} = 1 - \frac{T_2}{2T_1} = 1 - \frac{T_2}{2 \cdot 2T_2} = \frac{3}{4}, \text{ или } 75\%.$$

На рисунке изображен цикл Карно в координатах (T, S), где S – энтропия. Адиабатное расширение происходит на этапе ... **Ответ: 2-3**



**Варианты ответа: 3 – 4, 1 – 2, 2 – 3, 4 – 1**

Адиабатному расширению газа ( $P$  – давление,  $V$  – объем,  $T$  – температура,  $S$  – энтропия) соответствует диаграмма ...



**Ответ: 1, 4**

- 1     6
- 3     2
- 5     4

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 ( $\lambda_{Cu} = 1,8 \cdot 10^5$  Дж/кг,  $\lambda_{Zn} = 1,2 \cdot 10^5$  Дж/кг). Температура плавления меди примерно в 2 раза выше температуры плавления цинка ( $T_{Cu} = 1356K$ ,  $T_{Zn} = 693K$ ). Разрушение кристаллической решетки металла при плавлении приводит к возрастанию энтропии. Если энтропия цинка увеличилась на  $\Delta S$ , то изменение энтропии меди составит ...

**Ответ:**  $\Delta S_{Cu} = \Delta S_{Zn} \cdot \frac{3}{4} = \frac{3}{4} \Delta S$

Адиабатные процессы происходят без теплообмена с окружающей средой, т.е. система не получает тепла и не отдает его,  $\delta Q = 0$ . Так как изменение

энтропии определяется как  $dS = \frac{\delta Q}{T}$ , следовательно, при адиабатном процессе энтропия остается постоянной. При адиабатном расширении газ совершает работу за счет уменьшения внутренней энергии:  $\delta A = -dU$ , температура газа уменьшается. Адиабатное расширение происходит на этапе 2 – 3.

Для адиабатного процесса  $\delta Q = 0$ , тогда изменение энтропии системы  $\Delta S = 0$  и  $S = const$ , т.к.  $\Delta S = \int \frac{\delta Q}{T}$ . Верным будет график 1. На графике 2 энтропия возрастает. Сравнивая графики 4 и 3, исключаем последний, т.к. он соответствует изохорному процессу. Для адиабатного процесса:

$\left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\gamma} = \frac{p_1}{p_2}$ , где коэффициент Пуассона  $\gamma = \frac{C_p}{C_v} > 1$ .

Обозначив  $\frac{\gamma}{\gamma-1} = n, n > 1$ , получим  $\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^n$ . Следовательно,  $P \sim T^n$ , график степенной функции изображен на рисунке 4. Для графиков 5 и 6 мож-

но применить формулу  $\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}}$ . Обозначив  $\frac{\gamma}{\gamma-1} = n, n > 1$ , получим  $\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^n$ , т.е.  $V \sim T^n$ .

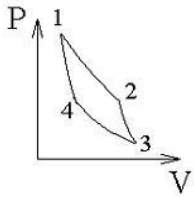
График обратной степенной функции похож на график гиперболы. Следовательно, график 5 не отвечает адиабатному процессу, так же как и график 6.

В термодинамике изменение энтропии определяется формулой  $\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$ , где  $\Delta Q$  – количество теплоты, полученное системой при температуре  $T$ . Пусть изменение энтропии при плавлении

цинка  $\Delta S_{Zn} = \frac{\Delta Q}{T} = \frac{m\lambda_{Zn}}{T_{Zn}} = \Delta S$ , тогда энтропия меди при ее плавлении возрастет на  $\Delta S_{Cu} = \frac{m\lambda_{Cu}}{T_{Cu}}$ . Найдем отношение

$\frac{\Delta S_{Cu}}{\Delta S_{Zn}} = \frac{\lambda_{Cu} T_{Zn}}{\lambda_{Zn} T_{Cu}} \approx \frac{1,5}{2} \cdot \frac{3}{4} = \frac{3}{4}$ . Следовательно,  $\Delta S_{Cu} = \Delta S_{Zn} \cdot \frac{3}{4} = \frac{3}{4} \Delta S$

Идеальная тепловая машина работает по циклу Карно (две изотермы 1-2, 3-4 и две адиабаты 2-3, 4-1). В процессе изотермического расширения 1-2 энтропия рабочего тела ... **Ответ: возрастает**



**Варианты ответа**

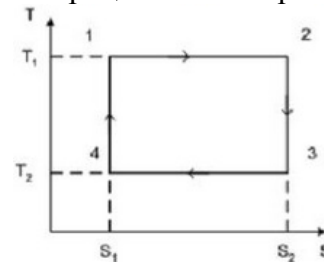
1. сначала возрастает, затем уменьшается
2. уменьшается
3. не изменяется
- 4. возрастает**

При изотермическом расширении 1-2  $\nu$  молей газа (рабочее тело) находятся в контакте с нагревателем температуры  $T$  и получают от него тепло  $dQ$ . Согласно 1 началу термодинамики  $dQ = dU + dA$ . С учетом изменения внутренней энергии

при изотермическом процессе  $dU = 0$  ( $dA$  - работа газа) и уравнения состояния идеального газа  $pV = \nu RT$ , изменение энтропии в процессе 1-2 равно:

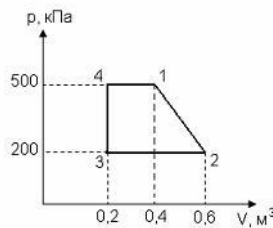
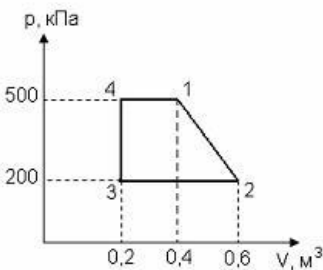
$$\Delta S = \int_1^2 \frac{dQ}{T} = \int_1^2 \frac{dU + dA}{T} = \int_1^2 \frac{dA}{T} = \int_1^2 \frac{pdV}{T} = \nu R \ln \frac{V_2}{V_1}$$

Так как объем  $V_2 > V_1$ , то  $\Delta S > 0$ , т.е. энтропия возрастает. Если цикл Карно изобразить в координатах  $(T, S)$ , то очевидно, что в процессе 1-2 энтропия возрастает.



10. Первое начало термодинамики. Работа при изопроцессах.

Диаграмма циклического процесса идеального одноатомного газа представлена на рисунке. Работа газа в килоджоулях в циклическом процессе равна ... **Ответ: 90 кДж**



Работу газа в циклическом процессе можно найти, определив площадь цикла в координатах  $p, V$ . Цикл имеет форму трапеции.

$$A_{1-2-3-4-1} = \frac{0,2 + 0,4}{2} \cdot 300 = 90 \text{ кДж}$$

Одноатомному идеальному газу в результате изобарического процесса подведено количество теплоты  $\Delta Q$ . На увеличение внутренней энергии газа

расходуется часть теплоты  $\frac{\Delta U}{\Delta Q}$ , равная (в процентах) ...

**Ответ 60%**

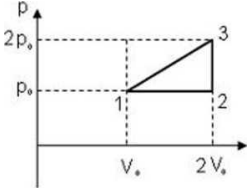
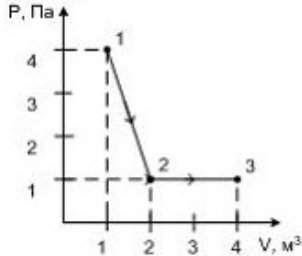
Используя первое начало термодинамики для изобарического процесса, можно определить

$\Delta Q = \Delta U + A_{1-2}$ , где  $\Delta Q$  - количество теплоты, сообщенное газу,  $\Delta U$  - увеличение

внутренней энергии газа,  $A_{1-2}$  - работа, совершенная газом. Для изобарного процесса

$$\Delta Q = \nu C_p \Delta T, \quad \Delta U = \nu C_V \Delta T$$

где  $\nu$  - число молей газа,  $\Delta T$  - изменение температуры газа,  $C_p, C_V$  - молярные теплоемкости при постоянном давлении, при постоянном объе-

	$\frac{\Delta U}{\Delta Q} = \frac{C_V}{C_P} = \frac{i}{i+2}$ <p>ме. <math>\frac{\Delta U}{\Delta Q} = \frac{C_V}{C_P} = \frac{i}{i+2}</math>, где <math>i</math> – сумма числа поступательных, числа вращательных и удвоенного числа колебательных степеней свободы молекулы.</p> <p>Для одноатомного газа <math>i = 3</math> (3 поступательные степени свободы), следовательно</p> $\frac{\Delta U}{\Delta Q} = \frac{3}{5} = 0,6 = 60\%$ <p>но,</p>
<p>Идеальный газ переводят из состояния 1 в состояние 3 двумя способами: по пути 1-3 и 1-2-3. Отношение работ <math>\frac{A_{1-3}}{A_{1-2-3}}</math> совершенных газом, равно ... Ответ: <b>1.5</b></p>  <p><b>Варианты ответа:</b> 1. 1,5 2. 4 3. 3 4. 2</p>	<p>Работу газа можно найти как площадь под графиком процесса. В процессе 1-3 работа газа равна: С учетом того, что в изохорном процессе 2-3 газ работу не совершает <math>A_{2-3} = 0</math>, имеем:</p> <p>Отношение работ равно:</p> $\frac{A_{1-3}}{A_{1-2-3}} = \frac{\frac{3}{2} p_0 V_0}{p_0 V_0} = \frac{3}{2} = 1,5$
<p>Внутренняя энергия молекулярного азота (газ считать идеальным) в результате процесса 1-2-3, изображенного на рисунке, изменяется на ___ Дж. Ответ: <math>\Delta U_{1-3} = 0</math></p>  <p><b>Варианты ответа:</b> 1. 0 2. 4 3. 9/2 4. 6</p>	<p>Изменение внутренней энергии как функции состояния не зависит от вида процесса, а определяется значением параметров газа в начальном и конечном состоянии. Следовательно,</p> $\Delta U_{1-2-3} = \Delta U_{1-3} = \frac{i}{2} m R (T_3 - T_1)$ <p>Из диаграммы процесса видно, что <math>p_1 V_1 = p_3 V_3</math> значит, <math>T_3 = T_1</math> (точки 1 и 3 лежат на одной изотерме). Изменение внутренней энергии равно <math>\Delta U_{1-3} = 0</math>.</p>
<p>Изменение внутренней энергии газа при изохорном процессе возможно ...</p> <p><b>Ответ:</b> лишь при передаче газу теплоты извне (либо при передаче газом теплоты внешним телам).</p>	<p>Согласно первому началу термодинамики изменение внутренней энергии системы определяется формулой <math>\Delta U = Q + A'</math>, где <math>Q</math> – количество теплоты, переданное системе внешней средой и не связанное с изменением объема; <math>A'</math> – работа совершенная внешними телами над системой и связанная с изменением объема.</p> <p>Так как при изохорном процессе объем <math>V = \text{const}</math>, то работа <math>A' = 0</math>. Тогда первое начало термодинамики приобретает вид: <math>\Delta U = Q</math> т.е. изменение внутренней энергии возможно лишь при передаче газу теплоты извне (либо при передаче газом теплоты внешним телам).</p>

При увеличении давления в 3 раза и уменьшении объема в 2 раза внутренняя энергия идеального газа ...

**Варианты ответа:**

1. уменьшится в 1,5 раза
2. увеличится в 6 раз
3. уменьшится в 6 раз
4. **увеличится в 1,5 раза**

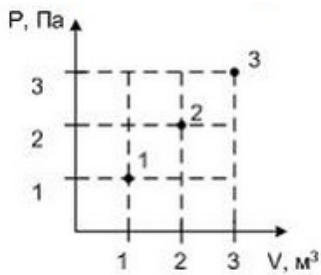
Внутренняя энергия идеального газа равна  $U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} RT = \frac{i}{2} pV$  (учитываем, что  $pV = \frac{m}{M} RT$ ), где  $p$  – давление,  $V$  – объем,  $i$  – полное число степеней свободы,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $T$  – абсолютная температура,  $m$  – масса газа,  $M$  – молярная масса газа.

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= \frac{i}{2} p_1 V_1 \\ U_2 &= \frac{i}{2} p_2 V_2 \end{aligned} \right\}$$

Учитывая, что,  $p_2 = 3p_1$ ,  $V_2 = \frac{V_1}{2}$  получаем  $\frac{U_2}{U_1} = \frac{p_2 V_2}{p_1 V_1} = \frac{3p_1 V_1}{2p_1 V_1} = \frac{3}{2} = 1,5$ . Следовательно,  $U_2 = 1,5U_1$

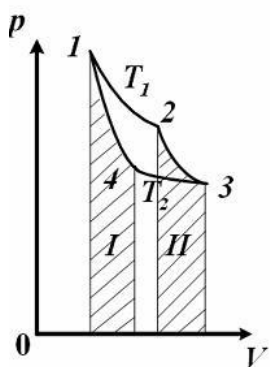
Идеальный газ имеет минимальную внутреннюю энергию в состоянии ...

**Ответ:** в состоянии 1.



Внутренняя энергия идеального газа равна  $U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} RT = \frac{i}{2} pV$  (учитываем, что  $pV = \frac{m}{M} RT$ ), где  $p$  – давление,  $V$  – объем,  $i$  – полное число степеней свободы,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $T$  – абсолютная температура,  $m$  – масса газа,  $M$  – молярная масса газа. В нашем случае минимальное значение произведения  $pV = 1 \text{ Па} \cdot 1 \text{ м}^3$  соответствует состоянию газа, обозначенному на  $p$ - $V$  диаграмме точкой 1. Следовательно, идеальный газ имеет минимальную внутреннюю энергию в состоянии 1.

На диаграмме ( $p, V$ ) изображен цикл Карно для идеального газа.



Для величины работы адиабатического расширения газа  $A_{2-3}$  и адиабатического сжатия  $A_{4-1}$  справедливо соотношение ...

Цикл Карно состоит из двух изотерм (изотермического расширения  $1-2$  при температуре  $T_1$  и изотермического сжатия  $3-4$  при температуре  $T_2 < T_1$ ) и двух адиабат (адиабатического расширения  $2-3$  и адиабатического сжатия  $4-1$ ). При адиабатическом расширении  $2-3$  и адиабатическом сжатии  $4-1$  теплообмен с окружающей средой отсутствует, и поэтому работы расширения  $A_{2-3}$  и сжатия  $A_{4-1}$  совершаются за счет изменения внутренней энергии  $A_{2-3} = -\Delta U_{2-3}$  и  $A_{4-1} = -\Delta U_{4-1}$ . Следовательно, работы газа в адиабатических



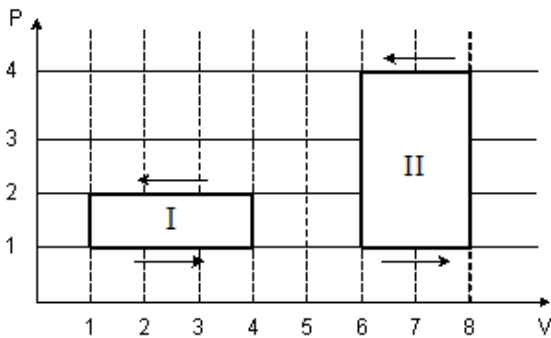
Ответ:  $A_{2-3} = |A_{4-1}|$

Варианты ответа:

1.  $A_{2-3} < |A_{4-1}|$
2. работы невозможно сравнить
3.  $A_{2-3} > |A_{4-1}|$
4.  $A_{2-3} = |A_{4-1}|$

сах 2-3 и 4-1 равны по величине:  $A_{2-3} = |A_{4-1}|$ , а на  $(p, V)$ -диаграмме графически определяются площадями  $S_{II}$  и  $S_I$  заштрихованных фигур под графиками соответствующих процессов, и эти площади равны  $S_{II} = S_I$ .

На  $(p - V)$ - диаграмме изображены два циклических процесса.



Отношение работ  $A_I/A_{II}$ , совершенных в этих циклах, равно ...

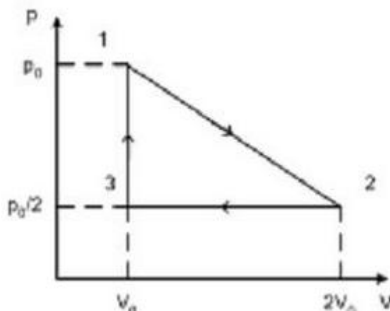
Ответ: 1/2

Работа газа за цикл численно равна площади фигуры, ограниченной диаграммой кругового процесса в координатных осях  $p, V$ . При осуществлении кругового процесса в прямом направлении (по часовой стрелке) работа газа за цикл положительна, так как при расширении газ совершает большую работу, чем затрачивается на его сжатие. Если круговой процесс осуществляется в обратном направлении (против часовой стрелки), то работа газа за цикл отрицательна. Работы газа за I первый

и II второй циклы на  $(p, V)$ -диаграмме, совершаемые против часовой стрелки, численно равны площадям прямоугольников  $A_I = -(p_2 - p_1)(V_4 - V_1) = -3pV$  и  $A_{II} = -(p_4 - p_1)(V_8 - V_6) = -6pV$ . Отношение работ, совершенных в этих циклах:  $\frac{A_I}{A_{II}} = \frac{-3pV}{-6pV} = \frac{1}{2}$ .

На рисунке изображен циклический процесс, происходящий с одним молем двухатомного идеального газа. Газ совершает работу только за счет полученного извне тепла на участке...

Ответ: 1-2

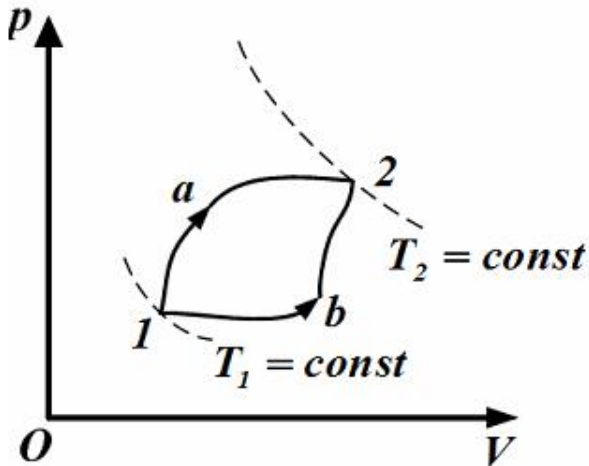


Варианты ответа:

1. 1-2
2. 3-1
3. 2-3
4. 1-2, 2-3

Из графика видно, что газ получает тепло в процессах 1-2 и 3-1. Переход 3-1 осуществляется при постоянном объеме, следовательно, работа газа  $A_{3-1}=0$ . Из графика видно, что точки 1 и 2 лежат на одной изотерме, т.к.  $p_1V_1 = p_2V_2 = p_0V_0$ ; следовательно,  $T_1 = T_2$  и изменение внутренней энергии  $\Delta U_{1-2} = 0$ . По 1 началу термодинамики для процесса 1-2 количество теплоты равно:  $Q_{1-2} = \Delta U_{1-2} + A_{1-2} = A_{1-2}$ , т.е. газ совершает работу только за счет полученного извне тепла. Процесс 2-3 является изобарным сжатием, газ передает тепло внешней среде.

Идеальный газ переводится из первого состояния во второе двумя способами (1a2 и 1b2), как показано на рисунке. Теплота, полученная газом, изменение внутренней энергии и работа газа при переходе его из одного состояния в другое связаны соотношениями ...



- $Q_{1a2} = Q_{1b2}$ ;  $\Delta U_{1a2} = \Delta U_{1b2}$ ;  $A_{1a2} > A_{1b2}$
- $Q_{1a2} > Q_{1b2}$ ;  $\Delta U_{1a2} > \Delta U_{1b2}$ ;  $A_{1a2} > A_{1b2}$
- $Q_{1a2} > Q_{1b2}$ ;  $\Delta U_{1a2} = \Delta U_{1b2}$ ;  $A_{1a2} > A_{1b2}$
- $Q_{1a2} = Q_{1b2}$ ;  $\Delta U_{1a2} = \Delta U_{1b2}$ ;  $A_{1a2} = A_{1b2}$

Ответ:

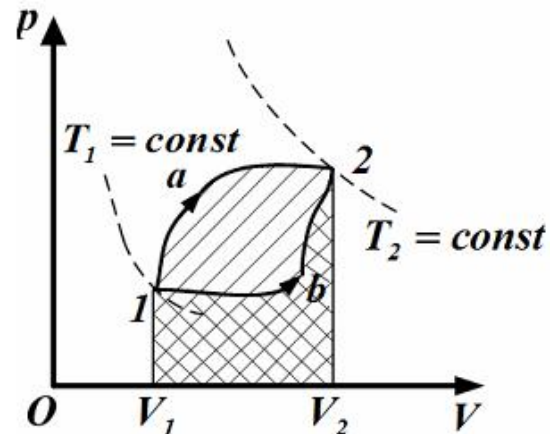
$$Q_{1a2} > Q_{1b2}; \Delta U_{1a2} = \Delta U_{1b2}; A_{1a2} > A_{1b2}$$

При любом способе перехода идеального газа из первого состояния во второе, согласно первому началу термодинамики, теплота, сообщаемая газу, расходуется на изменение его внутренней энергии и на совершение им работы против внешних сил:

$Q_{12} = \Delta U_{12} + A_{12}$ . При этом изменение внутренней энергии, как однозначной функции термодинамического состояния системы,  $\Delta U_{12} = U_2 - U_1$  не зависит от способа перехода и определяется только разностью значений внутренней энергии этих состояний:

$$\Delta U_{1a2} = \Delta U_{1b2}. \text{ Работа } A_{12} = \int_{V_1}^{V_2} p dV,$$

совершаемая газом при изменении его объема от  $V_1$  до  $V_2$ , зависит от процесса перехода. Величина этой работы равна площади фигуры под графиком процесса в координатных осях  $p, V$  (см. рис.).



$A_{1a2} > A_{1b2}$ , так как площади заштрихованных фигур  $S_{V_1 a 2 V_2} > S_{V_1 b 2 V_2}$ . Следовательно, по первому закону термодинамики:

$$Q_{1a2} = \Delta U_{1a2} + A_{1a2} > Q_{1b2} = \Delta U_{1b2} + A_{1b2}.$$

Теплота, полученная газом, изменение внутренней энергии и работа газа при переходе его из одного состояния в другое связаны соотношениями:

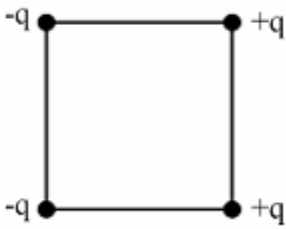
$$Q_{1a2} > Q_{1b2}; \Delta U_{1a2} = \Delta U_{1b2}; A_{1a2} > A_{1b2}.$$



### 3. Электричество и магнетизм.

#### 11. Электрическое поле в вакууме.

Каждый из четырех одинаковых по модулю точечных зарядов (см. рис.), расположенных в вершинах квадрата, создает в точке пересечения диагоналей электрическое поле, напряженность которого равна  $\vec{E}$ .



Градиент потенциала поля в этой точке равен \_\_\_\_\_ и направлен горизонтально...

**Ответ:**  $2\sqrt{2}E$ , вправо

**Варианты ответа:**

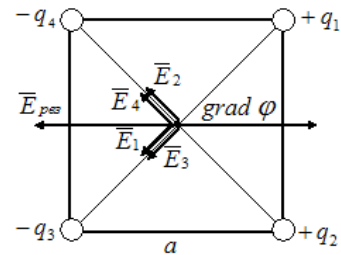
1.  $4E$ , вправо
2.  $2\sqrt{2}E$ , вправо
3.  $4E$ , влево
4.  $2\sqrt{2}E$ , влево

Градиент потенциала в некоторой точке связан с напряженностью поля в этой точке соотношением:  $\vec{E} = -\text{grad}\varphi$ . Поэтому для нахождения

$\text{grad}\varphi$  в точке пересечения диагоналей квадрата необходимо найти напряженность поля в этой точке. Согласно принципу суперпозиции полей, напряженность в точке пересечения диагоналей квадрата равна:  $\vec{E}_{\text{рез}} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \vec{E}_4$ ,

где  $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3, \vec{E}_4$  – напряженности полей, создаваемых \_\_\_\_\_ точечными

зарядами  $+q_1, +q_2, -q_3, -q_4$  в рассматриваемой точке соответственно. На рисунке показаны направления этих векторов.



Величина напряженности поля точечного заряда определяется по формуле  $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q|}{r^2}$ ,

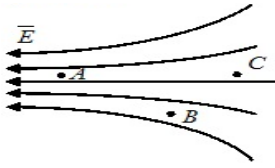
где  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная, а  $r$  – расстояние от заряда до точки. Поскольку все заряды одинаковы по величине и рассматриваемая точка одинаково удалена от каждого заряда, модули векторов  $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3, \vec{E}_4$  равны,

т.е.  $E_1 = E_2 = E_3 = E_4 = E$ , а  $\vec{E}_{\text{рез}}$  образует диагональ квадрата со стороной  $2E$ . Модуль напряженности результирующего поля в центре

квадрата  $E_{\text{рез}} = 2\sqrt{2}E$ . Учитывая связь напряженности поля и потенциала, градиент потенциала

в центре квадрата равен  $2\sqrt{2}E$  и направлен вправо.

На рисунке изображены силовые линии электростатического поля. Укажите верное соотношение для потенциала  $\varphi$  поля в точках А, В и С. **Ответ:**  $\varphi_C > \varphi_B > \varphi_A$



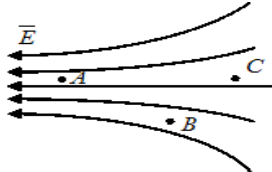
**Варианты ответа:**

1.  $\varphi_C > \varphi_B > \varphi_A$
2.  $\varphi_A > \varphi_B > \varphi_C$
3.  $\varphi_A = \varphi_C > \varphi_B$
4.  $\varphi_A = \varphi_C < \varphi_B$

Через точки А, В и С следует провести эквипотенциальные линии, которые всюду перпендикулярны силовым линиям. Учитывая, что силовые линии направлены в сторону убывания потенциала, можно сделать вывод о том, что  $\varphi_C > \varphi_B > \varphi_A$

На рисунке изображены силовые линии электростатического поля. Укажите верное соотношение для величины напряженности  $E$  поля в точках А, В и С.

**Ответ:**  $E_A > E_B > E_C$



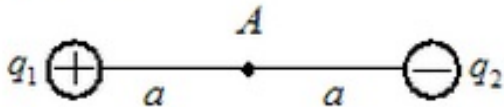
**Варианты ответа:**

1.  $E_A = E_C > E_B$
2.  $E_A < E_B < E_C$
3.  $E_A = E_C < E_B$
4.  $E_A > E_B > E_C$

По густоте линий напряженности можно судить о величине напряженности поля: там, где линии гуще, величина напряженности поля больше. Поэтому  $E_A > E_B > E_C$ .

Электрическое поле создано двумя точечными зарядами:  $q_1 = +q$ ,  $q_2 = -q$ . Напряженность и потенциал в точке А равны...

**Ответ:**  $E = 2k \frac{q}{a^2}$ ,  $\varphi = 0$



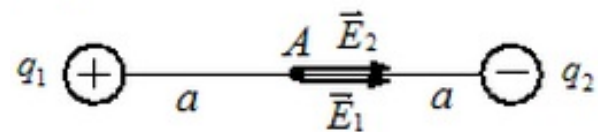
**Варианты ответа:**

1.  $E = 0$   $\varphi = 2k \frac{q}{a}$
2.  $E = 0$   $\varphi = 0$
3.  $E = 2k \frac{q}{a^2}$   $\varphi = 2k \frac{q}{a}$
4.  $E = 2k \frac{q}{a^2}$   $\varphi = 0$

Согласно принципу суперпозиции  $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$ ,  $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$  (алгебраическая сумма). Векторы  $\vec{E}_1$  и  $\vec{E}_2$  показаны на рисунке. Учитывая, что  $\vec{E}_1$  и  $\vec{E}_2$  направлены в одну сторону,

$$E = E_1 + E_2 = 2k \frac{|q|}{a^2}$$

$$\varphi = k \frac{q_1}{a} + k \frac{q_2}{a} = k \frac{q}{a} + k \frac{(-q)}{a} = 0$$



Установите соответствие между источником электростатического поля и формулой, позволяющей вычислить напряженность поля в некоторой точке.

1. Точечный заряд
2. Равномерно заряженная длинная нить
3. Равномерно заряженная бесконечная плоскость

**Варианты ответа:**

1.  $E = k \frac{q}{r^2}$
2.  $E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0\epsilon r}$
3.  $E = \frac{\rho r}{3\epsilon_0}$
4.  $E = \frac{\sigma}{2\epsilon\epsilon_0}$

- Напряженность поля точечного заряда в некоторой точке обратно пропорциональна квадрату расстояния до заряда;

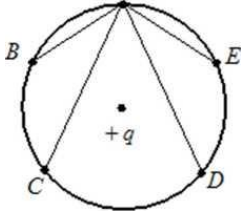
- Напряженность поля равномерно заряженной длинной нити обратно пропорциональна расстоянию до нити;

- Напряженность поля равномерно заряженной бесконечной плоскости не зависит от расстояния до плоскости.

В электрическом поле точечного заряда  $q$  (см.

Работа сил поля по перемещению заряда  $q_0$  в

рисунк) из точки А в точки В, С, D и Е перемещают заряд  $q_0$ . Для работы по перемещению заряда  $q_0$  ( $q_0 < 0$ ) в поле заряда  $q$  справедливо соотношение... Ответ:  $A_{AB} = A_{AC} = A_{AD} = A_{AE} = 0$



**Варианты ответа:**

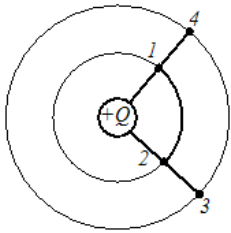
- 1)  $A_{AB} = A_{AE} < A_{AC} = A_{AD}$
- 2)  $A_{AB} = A_{AC} = A_{AD} = A_{AE} > 0$
- 3)  $A_{AB} = A_{AC} = A_{AD} = A_{AE} = 0$
- 4)  $A_{AB} = A_{AC} = A_{AD} = A_{AE} < 0$

поле заряда  $q$  вычисляется по формуле  $A = q_0(\varphi_1 - \varphi_2)$ , где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  - потенциалы начальной и конечной точек поля. Учитывая, что потенциал поля точечного заряда  $q$  вычисляется по формуле  $\varphi = k \frac{q}{r}$  и все точки лежат на окружности, т.е.  $r = R$ , получим, что  $\varphi_1 = \varphi_2$ . Тогда  $A_{AB} = A_{AC} = A_{AD} = A_{AE} = 0$

Установите соответствие между величиной (знаком) работы сил электростатического поля, создаваемого зарядом  $+Q$ , по перемещению отрицательного заряда  $-q$  и траекторией перемещения (указаны начальная и конечная точки).

**Ответ:**  $A = 0$  для траектории 1 – 2.

$A < 0$  для траектории 2 – 3

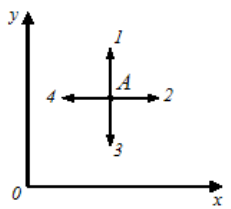


1.  $A=0$  2.  $A<0$

Работа сил электростатического поля по перемещению заряда  $q$  из точки 1 в точку 2 определяется по формуле:  $A_{12} = q(\varphi_1 - \varphi_2)$ . Отсюда следует, что  $A_{12} = 0$ , если  $\varphi_1 = \varphi_2$ . Точки, имеющие одинаковый потенциал, лежат на одинаковом расстоянии от заряда, создающего поле  $\left(\varphi = k \frac{Q}{r}\right)$ , поэтому  $A = 0$  для траектории 1 – 2.  $A < 0$  для траектории 2 – 3, поскольку  $\varphi_2 > \varphi_3$ , а  $q < 0$ .

В некоторой области пространства создано электростатическое поле, потенциал которого описывается функцией  $\varphi = 5 + 2y^2$ . Вектор напряженности электрического поля в точке А будет иметь направление, показанное стрелкой

**Ответ:** 3



1-1 2-2 3-3 4-4

Связь напряженности и потенциала электростатического поля имеет вид:  $\vec{E} = -grad\varphi$ , или в проекциях на оси прямоугольной декартовой системы координат:

$$E_x = -\frac{\partial\varphi}{\partial x}, \quad E_y = -\frac{\partial\varphi}{\partial y}, \quad E_z = -\frac{\partial\varphi}{\partial z}$$

Так как по условию потенциал  $\varphi$  зависит только от  $y$ , отлична от нуля только  $E_y$  и  $E_y = -\frac{\partial\varphi}{\partial y} = -4y$ . Таким образом, вектор напряженности электрического поля в точке А будет иметь направление, показанное стрелкой 3

Работа сил электрического поля при перемещении заряда  $-2$  мкКл из точки поля с потенциалом 20 В в точку с потенциалом 40 В равна... **Ответ:**  $40 \cdot 10^{-6}$  Дж

**Варианты ответа**

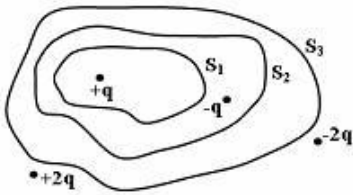
1.  $-40 \cdot 10^{-6}$  Дж
2.  $40 \cdot 10^{-6}$  Дж
3.  $-40$  Дж
4.  $40$  Дж

Работа сил поля по перемещению заряда  $q$  в электрическом поле вычисляется по формуле  $A = q(\varphi_1 - \varphi_2)$ , где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  - потенциалы начальной и конечной точек поля.  $A = q(\varphi_1 - \varphi_2) = (-2 \cdot 10^{-6})(20 - 40) = 40 \cdot 10^{-6}$  Дж

Дана система точечных зарядов в вакууме и

Согласно теореме Остроградского – Гаусса, поток

замкнутые поверхности  $S_1, S_2$  и  $S_3$ , причем поверхность  $S_3$  охватывает поверхность  $S_2$ , которая в свою очередь охватывает поверхность  $S_1$  (рис.).



Поток напряженности электростатического поля отличен от нуля сквозь ...

**Ответ:** Поверхность  $S_1$

**Варианты ответа:**

1. Поверхность  $S_1$     2) Поверхность  $S_3$   
3) поверхность  $S_2$     4) Поверхность  $S_4$

напряженности электростатического поля в вакууме сквозь произвольную замкнутую поверхность равен отношению алгебраической суммы электрических зарядов, охватываемых этой поверхностью, и электрической постоянной  $\epsilon_0$ ,

$$\Phi_E = \oint_{(S)} \vec{E} d\vec{S} = \frac{\sum q_i}{\epsilon_0}$$

т.е. Из условия видим,

$$\sum q_i \neq 0$$

что только для поверхности  $S_1$ , поэтому поток напряженности электростатического поля отличен от нуля сквозь поверхность  $S_1$ .

## 12. Законы постоянного тока.

Круглосуточно горящая в течение года лампочка мощностью 40Вт в подъезде вашего дома при тарифе 2 руб. за 1 кВт·ч обходится в \_\_\_\_\_ рубля. Ответ округлите до целых.

**Ответ:** 701р

Работа электрического тока связана с потребляемой мощностью и временем соотношением:  $A = P \cdot t = 40 \cdot 365 \cdot 24 = 350,4 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ . Учитывая тариф, получаем ответ: 700,8 руб.  $\approx$  701 руб.

Четыре сопротивления величиной каждое соединили сначала последовательно, а затем параллельно. При этом общее сопротивление...

**Ответ:** уменьшится в 16 раз

**Варианты ответа:**

- 1.увеличится в 4 раза    2.уменьшится в 4 раза  
3.уменьшится в 16 раз    4.увеличится в 16 раз

Сопротивления при последовательном и параллельном соединении одинаковых проводников равны соответственно

$$R_{\text{общ1}} = 4R, \quad R_{\text{общ2}} = \frac{R}{4}, \quad \frac{R_{\text{общ2}}}{R_{\text{общ1}}} = \frac{1}{16}$$

Таким образом, общее сопротивление уменьшится в 16 раз.

Если увеличить длину проводника и площадь его поперечного сечения вдвое, не изменяя приложенного напряжения, то плотность тока в проводнике...

**Ответ:** уменьшится в 2 раза

**Варианты ответа:**

1. уменьшится в 4 раза  
2. увеличится в 4 раза  
3. уменьшится в 2 раза  
4. увеличится в 2 раза

Плотность тока находится как отношение силы тока к площади поперечного сечения

$$j = \frac{I}{S}$$

проводника: Согласно закону Ома для участка цепи

$$I = \frac{U}{R}, \quad R = \rho \frac{l}{S}$$

получаем:

$$j = \frac{I}{S} = \frac{U}{RS} = \frac{US}{\rho l S} = \frac{U}{l\rho}$$

Здесь  $U$  разность потенциалов,  $R$  сопротивление,  $l$  длина проводника,  $\rho$  - удельное сопротивление материала. Следовательно, плотность тока обратно пропорциональна длине проводника.

Удельное сопротивление проводника из стали  $\rho = 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ , концентрация электронов проводимости  $n = 5 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ . Скорость упорядоченного движения (дрейфа) электронов в стальном проводнике в мм/с при напряженности поля 0,96В/м равна ...

**Ответ:** 1мм/с

Скорость упорядоченного движения носителей тока связана с плотностью тока соотношением:

$$j = |q|nv$$

Используя закон Ома в дифференциальной форме,

$$j = \gamma E = \frac{1}{\rho} E, \quad \frac{1}{\rho} E = |q|nv$$

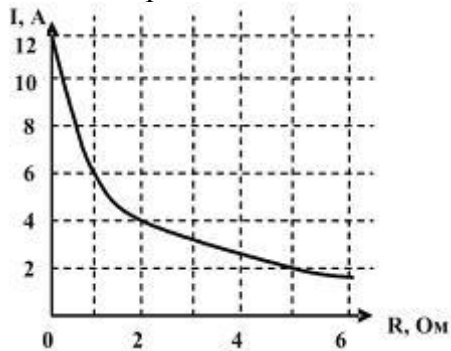
получаем:

$$v = \frac{E}{|q|n\rho} = \frac{0,96}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 5 \cdot 10^{28} \cdot 1,2 \cdot 10^{-7}} = 0,1 \cdot 10^{-2} \text{ м/с} = 1 \text{ мм/с}$$

К источнику тока с внутренним сопротивлени-

Согласно закону Ома для замкнутой цепи, сила то-

ем 1,0 Ом подключили реостат. На рисунке показан график зависимости силы тока в реостате от его сопротивления.

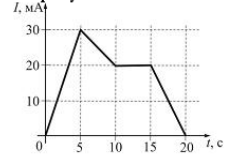


Максимальная мощность, которая выделяется в реостате, равна ... Ответ:  $P_{\max} = I^2 R = 36 \text{ Вт}$

**Варианты ответа:**

1. 32Вт 2. 27Вт 3. 20Вт 4. 36Вт

На рисунке показана зависимость силы тока в электрической цепи от времени.



Заряд, прошедший по проводнику в интервале времени от 0 до 10 с, равен ...

**Ответ:** 200 мКл

300 мКл  200 мКл

150 мКл  400 мКл

Лампочки 25 Вт и 100 Вт, рассчитанные на одно и то же напряжение, соединены последовательно и включены в сеть. При этом отношение количества теплоты, выделившейся на первой и второй лампочках за одно и то же время, равно...

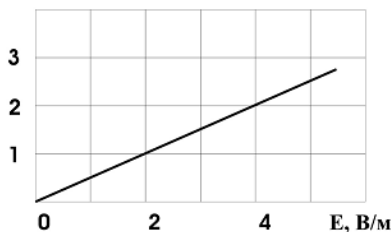
**Ответ:** 4

**Варианты ответа:** 1. 1 2. 16 3.  $\frac{1}{4}$  4. 4

На графике представлена зависимость плотности тока в проводнике от напряженности электрического поля. Удельное сопротивление проводника в единицах  $\text{Ом} \cdot \text{м}$  равно...

**Ответ:**  $2 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$

$j \cdot 10^8, \text{ А/м}^2$



**Варианты ответа:**

1.  $2 \cdot 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  2.  $0,5 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$

3.  $2 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$  4.  $0,5 \cdot 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$

ка, который протекает по проводнику, рассчитывается по формуле  $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$ , где  $\mathcal{E}$  – ЭДС источника

тока,  $R$  – сопротивление проводника (в данном случае реостата),  $r$  – внутреннее сопротивление источника тока. Мощность, выделяемая в реостате,

равна:  $P = I^2 R = \frac{\mathcal{E}^2 R}{(R+r)^2}$ . Можно доказать, исследовав функцию  $P(R)$  на экстремум, что максимальная мощность выделяется, если  $R = r$ , следовательно,  $R = 1 \text{ Ом}$ , соответствующее значение

силы тока найдем из графика  $I = 6 \text{ А}$ . Тогда  $P_{\max} = I^2 R = 36 \text{ Вт}$ .

По определению сила тока в цепи равна  $I = \frac{dq}{dt}$ , следовательно,  $dq = I dt$ , где

$dq$  – заряд, прошедший по проводнику за бесконечно малый промежуток времени  $dt$ . Заряд, прошедший в заданном интервале времени, можно

определить по формуле  $q = \int_{t_1}^{t_2} I dt$ . Геометрический смысл определенного

интеграла – площадь под графиком функции. На рисунке представлен график зависимости силы тока от времени. Вычислив площадь под графиком функции, в указанном интервале можно найти заряд, прошедший по проводнику:  $q = 200 \text{ мА} \cdot \text{с}$ , следовательно,  $q = 200 \text{ мКл}$ .

Поскольку лампочки соединены последовательно, для расчета количества теплоты следует воспользоваться формулой  $Q = I^2 R t$ , так как в этом случае ток через лампочки одинаков. Сопротивление каждой лампочки можно найти, зная мощность:

$P = \frac{U^2}{R}$ ,  $R = \frac{U^2}{P}$ . Тогда  $\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{P_2}{P_1} = 4$

Согласно закону Ома в дифференциальной форме,

плотность тока в проводнике равна  $j = \frac{1}{\rho} E$ ,

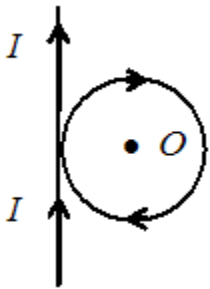
где  $\rho$  – удельное сопротивление материала,  $E$  – напряженность электрического поля в проводнике. Взяв любое значение напряженности поля и соответствующее ему значение плотности тока из графика, можно определить удельное сопротивление

материала:  $\rho = \frac{E}{j} = \frac{2}{10^8} = 2 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$



Бесконечно длинный прямолинейный проводник образует плоскую петлю в виде окружности (см. рис.). Магнитная индукция поля в т.  $O$  направлена ...

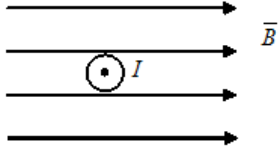
**Ответ:** от нас



**Варианты ответа:**

1. влево 2. к нам 3. вправо 4. от нас

Прямолинейный проводник с током помещен в однородное магнитное поле перпендикулярно силовым линиям (рис.). **Ответ:** вверх



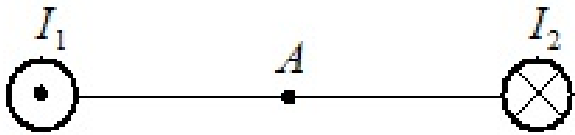
Ток течет «на нас». Сила Ампера, действующая на проводник, направлена...

**Ответ:** вверх

**Варианты ответа:**

1. вправо 2. влево 3. вверх 4. вниз

Магнитное поле создано двумя параллельными длинными проводниками с токами  $I_1$  и  $I_2$ , расположенными перпендикулярно плоскости чертежа (рис). Векторы  $B_1$  и  $B_2$  в точке  $A$  направлены следующим образом:



**Ответ:**  $\vec{B}_1$  - вверх;  $\vec{B}_2$  - вверх.

**Варианты ответа:**

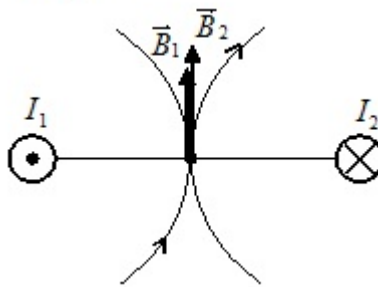
1.  $\vec{B}_1$  - вверх;  $\vec{B}_2$  - вверх 2.  $\vec{B}_1$  - вниз;  $\vec{B}_2$  - вверх  
3.  $\vec{B}_1$  - вверх;  $\vec{B}_2$  - вниз 4.  $\vec{B}_1$  - вниз;  $\vec{B}_2$  - вниз

Индукция  $\vec{B}$  результирующего магнитного поля в т.  $O$  определяется по принципу суперпозиции  $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$ , где  $\vec{B}_1$  и  $\vec{B}_2$  - магнитная индукция поля длинного прямолинейного и кругового тока в рассматриваемой точке соответственно.

Направления векторов  $\vec{B}_1$  и  $\vec{B}_2$  можно определить по правилу правого винта. Поскольку оба вектора направлены перпендикулярно плоскости чертежа «от нас», то и вектор  $\vec{B}$  результирующего магнитного поля в т.  $O$  также направлен перпендикулярно плоскости чертежа «от нас».

Направление силы Ампера можно найти по правилу левой руки. Таким образом, сила Ампера направлена вверх.

Для нахождения направления вектора магнитной индукции в некоторой точке можно воспользоваться правилом правого винта (правилом буравчика):  $\vec{B}_1$  - вверх;  $\vec{B}_2$  - вверх.



Протон и  $\alpha$ -частица влетают в однородное магнитное поле перпендикулярно силовым линиям, причем скорость протона в 2 раза больше скорости  $\alpha$ -частицы. Отношение модулей сил, действующих на частицы  $\frac{F_p}{F_\alpha}$  со стороны магнитного поля, равно...

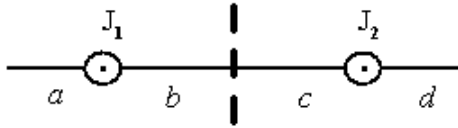
$$\frac{F_p}{F_\alpha} = 1$$

**Ответ:**  $\frac{F_p}{F_\alpha} = 1$

**Варианты ответа:** 1. 2 2. 1 3. 4 4. 1/2

Величина силы Лоренца при условии, что  $\vec{v} \perp \vec{B}$ , определяется выражением:  $F = q\mathcal{B}v$  Учитывая, что  $q_\alpha = 2q_p$ , а  $v_p = 2v_\alpha$ , приходим к выводу, что  $\frac{F_p}{F_\alpha} = 1$

На рисунке изображены сечения двух прямолинейных длинных параллельных проводников с одинаково направленными токами, причем  $J_1 > J_2$ . Индукция  $\vec{B}$  результирующего магнитного поля равна нулю в некоторой точке интервала ...



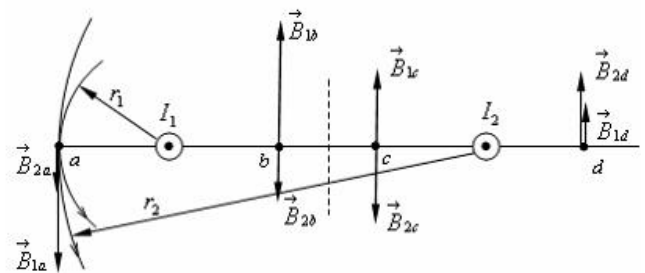
Ответ: интервала с.

Линии магнитной индукции прямолинейных длинных проводников с токами  $J_1$  и  $J_2$

представляют собой концентрические окружности, плоскости которых перпендикулярны проводникам, а центры лежат на их осях. Направления этих линий определяют правилом правого винта: направление вращения винта дает направление силовой линии магнитной индукции, если поступательное движение винта соответствует направлению тока в проводнике. Направления векторов магнитной индукции  $\vec{B}_1$  и  $\vec{B}_2$  в некоторых точках

интервалов  $a, b, c, d$  совпадают с

касательными к линиям магнитной индукции в этих точках поля и показаны на рисунке.



Индукция  $\vec{B}$  результирующего магнитного поля

определяется по принципу суперпозиции  $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$  и равна нулю, если векторы  $\vec{B}_1$  и  $\vec{B}_2$

противоположно направлены и равны по

модулю. Это может быть только в точках интервалов  $b$  и  $c$ . Поскольку магнитная

индукция прямолинейного длинного проводника

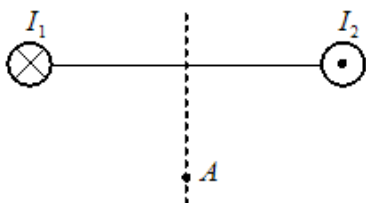
с током вычисляется по формуле  $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$ , то

модули векторов  $\vec{B}_1$  и  $\vec{B}_2$  равны, если  $r_1 > r_2$ , т.к.

по условию  $I_1 > I_2$ . Следовательно, индукция  $\vec{B}$

результирующего магнитного поля равна нулю в некоторой точке интервала  $c$ .

Магнитное поле создано двумя параллельными длинными проводниками с токами  $I_1$  и  $I_2$ , расположенными перпендикулярно плоскости чертежа, причем (рис.). Ответ: вниз



Вектор магнитной индукции результирующего поля в точке А, находящейся на одинаковом расстоянии от проводников, направлен...

Ответ: вниз

Варианты ответа:

1. вправо 2. вниз 3. влево 4. вверх

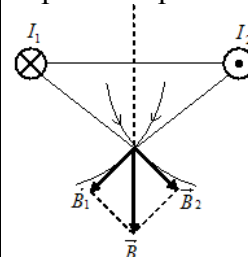
Согласно принципу суперпозиции полей

$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$ . Для нахождения направлений векторов  $\vec{B}_1$  и  $\vec{B}_2$  можно воспользоваться правилом

правого винта (правилом буравчика). Направление

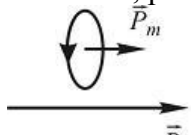
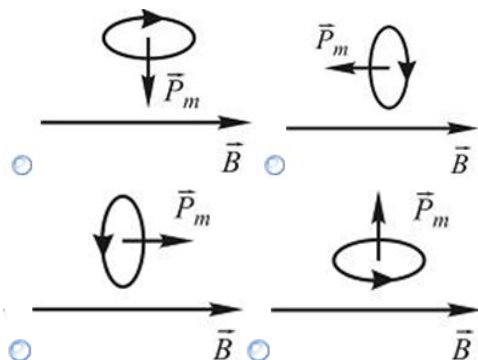
вектора  $\vec{B}$  результирующего поля находится по правилу сложения векторов. Таким образом, вектор

$\vec{B}$  направлен вниз.



 <p>Укажите верные утверждения Укажите не менее двух вариантов ответа</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Вектор силы Лоренца, действующей на электрон, направлен для указанного на рисунке положения электрона вправо.</li> <li>2. Вектор магнитной индукции <math>\vec{B}</math> направлен перпендикулярно плоскости рисунка «от нас».</li> <li>3. Кинетическая энергия электрона остается постоянной.</li> <li>4. Электрон движется с постоянным нормальным ускорением.</li> <li>5. Траектория движения электрона – окружность.</li> </ol>	<p>Магнитное поле прямолинейного длинного проводника с током не является однородным <math>\left( B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \right)</math> и перпендикулярно плоскости, проходящей через проводник и электрон (плоскости рисунка). Соответственно вектор силы Лоренца лежит в этой плоскости и в любой момент времени перпендикулярен вектору скорости. Поэтому величина скорости электрона остается постоянной,</p> $a_n = \frac{v^2}{R}$ <p>а величина нормального ускорения <math>a_n = \frac{v^2}{R}</math> изменяется, т.к. изменяется радиус кривизны траектории из-за неоднородности магнитного поля <math>\left( R = \frac{mv}{qB} \right)</math>.</p>
<p>В магнитное поле влетает электрон и движется по дуге окружности. Протон, влетевший в это поле с такой же скоростью, будет двигаться по траектории...</p> <p><b>Ответ:</b> по траектории 2.</p>  <p><b>Варианты ответа:</b> 1. 4 2. 1 3. 2 4. 3</p>	<p>Протон и электрон отличаются друг от друга знаком заряда и массой, поэтому протон будет отклоняться в магнитном поле в противоположную сторону. Но, поскольку масса протона значительно больше массы электрона, при одной и той же скорости радиус окружности, по которой движется протон, будет существенно больше радиуса окружности, по которой движется электрон <math>\left( R = \frac{mv}{qB} \right)</math>. Таким образом, протон будет двигаться по траектории 2.</p>
<p>Если электрон, влетевший в область однородного магнитного поля, движется по дуге окружности, то вектор индукции магнитного поля направлен...</p> <p><b>Ответ:</b> перпендикулярно плоскости чертежа, «от нас»</p>  <p><b>Варианты ответа:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. вниз в плоскости чертежа</li> <li>2. вверх в плоскости чертежа</li> <li>3. перпендикулярно плоскости чертежа, «от нас»</li> <li>4. перпендикулярно плоскости чертежа, «к нам»</li> </ol>	<p>По условию траектория движения заряженной частицы в магнитном поле – окружность. Это означает, что <math>\vec{v} \perp \vec{B}</math>. Учитывая, что вектор скорости частицы направлен по касательной к траектории в данной точке, а вектор силы Лоренца – по нормали к ней, пользуясь правилом левой руки, найдем направление вектора магнитной индукции. При этом учтем, что движется электрон, т.е. знак <math>\vec{B}</math> заряда отрицательный. Таким образом, вектор <math>\vec{B}</math> направлен перпендикулярно плоскости чертежа «от нас».</p>



<p>Протон и электрон ускоряются электростатическим полем, пройдя одинаковую разность потенциалов. При этом отношение скоростей <math>\frac{v_p}{v_e}</math> будет равно...</p> <p>Ответ: <math>\frac{v_p}{v_e} = \sqrt{\frac{m_e}{m_p}}</math></p> <p>Варианты ответа:</p> <p>1. <math>\frac{v_p}{v_e} = \sqrt{\frac{m_p}{m_e}}</math> 2. <math>\frac{v_p}{v_e} = \frac{m_e}{m_p}</math> 3. <math>\frac{v_p}{v_e} = \sqrt{\frac{m_e}{m_p}}</math> 4. <math>\frac{v_p}{v_e} = \frac{m_p}{m_e}</math></p>	<p>Работа сил электростатического поля приведет к увеличению кинетической энергии: <math>qU_{\text{уск}} = \frac{mv^2}{2}</math>.</p> <p>Отсюда скорость частицы будет равна <math>v = \sqrt{\frac{2qU_{\text{уск}}}{m}}</math>.</p> <p>Следовательно, отношение скоростей протона и электрона <math>\frac{v_p}{v_e} = \sqrt{\frac{m_e}{m_p}}</math></p>
<p>Магнитный момент <math>\vec{P}_m</math> контура с током ориентирован в однородном внешнем магнитном поле <math>\vec{B}</math> так, как показано на рисунках. Положение контура устойчиво и момент сил, действующих на него, равен нулю в случае ...</p>  <p>Ответ <math>\vec{B}</math></p> <p>Варианты ответа:</p> 	<p>Вращающий момент, действующий на контур с током в магнитном поле, равен векторному произведению магнитного момента <math>\vec{P}_m</math> контура и магнитной индукции <math>\vec{B}</math> поля, т.е. <math>\vec{M} = [\vec{P}_m, \vec{B}]</math>. Модуль вращающего момента равен <math>M = P_m B \sin \alpha</math>, где <math>\alpha</math> – угол между векторами <math>\vec{P}_m</math> и <math>\vec{B}</math>.</p> <p>Из этой формулы следует, что вращающий момент равен нулю и контур с током находится в равновесии в однородном магнитном поле в двух случаях: если вектор <math>\vec{P}_m</math> сонаправлен вектору <math>\vec{B}</math> (<math>\alpha=0</math>) и если вектора <math>\vec{P}_m</math> и <math>\vec{B}</math> направлены в противоположные стороны (<math>\alpha=\pi</math>).</p> <p>В первом случае равновесие рамки – устойчивое, т.к. при отклонении контура из положения, в котором <math>\alpha=0</math>, возникает момент <math>M</math> сил Ампера, возвращающих контур в положение равновесия.</p> <p>Во втором случае контур находится в неустойчивом равновесии, т.к. при любом отклонении его от этого положения возникает момент <math>M</math> сил Ампера, который вызывает дальнейшее отклонение контура от положения <math>\alpha=\pi</math>.</p> <p>Итак, положение рамки устойчиво и момент сил, действующих на нее, равен нулю в случае, показанном на рис.</p>
<p>Величину вектора магнитной индукции в данной точке магнитного поля можно определить по отношению ...</p> <p>Ответ: - силы, действующей со стороны магнитного поля на малый элемент длины проводника с током, к произведению силы тока на длину этого элемента, если он расположен в поле так, что это отношение имеет максимальное значение</p> <p>- вращающего момента, действующего в магнитном поле на пробный контур с током, к</p>	<p>Величину вектора магнитной индукции можно определить, используя вращающий момент, действующий на контур с током в магнитном поле, силу Ампера, действующую на проводник с током в магнитном поле, силу Лоренца, действующую на заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле.</p> <p>Магнитная индукция численно равна отношению вращающего момента, действующего в магнитном поле на пробный контур с током, к магнитному моменту контура при такой его ориентации в поле,</p>

магнитному моменту контура при такой его ориентации в поле, когда это отношение достигает максимального значения

- силы, действующей на неподвижный точечный заряд, к величине заряда

- **силы**, действующей со стороны магнитного поля на малый элемент длины проводника с током, к произведению силы тока на длину этого элемента, если он расположен в поле так, что это отношение имеет максимальное значение

- времени поворота магнитной стрелки к ее длине

- **вращающего момента**, действующего в магнитном поле на пробный контур с током, к магнитному моменту контура при такой его ориентации в поле, когда это отношение достигает максимального значения

когда это отношение достигает максимального значения:

$$B = \frac{M_{\max}}{P_m}$$

Магнитная индукция численно равна отношению силы, действующей со стороны магнитного поля на малый элемент проводника с током, к произведению силы тока на длину этого элемента, если он расположен в поле так, что это отношение имеет

$$B = \frac{1}{I} \left( \frac{dF}{dl} \right)_{\max}$$

максимальное значение:

#### 14. Явление электромагнитной индукции.

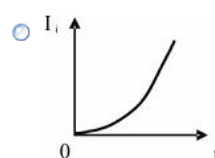
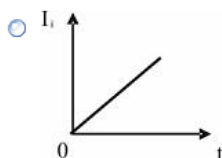
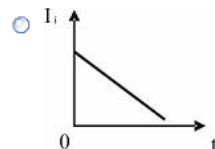
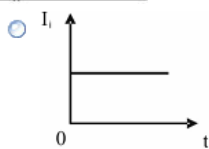
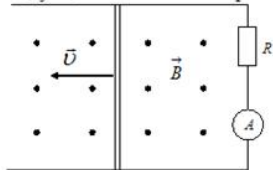
Если магнитный поток сквозь катушку из 20 витков изменяется по закону  $\Phi = (2t - 3,5t^3)$  мВб, то ЭДС индукции, возникающая в катушке в момент времени  $t = 5$  с, равна ... (ответ выразите в В и округлите до целых)

Согласно закону Фарадея,

$$\varepsilon_i = -N \frac{d\Phi}{dt} = -20(2 - 10,5t^2) \cdot 10^{-3} = 5,2B \approx 5B$$

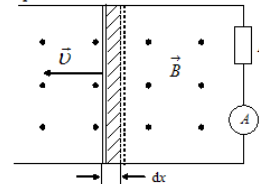
дея,

По параллельным металлическим проводникам, расположенным в однородном магнитном поле, с равномерно возрастающей скоростью перемещается проводящая перемычка (см. рис.). Если сопротивлением перемычки и направляющих можно пренебречь, то зависимость индукционного тока от времени можно представить графиком ...



При движении проводящей перемычки в магнитном поле в ней возникает ЭДС индукции и индукционный ток. Согласно закону Ома для замкнутой цепи,  $I_i = \frac{\varepsilon_i}{R}$ , а ЭДС индукции определяется из закона

Фарадея:  $\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}$ , где  $d\Phi$  – магнитный поток сквозь поверхность, очерчиваемую перемычкой при ее движении за промежуток времени  $dt$ .



Учитывая, что  $d\Phi = BdS \cos 0^\circ$  (поскольку индукция  $\vec{B}$  магнитного поля перпендикулярна плоскости, в которой происходит движение проводника), а  $dS = l v dt$ , где  $l$  – длина перемычки, получаем:

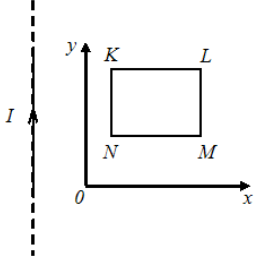
$$d\Phi = BdS = Blv dt. \text{ Тогда } \varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt} = -Blv, \text{ а величина}$$

индукционного тока  $I_i = \frac{\varepsilon_i}{R} = \frac{Blv}{R}$ . По условию скорость перемычки

равномерно возрастает со временем, т.е.  $v = at$ , где  $a$  – постоянная. Тогда зависимость индукционного тока от времени будет иметь вид:

$$I_i = \frac{Blv}{R} = \frac{Bla}{R} t = kt, \text{ где } k \text{ – постоянная.}$$

Прямоугольная проводящая рамка расположена в одной плоскости с прямолинейным проводником, по которому течет ток  $I$  (рис.). В рамке возникает индукционный ток при ...



Укажите не менее двух вариантов ответа

1. вращении рамки вокруг оси, совпадающей с проводником,
2. поступательном перемещении рамки вдоль оси  $OY$ ,
3. поступательном перемещении рамки вдоль оси  $OX$ ,
4. вращении рамки вокруг оси, совпадающей со стороной  $KL$  рамки,
5. вращении рамки вокруг оси, совпадающей со стороной  $LM$  рамки.

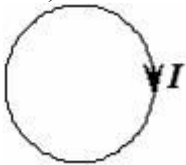
В замкнутом проводящем контуре возникнет индукционный ток, если изменяется магнитный поток сквозь поверхность, ограниченную контуром. По определению магнитный поток сквозь малую поверхность площадью  $dS$  равен

$d\Phi = B_n dS = B dS \cos \alpha$ , где  $\alpha$  – угол между вектором магнитной индукции  $\vec{B}$  и нормалью  $\vec{n}$  к площадке. Магнитный поток сквозь произвольную поверхность  $S$  равен

$$\Phi = \int B_n dS$$

( $S$ ). Отсюда видим, что магнитный поток сквозь поверхность, ограниченную проводящей рамкой, изменится, если изменяется магнитная индукция в соответствующих точках площадки или меняется ориентация площадки по отношению к линиям магнитной индукции.

Сила тока в проводящем круговом контуре индуктивностью  $100$  мГн изменяется с течением времени по закону  $I = (2 + 0,3t)$  (в единицах СИ).



Абсолютная величина ЭДС самоиндукции равна \_\_\_\_ ;

при этом индукционный ток направлен ...

**Ответ: 0,03 В; против часовой стрелки**

**Варианты ответа:**

1. 0,03 В; против часовой стрелки
2. 0,03 В; по часовой стрелке
3. 0,2 В; по часовой стрелке
4. 0,2 В; против часовой стрелки

ЭДС самоиндукции, возникающая в контуре при изменении в нем силы тока  $I$ , определяется по

формуле:  $\varepsilon_{si} = -L \frac{dI}{dt}$ , где  $L$  – индуктивность контура. Знак минус в формуле находится в соответствии с правилом Ленца: индукционный ток направлен так, что противодействует изменению тока в цепи: замедляет его возрастание или убывание. Таким образом, ЭДС самоиндукции равна

$$\varepsilon_{si} = -L \frac{dI}{dt} = -L \frac{d}{dt}(2 + 0,3t) = -0,1 \cdot 0,3 = -0,03 \text{ В}$$

. Абсолютная величина ЭДС самоиндукции равна  $0,03$  В. Индукционный ток направлен против часовой стрелки. При этом учтено направление тока в контуре и его возрастание со временем (что следует из заданного закона изменения силы тока).

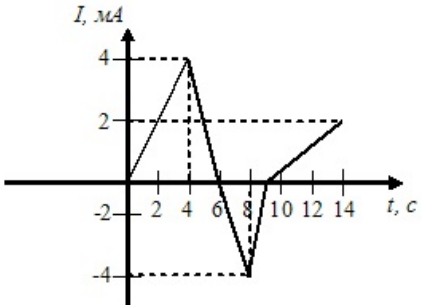
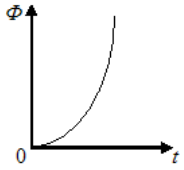
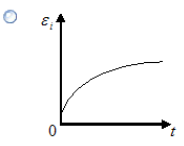
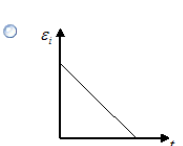
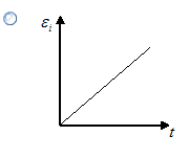
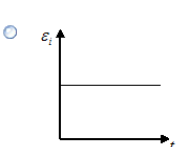
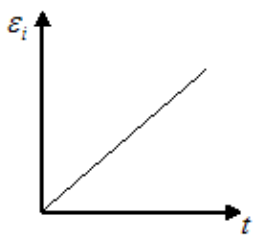
Если изменение силы тока в катушке от времени происходит так, как показано на графике, то максимальное значение модуля ЭДС самоиндукции в катушке наблюдается в промежутке времени...

**Ответ: 8с-9с**

ЭДС самоиндукции определяется формулой

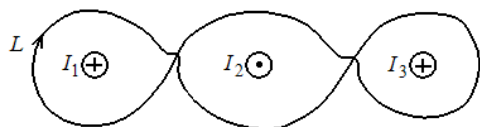
$$\varepsilon_{is} = -L \frac{dI}{dt}$$

, т.е. - пропорциональна скорости изменения силы тока в контуре. Из графика можно сделать вывод о том, что максимальная скорость изменения силы тока имеет место в промежутке  $8\text{с}-9\text{с}$ ; в этом же промежутке максимален модуль ЭДС.

 <p><b>Варианты ответа:</b> 1. <math>0c - 4c</math>    2. <math>4c - 8c</math>    3. <math>9c - 14c</math>    4. <math>8c - 9c</math></p>	
<p>В однородном магнитном поле находится плоская проводящая рамка. ЭДС индукции в рамке будет возникать...</p> <p><b>Ответ:</b> при вращении рамки вокруг оси, перпендикулярной силовым линиям магнитного поля</p> <p><b>Варианты ответа:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>при вращении рамки вокруг оси, параллельной силовым линиям магнитного поля</li> <li>при вращении рамки вокруг оси, перпендикулярной силовым линиям магнитного поля</li> <li>при поступательном движении рамки в направлении, параллельном силовым линиям магнитного поля</li> <li>при поступательном движении рамки в направлении, перпендикулярном силовым линиям магнитного поля</li> </ol>	<p>Согласно явлению электромагнитной индукции ЭДС индукции в проводящей рамке возникает при изменении магнитного потока через поверхность, ограниченную рамкой, что имеет место при вращении рамки вокруг оси, перпендикулярной силовым линиям магнитного поля.</p>
<p>На рисунке дана квадратичная зависимость от времени магнитного потока, пронизывающего проводящий контур. При этом зависимости модуля ЭДС индукции, возникающей в контуре, от времени соответствует график...</p>  <p><b>Варианты ответа:</b></p> <div style="display: flex; flex-wrap: wrap;"> <div style="width: 50%; text-align: center;"> <input type="radio"/>  </div> <div style="width: 50%; text-align: center;"> <input type="radio"/>  </div> <div style="width: 50%; text-align: center;"> <input type="radio"/>  </div> <div style="width: 50%; text-align: center;"> <input type="radio"/>  </div> </div>	<p>Согласно закону Фарадея для электромагнитной индукции <math>\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}</math>. Производная от квадратичной функции даст линейную зависимость. Поэтому верная зависимость модуля ЭДС индукции от времени имеет вид:</p>  <p>Ответ:</p>

### 15. Электрические и магнитные свойства веществ.

На рисунке показаны сечения 3-х длинных параллельных проводников с токами и замкнутый контур  $L$ , для которого указано направление обхода. Если  $I_1 = I_2 = I_3 = 1\text{A}$ , то циркуляция вектора напряженности магнитного поля по контуру  $L$  равна ... **Ответ:** 3А.



$$\oint_{(L)} \vec{H} d\vec{l} = I_1 + I_2 + I_3 = 1 + 1 + 1 = 3\text{A}$$

Согласно закону полного тока для магнитного поля в среде, циркуляция вектора напряженности магнитного поля вдоль произвольного замкнутого контура равна алгебраической сумме токов проводимости, охватываемых этим контуром. При этом ток считается положительным, если его направление связано с направлением обхода по контуру правилом правого винта. Ток противоположного направления считается отрицательным. Таким образом,

$$\oint_{(L)} \vec{H} d\vec{l} = I_1 + I_2 + I_3 = 1 + 1 + 1 = 3\text{A}$$

разом, (L)

Диэлектрическая проницаемость полярных газообразных диэлектриков зависит от ...

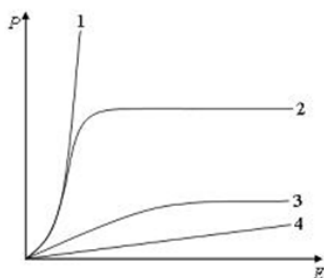
**Ответ:** температуры

**Варианты ответа:**

- 1) напряженности электрического поля
- 2) концентрации молекул
- 3) температуры
- 4) величины дипольных моментов молекул
- 5) предыстории образца, т.е. от предшествующих значений напряженности электрического поля.

Диэлектрическая проницаемость  $\epsilon = 1 + \chi$ , где  $\chi$  – диэлектрическая восприимчивость, независящая от напряженности электрического поля и характеризующая свойства диэлектрика: дипольные моменты молекул и их концентрацию. Поскольку у полярных диэлектриков наблюдается ориентационная поляризация, диэлектрическая восприимчивость, а следовательно, и диэлектрическая проницаемость зависят от температуры

На рисунке представлены графики, схематически отражающие характер зависимости поляризованности  $P$  от напряженности поля  $E$ . Сигнетоэлектрикам соответствует зависимость...



Для сегнетоэлектриков, в отличие от других видов диэлектриков, характерны значительно более высокие значения поляризованности  $P$ . С увеличением напряженности внешнего электрического поля  $E$  поляризованность возрастает, причем нелинейно, а затем достигается состояние насыщения. Особые свойства сегнетоэлектриков объясняются их доменной структурой. График под номером 2 отражает все перечисленные выше свойства.

Вещество является однородным изотропным парамагнетиком, если магнитная восприимчивость...

К парамагнетикам относятся вещества, атомы (молекулы) которых обладают собственным магнитным моментом. Однако вследствие теплового движения молекул их магнитные моменты ориентированы беспорядочно в отсутствие внешнего магнитного поля, и намагниченность вещества в этих условиях равна нулю. При внесении парамагнетика во внешнее магнитное поле устанавливается преимущественная ориентация магнитных моментов атомов (молекул) в направлении поля. Та-



<ul style="list-style-type: none"> <li>○ много больше единицы (<math>\sim 10^3</math>), вектор намагниченности направлен в сторону, противоположную направлению вектора напряженности магнитного поля</li> <li>○ много больше единицы (<math>\sim 10^3</math>), вектор намагниченности направлен в ту же сторону, что и вектор напряженности внешнего магнитного поля</li> <li>○ мала, вектор намагниченности направлен в ту же сторону, что и вектор напряженности внешнего магнитного поля</li> <li>○ мала, вектор намагниченности направлен в сторону, противоположную направлению вектора напряженности внешнего магнитного поля</li> </ul>	<p>ким образом, парамагнетик намагничивается, создавая собственное магнитное поле, совпадающее по направлению с внешним полем и усиливающее его. Диамагнитный эффект наблюдается и в парамагнетиках, но он значительно слабее парамагнитного и поэтому остается незаметным. Магнитная восприимчивость парамагнетиков положительна, значительно меньше единицы и составляет величину <math>10^{-4} - 10^{-6}</math>.</p>
---	---

<p>Для электронной поляризации диэлектриков характерно ...</p> <p><b>Ответ:</b> возникновение у молекул индуцированного дипольного момента при помещении диэлектрика во внешнее электрическое поле</p> <p><b>Варианты ответа:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. ориентирующее действие внешнего электрического поля на собственные дипольные моменты молекул</li> <li>2. влияние теплового движения молекул на степень поляризации диэлектрика</li> <li>3. возникновение у молекул индуцированного дипольного момента при помещении диэлектрика во внешнее электрическое поле</li> <li>4. смещение подрешетки положительных ионов по направлению вектора напряженности внешнего электрического поля, а отрицательных – против поля</li> </ol>	<p>Молекулы некоторых диэлектриков имеют симметричное строение, то есть центры распределения положительных и отрицательных зарядов в молекуле в отсутствие внешнего электрического поля совпадают, и дипольный момент молекулы равен нулю. Поэтому молекулы таких диэлектриков называются неполярными. Под действием внешнего электрического поля заряды неполярных молекул смещаются в противоположные стороны (положительные по полю, отрицательные против поля), и молекула приобретает дипольный момент. Внесение диэлектрика в электрическое поле приводит к его поляризации. Такой тип поляризации называется электронной. Следовательно, электронная или деформационная поляризация диэлектрика с неполярными молекулами заключается в возникновении у молекул индуцированного дипольного момента за счет деформации электронных орбит под влиянием внешнего электрического поля. Тепловое движение неполярных молекул никак не влияет на возникновение у них индуцированных электрических моментов, которые всегда совпадают по направлению с вектором напряженности электрического поля (это связано с очень малой инертностью электронов).</p>
---	--

## 16. Уравнения Максвелла.

<p>Установите соответствие между уравнениями Максвелла и их физическим смыслом.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. <math>\oint_{(L)} \vec{E} d\vec{l} = - \int_{(S)} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}</math>.</li> <li>2. <math>\oint_{(L)} \vec{H} d\vec{l} = \int_{(S)} \left( \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S}</math>.</li> <li>3. <math>\oint_{(S)} \vec{B} d\vec{S} = 0</math>.</li> </ol> <p>- Источником электрического поля являются свободные электрические заряды.</p> <p>- Изменяющееся со временем магнитное поле</p>	<p>Уравнение <math>\oint_{(L)} \vec{E} d\vec{l} = - \int_{(S)} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}</math> означает, что с переменным магнитным полем неразрывно связано вихревое электрическое поле.</p> <p>Из уравнения <math>\oint_{(L)} \vec{H} d\vec{l} = \int_{(S)} \left( \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S}</math> следует, что переменное электрическое поле наряду с токами проводимости является источником вихревого магнитного поля</p> <p>Уравнение <math>\oint_{(S)} \vec{B} d\vec{S} = 0</math> означает, что в природе нет</p>
--	---



порождает вихревое электрическое поле.

- Источником вихревого магнитного поля помимо токов проводимости является изменяющееся со временем электрическое поле.

- «Магнитных зарядов» не существует: силовые линии магнитного поля замкнуты

**Ответ:**

1- Изменяющееся со временем магнитное поле порождает вихревое электрическое поле.

2- Источником вихревого магнитного поля помимо токов проводимости является изменяющееся со временем электрическое поле.

3-«Магнитных зарядов» не существует: силовые линии магнитного поля замкнуты

Полная система уравнений Максвелла в интегральной форме имеет вид:

$$\oint_{(L)} \vec{E} d\vec{l} = - \int_{(S)} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}, \quad \text{Следующая система уравнений:}$$

$$\oint_{(L)} \vec{E} d\vec{l} = 0, \quad \oint_{(L)} \vec{H} d\vec{l} = \int_{(S)} \vec{j} d\vec{S},$$

$$\oint_{(L)} \vec{H} d\vec{l} = \int_{(S)} \left( \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S}, \quad \oint_{(L)} \vec{H} d\vec{l} = \int_{(S)} \vec{j} d\vec{S},$$

$$\oint_{(S)} \vec{D} d\vec{S} = \int_{(V)} \rho dV, \quad \oint_{(S)} \vec{D} d\vec{S} = \int_{(V)} \rho dV,$$

$$\oint_{(S)} \vec{B} d\vec{S} = 0, \quad \oint_{(S)} \vec{B} d\vec{S} = 0$$

справедлива для ...

- стационарных электрических и магнитных полей в отсутствие заряженных тел
- стационарных электрических и магнитных полей в отсутствие токов проводимости
- переменного электромагнитного поля при наличии заряженных тел и токов проводимости
- стационарных электрических и магнитных полей при наличии заряженных тел и токов проводимости

**Ответ:**

стационарных электрических и магнитных полей при наличии заряженных тел и токов проводимости

Уравнения Максвелла являются основными законами классической макроскопической электродинамики, сформулированными на основе обобщения важнейших законов электростатики и электромагнетизма. Эти уравнения в интегральной форме имеют вид:

$$1) \oint_{(L)} \vec{E} d\vec{l} = - \int_{(S)} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S},$$

$$2) \oint_{(L)} \vec{H} d\vec{l} = \int_{(S)} \left( \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S},$$

$$3) \oint_{(S)} \vec{D} d\vec{S} = \int_{(V)} \rho dV,$$

$$4) \oint_{(S)} \vec{B} d\vec{S} = 0.$$

Первое уравнение Максвелла является обобщением ...

магнитных зарядов, на которых начинались бы или заканчивались линии магнитной индукции.

Сопоставление первого уравнения рассматриваемой системы с

первым уравнением Максвелла  $\oint_{(L)} \vec{E} d\vec{l} = - \int_{(S)} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}$  позволяет

сделать вывод о том, что скорость изменения магнитного поля

$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0$ . Следовательно, в данном случае магнитное поле

стационарно ( $\vec{B} = const$ ). Второе уравнение рассматриваемой системы отличается от второго уравнения Максвелла

$\oint_{(L)} \vec{H} d\vec{l} = \int_{(S)} \left( \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S}$  тем, что плотность тока смещения

$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = 0$ . Следовательно, электрическое поле также стационарно

( $\vec{D} = const$ ), а источником магнитного поля являются только токи проводимости с плотностью тока  $\vec{j}$ . Источником электрического поля, согласно третьему уравнению Максвелла, являются электрические заряды с объемной плотностью заряда  $\rho$ . Таким образом, рассматриваемая система справедлива для стационарных электрических и магнитных полей при наличии заряженных тел и токов проводимости.

Первое уравнение Максвелла является обобщением закона электромагнитной индукции для замкнутого проводящего контура, неподвижного в переменном магнитном поле.

Максвелл предположил, что закон справедлив не только для проводящего контура, но и для любого контура, мысленно проведенного в переменном магнитном поле.

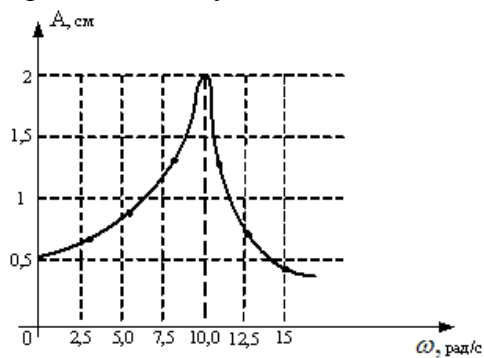
Таким образом, с переменным магнитным полем неразрывно связано индуцированное вихревое электрическое поле, которое не зависит от того, находятся в нем проводники или нет.

<ul style="list-style-type: none"> <li>○ закона электромагнитной индукции</li> <li>○ закона полного тока в среде</li> <li>○ теоремы Остроградского – Гаусса для магнитного поля</li> <li>○ теоремы Остроградского – Гаусса для электростатического поля в среде</li> </ul> <p><b>Ответ:</b> закона электромагнитной индукции для замкнутого проводящего контура</p>	
<p>Одно из уравнений Максвелла представляет собой обобщение закона полного тока для поля в веществе и математически может быть выражено уравнениями ...</p> <p><b>Ответ:</b> <math display="block">\oint_{(L)} \vec{H} d\vec{l} = \int_{(S)} \left( \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S}</math></p> <p><b>Варианты ответа:</b></p> <p>1. <math display="block">I_{см} = \int_{(S)} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} d\vec{S} \quad 2. \quad \vec{j}_{см} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}</math></p> <p>3. <math display="block">\oint_{(L)} \vec{H} d\vec{l} = \int_{(S)} \left( \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S} \quad 4. \quad \oint_{(L)} \vec{H} d\vec{l} = I_{макро} + \frac{\partial \Phi_e}{\partial t}</math></p>	<p>Максвелл обобщил закон полного тока, предположив, что переменное электрическое поле наряду с токами проводимости является источником магнитного поля:</p> $\oint_{(L)} \vec{H} d\vec{l} = I_{макро} + I_{см} = I_{макро} + \frac{\partial \Phi_e}{\partial t} = \int_{(S)} \left( \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S}.$

#### 4. Механические и электромагнитные колебания и волны.

##### 17. Свободные и вынужденные колебания.

На рисунке представлена зависимость амплитуды вынужденных колебаний груза массой 1 кг на пружине от частоты вынуждающей силы при слабом затухании.



Коэффициент жесткости пружины в  $\frac{H}{м}$  равен...

**Ответ:** 100Н/м

Маятник совершает свободные колебания, которые подчиняются дифференциальному уравнению  $\frac{d^2x}{dt^2} + 400x = 0$ . Период колебаний маятника равен...

**Ответ:**  $T = \frac{2\pi}{20} = \frac{\pi}{10} c$

На графике представлена резонансная кривая. Если частота вынуждающей силы равна резонансной частоте, амплитуда вынужденных колебаний достигает максимального значения. При слабом затухании резонансная частота практически равна собственной частоте колебаний пружинного маятника.

ка 
$$\omega_{рез} \approx \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} = 10 \frac{рад}{с}$$

Следовательно,

$$k = \omega_{рез}^2 \cdot m = 100 \frac{H}{м}$$

Дифференциальное уравнение свободных

колебаний имеет вид  $\frac{d^2x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0$ , где  $\omega_0$  - собственная круговая частота колебаний, которая равна

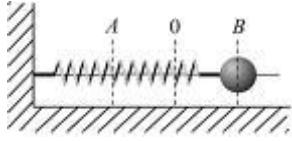
$$\omega_0 = \sqrt{400} = 20 c^{-1}. \quad \text{Период колебаний} \quad T = \frac{2\pi}{\omega}$$

$$T = \frac{2\pi}{20} = \frac{\pi}{10} c$$

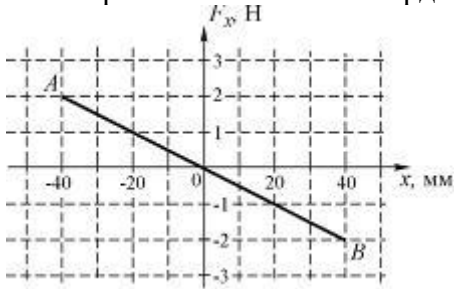
В данной задаче

<p>К спиральной пружине жесткостью <math>k</math>, расположенной горизонтально, прикрепили груз массы <math>m</math> и поместили всю систему в вязкую среду с коэффициентом сопротивления <math>b</math>. Если тело сместить из положения равновесия и отпустить, то закон его движения имеет вид ...</p> $\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{b}{m} \frac{dx}{dt} + \frac{k}{m} x = 0$ <p><b>Ответ:</b></p> <p><b>Варианты ответа:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li><math>\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{b}{m} \frac{dx}{dt} + \frac{k}{m} x = \frac{F_0}{m} \cos \omega t</math></li> <li><math>\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{m} x = \frac{F_0}{m} \cos \omega t</math></li> <li><math>\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{m} x = 0</math></li> <li><math>\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{b}{m} \frac{dx}{dt} + \frac{k}{m} x = 0</math></li> </ol>	<p>Совместим ось <math>Ox</math> с направлением движения и за начало отсчета <math>x = 0</math> примем положение равновесия. На тело действуют две силы: сила упругости пружины <math>\vec{F}_{упр}</math> и сила сопротивления среды <math>\vec{F}_c</math>. По закону Гука <math>\vec{F}_{упр} = -kx\vec{i}</math>. Сила сопротивления среды в первом приближении пропорциональна скорости тела и направлена в противоположную сторону: <math>\vec{F}_c = -b\vec{v} = -b \frac{dx}{dt} \vec{i}</math>. По второму закону Ньютона <math>m\vec{a} = \vec{F}_{упр} + \vec{F}_c</math> или в проекции на ось <math>Ox</math> в дифференциальной форме <math>m \frac{d^2x}{dt^2} = -kx - b \frac{dx}{dt}</math>. После преобразований получим <math>\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{b}{m} \frac{dx}{dt} + \frac{k}{m} x = 0</math>, что является правильным ответом.</p>
<p>Маятник совершает вынужденные колебания со слабым коэффициентом затухания <math>\beta &lt; \omega_0</math>, которые подчиняются дифференциальному уравнению</p> $\frac{d^2x}{dt^2} + 5 \frac{dx}{dt} + 400x = 0,1 \cos 100t$ <p>Амплитуда колебаний будет максимальна, если частоту вынуждающей силы ...</p> <p><b>Ответ:</b> уменьшить в 5 раз</p> <p><b>Варианты ответа</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>уменьшить в 5 раз</li> <li>уменьшить в 4 раза</li> <li>увеличить в 4 раза</li> <li>увеличить в 5 раз</li> </ol>	<p>Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний имеет вид <math>\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = f_0 \cos \omega t</math>, где <math>\beta</math> – коэффициент затухания, <math>\omega_0</math> – собственная круговая частота колебаний; <math>f_0</math> – амплитудное значение вынуждающей силы, делённое на массу; <math>\omega</math> – частота вынуждающей силы. При слабом коэффициенте затухания (<math>\beta &lt; \omega_0</math>) амплитуда колебаний будет максимальна, (явление резонанса). Собственная частота колебаний равна <math>\omega_0 = \sqrt{400} = 20 \text{ c}^{-1}</math>, частота вынуждающей силы – <math>\omega = 100 \text{ c}^{-1}</math>. Следовательно, частоту вынуждающей силы необходимо уменьшить в 5 раз.</p>
<p>Материальная точка совершает гармонические колебания по закону</p> $x = 0,9 \cos \left( \frac{2\pi}{3} t + \frac{\pi}{4} \right)$ <p>Максимальное значение ускорения точки равно...</p> <p><b>Ответ:</b> <math>0,4\pi^2 \text{ м/с}^2</math></p> <p><b>Варианты ответа:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li><math>0,4\pi^2 \text{ м/с}^2</math></li> <li><math>4\pi^2 \text{ м/с}^2</math></li> <li><math>\frac{2\pi}{3}</math></li> <li><math>0,6\pi</math></li> </ol>	<p>Ускорение, равное второй производной координаты по времени</p> $a_x = \frac{d^2x}{dt^2} = -0,9 \left( \frac{2\pi}{3} \right)^2 \cos \left( \frac{2\pi}{3} t + \frac{\pi}{4} \right) = -0,4\pi^2 \cos \left( \frac{2\pi}{3} t + \frac{\pi}{4} \right)$ <p>, также меняется по гармоническому закону. Ускорение материальной точки будет максимальным по величине, если <math>\cos \left( \frac{2\pi}{3} t + \frac{\pi}{4} \right) = \pm 1</math>. Амплитуда ускорения равна <math>0,4\pi^2 \text{ м/с}^2</math> (в соответствии с общей формулой <math>a_{\max} = A\omega^2</math>). Следовательно, максимальное значение ускорения равно <math>0,4\pi^2 \text{ м/с}^2</math>.</p>

Шарик, прикрепленный к пружине (пружинный маятник) и насаженный на горизонтальную направляющую, совершает гармонические колебания.



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



В положении  $B$  энергия пружинного маятника в  $мДж$  равна ...

**Ответ:** 40мДж

В положении  $B$  пружинный маятник обладает потенциальной энергией, кинетическая энергия равна нулю. Потенциальную энергию можно найти по

формуле  $\Pi = \frac{kx^2}{2}$ , где  $k$  – коэффициент жесткости пружины,  $x$  – растяжение (сжатие) пружины. Жесткость пружины можно определить, используя график:

$$F_x = -kx, \quad k = -\frac{F_x}{x} = -\frac{-2}{40 \cdot 10^{-3}} = 50 \frac{Н}{м}$$

Величину растяжения (сжатия) пружины в положении  $B$  также можно определить из графика:

$$\Pi = \frac{50 \cdot 16 \cdot 10^{-4}}{2} = 4 \cdot 10^{-2} Дж = 0,04 Дж = 40 мДж$$

Материальная точка совершает гармонические колебания по закону

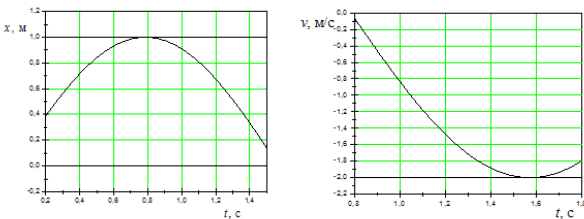
$$x = 0,9 \cos\left(\frac{2\pi}{3}t + \frac{\pi}{4}\right)$$

Период колебания точки равен. **Ответ:**  $T = 3$  с.

Зависимость координаты материальной точки от времени при гармонических колебаниях определяется выражением  $x = A \cos(\omega t + \varphi_0)$ , где  $A$  – амплитуда,  $\omega$  – круговая частота,  $\varphi_0$  – начальная фаза колебаний. Период колебаний

равен  $T = \frac{2\pi}{\omega}$ . В данной задаче  $\omega = \frac{2\pi}{3} c^{-1}$  следовательно, период  $T = 3$  с.

На рисунках изображены зависимости от времени координаты и скорости материальной точки, колеблющейся по гармоническому закону.

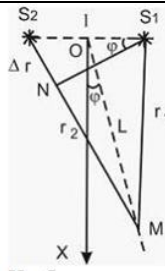


Циклическая частота колебаний точки равна ... **Ответ:** 2 рад/с

**Варианты ответа:** 1.  $2 c^{-1}$  2.  $1 c^{-1}$  3.  $4 c^{-1}$  4.  $0,5 c^{-1}$

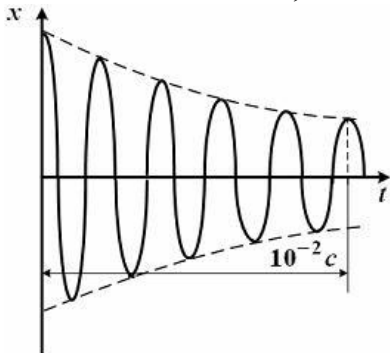
Амплитудное значение скорости определяется по формуле  $v_{max} = A\omega$ , где  $A$  – амплитуда координаты (максимальное смещение материальной точки),  $\omega$  – циклическая частота. Используя графики, находим  $A = 1м$ ,  $v_{max} = 2 м/с$  (знак минус показывает, что точка в данный момент времени движется в отрицательном направлении оси  $x$ ). Следовательно,  $\omega = \frac{v_{max}}{A} = \frac{2 м/с}{1,0 м} = 2 c^{-1}$ .

Два гармонических осциллятора, колеблющихся с одинаковыми частотой и начальной фазой, находятся на расстоянии  $l = 2\lambda$  друг от друга, где  $\lambda$  – длина волны излучения. Расстояние  $L$  до точки наблюдения  $M$  много больше расстояния  $l$  между осцилляторами. Амплитуда результирующей волны максимальна при угле излучения  $\varphi$ , равном ...



Необходимым условием интерференции волн является их когерентность. Осцилляторы в условии данной задачи совершают гармонические колебания с одинаковой частотой и постоянной разностью фаз, излучаемые ими волны когерентны. Рассмотрим точку  $M$ , положение которой определяется углом  $\varphi$ . Обозначим через  $r_1, r_2$  расстояния от источников  $S_1$  и  $S_2$  до рассматриваемой точки  $M$ , положение которой определяется углом  $\varphi$ . Обозначим через  $r_1, r_2$  расстояния от источников  $S_1$  и  $S_2$  до рассматриваемой точки  $M$ . Проведем перпендикуляр  $S_1N$ , найдем разность хода ( $MN \approx r_2$ ), то есть разность расстояний, пройденных волнами, излученными источниками  $S_1$  и  $S_2$ , до точки  $M$ :  $\Delta r = r_2 - r_1$ . Из прямоугольного треугольника  $S_1S_2N$  найдем  $\Delta r = l \sin \varphi$ . Амплитуда результирующей волны максимальна, если разность хода равна целому числу длин волн. Следовательно,  $l \sin \varphi = n\lambda$ , где  $n = 0, 1, 2, \dots$ ;  $\lambda$  – длина волны излучения;  $\sin \varphi = \frac{n\lambda}{l} = \frac{n\lambda}{2\lambda} = \frac{n}{2}$ . Амплитуда результирующей волны максимальна в направлениях излучения:  $\varphi = 0^0 (n = 0)$ ;  $\varphi = 30^0 (n = 1)$ ;  $\varphi = 90^0 (n = 2)$ . Значение  $n = 3$  невозможно, так как должно выполняться соотношение  $\sin \varphi \leq 1$ . Из предложенных ответов верным будет  $\varphi = 30^0$ .

График зависимости координаты  $x$  материальной точки от времени  $t$  для затухающих колебаний имеет вид, показанный на рисунке:



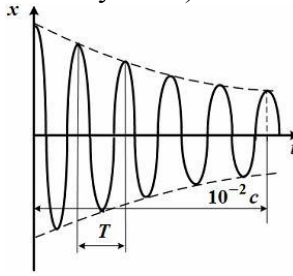
Циклическая частота затухающих колебаний равна ...

Ответ:  $10^3 \pi \text{ c}^{-1}$

Варианты ответа:

1.  $2 \cdot 10^2 \pi \text{ c}^{-1}$
2.  $5 \cdot 10^2 \text{ c}^{-1}$
3.  $10^2 \text{ c}^{-1}$
4.  $10^3 \pi \text{ c}^{-1}$

При слабом затухании можно условно пользоваться понятием периода затухающих колебаний  $T$  как промежутка времени между двумя последующими максимумами (или минимумами) колеблющейся физической



Тогда период затухающих колебаний определяется

формулой  $T = \frac{2\pi}{\omega}$ , где  $\omega$  – циклическая частота затухающих колебаний. Из графика видно, что за

время  $t = 10^{-2} \text{ c}$  тело совершает 5 полных коле-

баний:  $t = 5T$ . Отсюда  $T = \frac{t}{5} = \frac{10^{-2} \text{ c}}{5} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ c}$ , а

циклическая частота  $\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{2 \cdot 10^{-3} \text{ c}} = 10^3 \pi \text{ c}^{-1}$ .

Циклическая частота затухающих колебаний рав-

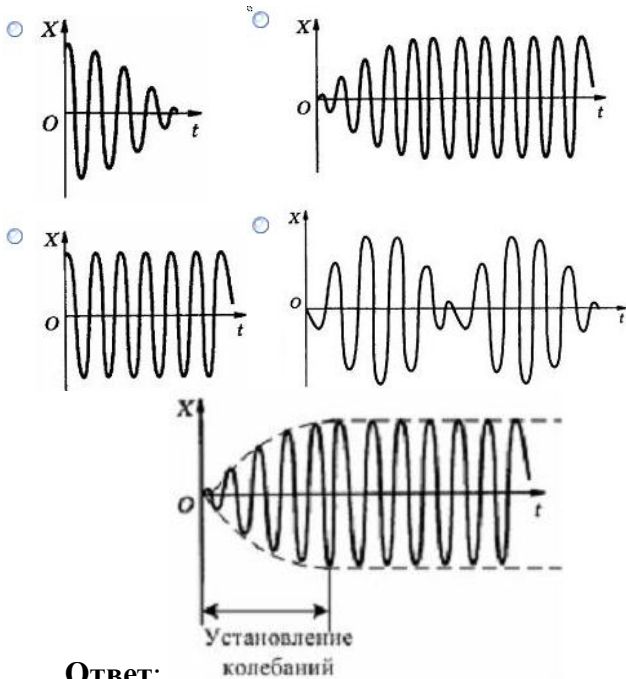
на  $10^3 \pi \text{ c}^{-1}$ .



Колебание материальной точки, возникающее под действием внешней периодически изменяющейся силы, происходит по закону:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = f_0 \cos(\omega t), \text{ где}$$

$\beta$  – коэффициент затухания;  $\omega_0$  и  $\omega$  – циклические частоты соответственно собственных и вынужденных колебаний;  $f_0$  – амплитуда вынуждающей силы, отнесенная к массе тела. Зависимость смещения  $x$  материальной точки от времени имеет вид, показанный на рисунке ...



Ответ:

Уравнение вынужденных колебаний

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = f_0 \cos(\omega t) -$$

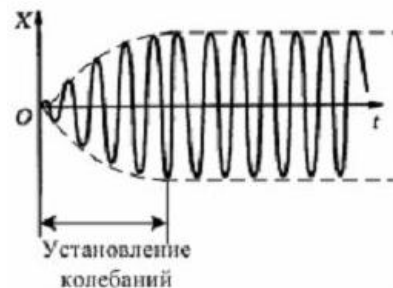
это линейное неоднородное дифференциальное уравнение, решение которого равно сумме общего решения однородного уравнения

$$x_1(t) = A_0 e^{-\beta t} \cos(\omega_1 t + \varphi_1) \text{ и}$$

частного решения неоднородного уравнения  $x = A \cos(\omega t - \varphi_0)$ .

Общее решение играет существенную роль только в начальной стадии процесса установления гармонических колебаний с частотой  $\omega$

вынуждающей силы (см. рис.). Из графика видно, что амплитуда вынужденных колебаний постепенно нарастает, и затем устанавливается гармоническое колебание с частотой вынуждающей силы:



Если в колебательном контуре индуктивность катушки увеличить в 2 раза, то период колебаний ... **Ответ:** возрастёт в  $\sqrt{2}$  раз

**Варианты ответа:**

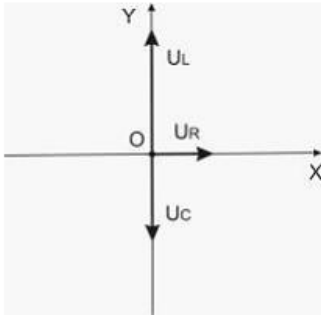
1. уменьшится в 2 раза
2. уменьшится в  $\sqrt{2}$  раз
3. увеличится в 2 раза
4. увеличится в  $\sqrt{2}$  раз

В колебательном контуре, состоящем из катушки индуктивности и конденсатора, период собственных колебаний равен  $T = 2\pi \sqrt{LC}$ , где  $L$  – индуктивность катушки,  $C$  – ёмкость конденсатора. Следовательно, при увеличении индуктивности катушки в 2 раза период колебаний возрастёт в  $\sqrt{2}$  раз.

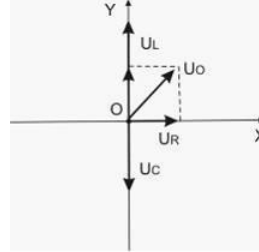


### 18. Сложение гармонических колебаний.

Резистор, катушка индуктивности и конденсатор соединены последовательно и подключены к источнику переменного напряжения, изменяющегося по закону  $U = \sqrt{2} \cos(3,14t)$  (В). На рисунке представлена фазовая диаграмма падений напряжений на указанных элементах. Амплитудные значения напряжений в  $B$  соответственно равны: на резисторе  $U_R = 1B$ ; на катушке индуктивности  $U_L = 3B$ ; на конденсаторе  $U_C = \dots$  **Ответ:**  $U_C = 3 - 1 = 2B$

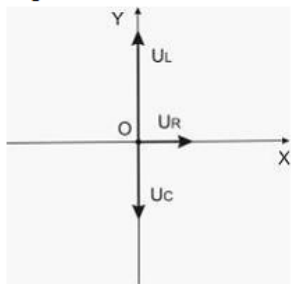


Используем метод векторных диаграмм. Длина вектора равна амплитудному значению напряжения, а угол, который вектор составляет с осью  $OX$ , равен фазе колебания напряжения на соответствующем элементе.

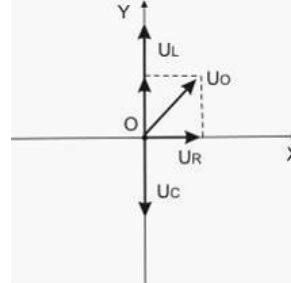


Сложив три вектора, найдем амплитудное значение результирующего напряжения, равного напряжению источника:  $\vec{U}_R + \vec{U}_L + \vec{U}_C = \vec{U}_0$ . Амплитудное значение напряжения источника равно:  $U_0 = \sqrt{2} B$ . Чтобы определить амплитудное значение напряжения на конденсаторе, найдем  $U_L - U_C = \sqrt{U_0^2 - U_R^2} = \sqrt{2 - 1} = 1B$ , тогда  $U_C = 3 - 1 = 2B$ .

Резистор, катушка индуктивности и конденсатор соединены последовательно и подключены к источнику переменного тока, изменяющегося по закону  $I = 0,1 \cos(3,14t)$  (А). На рисунке представлена фазовая диаграмма падений напряжений на указанных элементах. Амплитудные значения напряжений соответственно равны: на резисторе  $U_R = 1B$ ; на катушке индуктивности  $U_L = 3B$ ; на конденсаторе  $U_C = 2B$ . При этом полное сопротивление контура равно ..



**Ответ:** 14 Ом



Используем метод векторных диаграмм. Длина вектора равна амплитудному значению напряжения, а угол, который вектор составляет с осью  $OX$ , равен фазе колебания напряжения на соответствующем элементе. Сложив три вектора, найдем амплитудное значение полного напряжения:

$\vec{U}_R + \vec{U}_L + \vec{U}_C = \vec{U}_0$ . Величина  $U_0 = \sqrt{2} = 1,4B$ . Полное

сопротивление контура найдем по закону Ома:  $Z = \frac{U_0}{I_0}$ , где

$U_0, I_0$  – амплитудные значения напряжения и силы тока.

Амплитудное значение силы тока указано в законе изменения

силы тока и равно 0,1 А.  $Z = \frac{1,4}{0,1} = 14$  Ом.

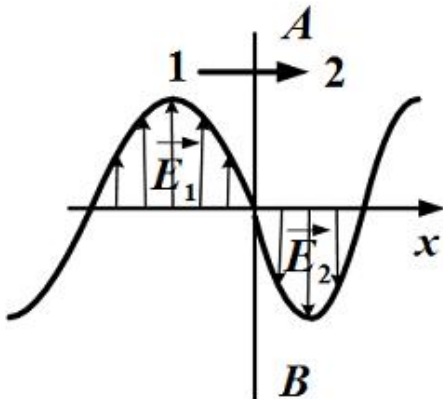
<p>Складываются два гармонических колебания одного направления с одинаковыми частотами и равными амплитудами <math>A_0</math>.</p> <p>Установите соответствие между разностью фаз складываемых колебаний и амплитудой результирующего колебания.</p> <p>1. <math>\frac{\pi}{2}</math>      <input type="checkbox"/> <math>2A_0</math></p> <p>2. <math>\pi</math>      <input type="checkbox"/> <math>A_0\sqrt{2}</math></p> <p>3. <math>\frac{2\pi}{3}</math>      <input type="checkbox"/> <math>A_0</math></p> <p>                  <input type="checkbox"/> 0</p>	<p>Амплитуда результирующего колебания, полученного при сложении двух гармонических колебаний одного направления с одинаковыми частотами, определяется по формуле <math>A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1)</math>, где <math>A_1</math> и <math>A_2</math> – амплитуды, <math>(\varphi_2 - \varphi_1)</math> – разность фаз складываемых колебаний.</p> <p>Если <math>(\varphi_2 - \varphi_1) = \frac{\pi}{2}</math>, <math>\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = 0</math>, то <math>A = A_0\sqrt{2}</math>.</p> <p>Если <math>(\varphi_2 - \varphi_1) = \pi</math>, <math>\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = -1</math>, то <math>A = 0</math>.</p> <p>Если <math>(\varphi_2 - \varphi_1) = \frac{2\pi}{3}</math>, <math>\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = -\frac{1}{2}</math>, то <math>A = A_0</math>.</p>
<p>Складываются два гармонических колебания одного направления с одинаковыми периодами. Результирующее колебание имеет максимальную амплитуду при разности фаз, равной ...</p>	<p>Амплитуда результирующего колебания, полученного при сложении двух гармонических колебаний одного направления с одинаковыми частотами, определяется по формуле <math>A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1)</math>, где <math>A_1</math> и <math>A_2</math> – амплитуды складываемых колебаний; <math>\varphi_1</math> и <math>\varphi_2</math> – их начальные фазы. Следует заметить, если равны периоды колебаний, то равны и их частоты, так как <math>\omega = \frac{2\pi}{T}</math>.</p> <p>Амплитуда результирующего колебания будет максимальной, если <math>\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = 1</math>, следовательно, <math>(\varphi_2 - \varphi_1) = 0</math>.</p>

### 19. Волны. Уравнение волны.

На рисунке представлена мгновенная «фотография» электрической составляющей электромагнитной волны, переходящей из среды 1 в среду 2 перпендикулярно границе раздела  $AB$ . Напряженность электрического поля в первой и второй среде изменяется согласно уравнениям:

$$E_1 = E_0 \sin(\omega t - 5 \cdot 10^6 \pi x) \text{ и}$$

$$E_2 = E_0 \sin(\omega t - 8 \cdot 10^6 \pi x).$$



Относительный показатель преломления двух сред равен ...

Ответ: 1,6

Варианты ответа:

- 0,6                       1  
 1,5                         1,6

Относительный показатель преломления двух сред равен отношению их абсолютных показателей преломления:  $n_{21} = n_2/n_1$ , где  $n_1 = c/v_1$  и  $n_2 = c/v_2$  – абсолютные показатели преломления среды 1 и среды 2, равные отношению скорости  $c$

электромагнитной волны в вакууме к фазовым скоростям  $v_1$  и  $v_2$  в этих средах.

Следовательно,  $n_{21} = n_2/n_1 = v_1/v_2$ .

Волновое число  $k = \frac{\omega}{v}$ , где  $\omega$  – циклическая

частота, следовательно, фазовая скорость

$v = \frac{\omega}{k}$ . Тогда при условии  $\omega_1 = \omega_2$  (при

переходе электромагнитной волны из среды 1 в среду 2 циклическая частота не меняется) относительный показатель преломления

равен:  $n_{21} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{k_2}{k_1} = \frac{8 \cdot 10^6 \pi}{5 \cdot 10^6 \pi} = 1,6$ .

Для плоской бегущей волны справедливо утверждение, что ...

Ответ: амплитуда волны не зависит от расстояния до источника колебаний (при условии, что поглощением среды можно пренебречь)

Варианты ответа:

1. нет переноса энергии
2. амплитуда волны не зависит от расстояния до источника колебаний (при условии, что поглощением среды можно пренебречь)
3. амплитуда волны обратно пропорциональна расстоянию до источника колебаний (при условии, что поглощением среды можно пренебречь)
4. волновые поверхности имеют вид концентрических сфер

Распространение в упругой среде механических возмущений связано с переносом волнами энергии, поэтому такие волны называют бегущими волнами. Волна называется плоской, если ее волновые поверхности представляют совокупность плоскостей, параллельных друг другу. Если плоская волна распространяется в не поглощающей среде, то амплитуда волны не зависит от расстояния до источника колебаний.

<p>Сейсмическая упругая волна, падающая под углом <math>45^\circ</math> на границу раздела между двумя слоями земной коры с различными свойствами, испытывает преломление, причем угол преломления равен <math>30^\circ</math>. Если в первой среде волна распространяется со скоростью <math>5,6</math> км/с, то во второй среде скорость (в км/с) сейсмической волны равна ...</p> <p><b>Ответ:</b> 4км/с</p>	<p>Сейсмическая волна испытывает преломление, поскольку скорость распространения волны при переходе из одной среды в другую меняется <math>\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2}</math>, где <math>\alpha</math> – угол падения, <math>\beta</math> – угол преломления, <math>v_1</math> – скорость распространения волны в первой среде, <math>v_2</math> – скорость распространения волны во второй среде.</p> $v_2 = \frac{v_1 \cdot \sin \beta}{\sin \alpha} = \frac{5,6}{\sqrt{2}} = \frac{5,6}{1,4} = 4 \text{ км/с}$
<p>Продольными волнами являются...</p> <p><b>Ответ:</b> звуковые волны в воздухе</p> <p><b>Варианты ответа:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. звуковые волны в воздухе</li> <li>2. волны на поверхности жидкости</li> <li>3. волны, распространяющиеся вдоль струн музыкальных инструментов</li> <li>4. световые волны в вакууме</li> </ol>	<p>Упругая волна называется продольной, если частицы среды колеблются в направлении распространения волны. В данной задаче упругими продольными волнами являются звуковые волны в воздухе, так как при распространении звуковой волны частицы воздуха колеблются в направлении распространения волны. В струне возникают деформации сдвига, и частички струны колеблются в направлении, перпендикулярном направлению распространения волны вдоль струны. Следовательно, эти волны относят к поперечным волнам. Световые волны – электромагнитные волны. В электромагнитной волне векторы напряженностей электрического и магнитного полей колеблются перпендикулярно направлению распространения волны, следовательно, они также поперечные. В поверхностных волнах частицы жидкости одновременно совершают поперечные и продольные колебания, описывая эллиптические или более сложные траектории.</p>
<p>Поперечными волнами являются ...</p> <p><b>Ответ:</b> волны, распространяющиеся вдоль струн музыкальных инструментов, радиоволны и световые волны в вакууме</p> <p><b>Варианты ответа:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input checked="" type="checkbox"/> звуковые волны в воздухе</li> <li><input checked="" type="checkbox"/> волны, распространяющиеся вдоль струн музыкальных инструментов</li> <li><input checked="" type="checkbox"/> волны на поверхности жидкости</li> <li><input checked="" type="checkbox"/> радиоволны</li> <li><input checked="" type="checkbox"/> световые волны в вакууме</li> </ul>	<p>В данной задаче упругими поперечными волнами являются волны, распространяющиеся вдоль струн музыкальных инструментов, так как в струне возникает деформация сдвига, и частички струны колеблются в направлении, перпендикулярном направлению распространения волны вдоль струны. Радиоволны и световые волны – электромагнитные, следовательно, также поперечные. В электромагнитной волне векторы напряженностей электрического и магнитного полей колеблются в плоскостях, перпендикулярных направлению распространения волны.</p>

Если в электромагнитной волне, распространяющейся вдоль оси ОХ, компоненты векторов напряженностей электрического и магнитного полей изменяются по закону

$$E_y = 750 \sin\left(\omega t - 2x + \frac{\pi}{2}\right) \frac{B}{м};$$

$$H_z = 2 \sin\left(\omega t - 2x + \frac{\pi}{2}\right) \frac{A}{м}$$

то круговая частота равна ...

**Ответ:**  $6 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$

Уравнение плоской монохроматической электромагнитной волны, распространяющейся вдоль оси ОХ, имеет вид

$$E_y = E_0 \sin(\omega t - kx + \varphi_0); \quad H_z = H_0 \sin(\omega t - kx + \varphi_0),$$

где  $E_0, H_0$  – амплитудные значения напряженностей электрического и магнитного полей,  $\omega$  – круговая частота,  $k$  – волновое число,  $\varphi_0$  – начальная фаза. Волновое число по определению равно  $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{T\vartheta} = \frac{\omega}{\vartheta}$ , где  $\lambda$  – длина волны,  $T$  – период колебаний,  $\vartheta$  – скорость распространения волны. Следовательно,  $\omega = k \cdot \vartheta = 2 \cdot 3 \cdot 10^8 = 6 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$ , т.к. скорость распространения электромагнитной волны равна скорости света.

Уравнение плоской синусоидальной волны, распространяющейся вдоль оси ОХ, имеет вид

$$\xi = 0,05 \sin(10^3 t - 0,5x)$$

Длина волны равна...

**Ответ:**  $\lambda = 4\pi = 12,56 \text{ м}$

**Варианты ответа:**

1. 3,14 м 2. 0,5 м 3. 12,56 м 4. 2 м

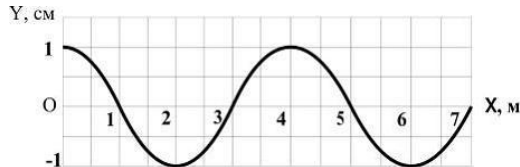
Уравнение плоской синусоидальной волны, распространяющейся вдоль оси ОХ, имеет вид

$$\xi = A \sin(\omega t - kx),$$

где  $\xi$  – величина смещения частиц среды из положения равновесия.  $A$  – амплитуда,  $\omega$  – круговая частота,  $k$  – волновое число. По определению  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ , где  $\lambda$  – длина волны. Следовательно,  $\frac{2\pi}{\lambda} = 0,5$ , откуда  $\lambda = 4\pi = 12,56 \text{ м}$

Профиль бегущей поперечной волны с периодом колебаний 10 мс представлен на рисунке. Скорость распространения волны равна ...

**Ответ:** 400 м/с



**Варианты ответа:**

1. 200 м/с 2. 0,04 м/с 3. 400 м/с 4. 0,02 м/с

Скорость волны можно определить по формуле  $\vartheta = \frac{\lambda}{T}$ , где  $\lambda$  – длина волны,  $T$  – период колебаний. Длину волны можно найти из графика, показывающего зависимость величины смещения частиц среды  $Y$  от координаты  $X$ .  $\lambda = 4 \text{ м}$ . Следовательно,  $\vartheta = \frac{4}{10^{-2}} = 400 \text{ м/с}$

$$\vartheta = \frac{4}{10^{-2}} = 400 \text{ м/с}$$

довательно,

Плоская монохроматическая электромагнитная волна распространяется вдоль оси ОХ. Если вектор напряженности электрического поля имеет компоненты  $E_y = E_0 \sin(\omega t - kx)$ ,  $E_z = 0$ ,  $E_x = 0$ , то компоненты вектора напряженности магнитного поля равны ...

**Ответ:**  $H_z = H_0 \sin(\omega t - kx)$ ,  $H_y = 0$ ,  $H_x = 0$

Электромагнитные волны – поперечные волны, векторы  $\vec{E}_1$  и  $\vec{H}$  поля волны перпендикулярны направлению распространения волны, т.е. в данном случае оси ОХ. Проекции векторов  $\vec{E}_1$  и  $\vec{H}$  на ось ОХ равны нулю. Векторы  $\vec{E}_1$  и  $\vec{H}$  поля электромагнитной волны взаимно перпендикулярны.

Векторы  $\vec{E}_1$ ,  $\vec{H}$  и  $\vec{k}$  образуют правую тройку взаимно ортогональных векторов. Следовательно, компоненты вектора напряженности магнитного поля могут иметь значения  $H_z = H_0 \sin(\omega t - kx)$ ,  $H_y = 0$ ,  $H_x = 0$

20. Энергия волны. Перенос энергии волной.

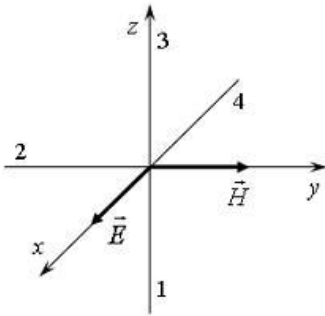
В упругой среде плотности  $\rho$  распространяется плоская синусоидальная волна. Если амплитуда волны увеличится в 4 раза, то плотность потока энергии (вектор Умова) увеличится в \_\_\_\_\_ раз(-а).

Ответ: в 16 раз

Плотность потока энергии, то есть количество энергии, переносимой волной за единицу времени через единицу площади, равно  $U = w \cdot v$ , где  $w$  – объемная плотность энергии,  $v$  – скорость переноса энергии волной (для синусоидальной волны эта скорость равна фазовой скорости). Среднее значение объемной плотности энергии равно  $\langle w \rangle = \frac{1}{2} \rho A^2 \omega^2$ , где  $A$  – амплитуда волны,  $\omega$  – частота. Следовательно, плотность потока энергии увеличится в 16 раз.

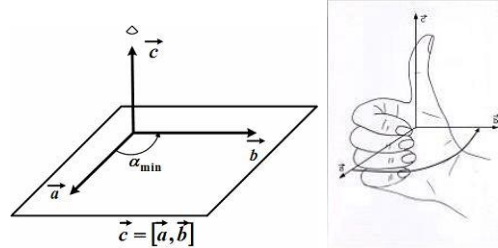
На рисунке показана ориентация векторов напряженности электрического ( $\vec{E}$ ) и магнитного ( $\vec{H}$ ) полей в электромагнитной волне. Вектор плотности потока энергии электромагнитного поля ориентирован в направлении...

Ответ: в направлении 3

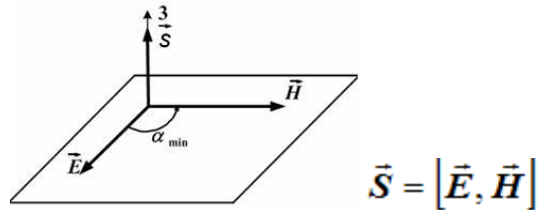


Варианты ответа: 2 3 4 1

Плотность потока энергии электромагнитного поля – вектор, называемый вектором Умова – Пойнтинга, – определяется в векторной форме как  $\vec{S} = [\vec{E}, \vec{H}]$ , где  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  – соответственно векторы напряженностей электрической и магнитной составляющих электромагнитной волны. Векторы  $\vec{S}$ ,  $\vec{E}$ ,  $\vec{H}$  являются правой упорядоченной тройкой векторов.



На рисунке показано, как найти направление результирующего вектора  $\vec{c}$  векторного произведения векторов  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$ . Для нашего случая:



Вектор  $\vec{S}$  направлен вдоль оси Z, т.е. ориентирован в направлении 3.

Плотность потока электромагнитной энергии можно измерять в ...

Ответ: 1, 2, 5

Варианты ответа:

1.  $\frac{В \cdot А}{м^2}$  2.  $\frac{Дж}{с \cdot м^2}$  3.  $В \cdot А \cdot с$  4.  $\frac{Дж}{м^3}$  5.  $\frac{Вт}{м^2}$

Плотность потока энергии – это энергия, переносимая за единицу времени через единицу площади (площадка перпендикулярна направлению потока энергии). Вектор плотности потока электромагнитной энергии равен векторному произведению напряженности электрического поля и напряженности магнитного поля. Единицами измерения плотности потока энергии

являются:  $\frac{В \cdot А}{м^2}$ ,  $\frac{Дж}{с \cdot м^2}$ ,  $\frac{Вт}{м^2}$ .



<p>Если в электромагнитной волне, распространяющейся в вакууме, значения напряженностей электрического и магнитного полей соответственно равны <math>E = 750 \frac{В}{м}</math>, <math>H = 2 \frac{А}{м}</math>, то объемная плотность энергии в микроджоулях на кубический метр составляет ...</p> <p>Ответ: <math>5 \frac{мкДж}{м^3}</math>.</p>	<p>Плотность потока энергии электромагнитной волны (вектор Умова – Пойнтинга) равна <math>S = E \cdot H \sin 90^\circ = 1500 \frac{Дж}{м^2 \cdot с}</math>. Также <math>S = \omega c</math>, где <math>\omega</math> – объемная плотность энергии, <math>c</math> – скорость света. Следовательно, <math>\omega = \frac{E \cdot H}{c} = \frac{1500}{3 \cdot 10^8} = 5 \cdot 10^{-6} \frac{Дж}{м^3} = 5 \frac{мкДж}{м^3}</math>.</p>
--	---

## 5. Волновая и квантовая оптика.

### 21. Интерференция и дифракция света.

<p>Постоянная дифракционной решетки равна 2 мкм. Наибольший порядок спектра для желтой линии натрия <math>\lambda = 589 \text{ нм}</math> равен ...</p> <p>Ответ: <math>k=3</math></p>	<p>Запишем формулу дифракционной решетки <math>d \sin \varphi = k \lambda</math> и выразим <math>k</math>. Максимальный порядок спектра будет при <math>\varphi \rightarrow \frac{\pi}{2}</math>, <math>k_{\max} = \frac{d}{\lambda}</math>. Округляя до ближайшего целого меньшего числа, получим <math>k_{\max} = 3</math>.</p>
<p>Показатель преломления среды <math>n</math>, с точки зрения волновой теории света, равен ...</p> <p>Ответ: <math>n = \frac{c}{v}</math></p> <p><b>Варианты ответа:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) <math>n = \frac{v_0}{v}</math>, где <math>v_0</math> - частота волны в вакууме, <math>v</math> - частота волны в среде</li> <li>2) <math>n = \frac{\lambda}{\lambda_0}</math>, где <math>\lambda_0</math> - длина волны в вакууме, <math>\lambda</math> - длина волны в среде</li> <li>3) <math>n = \text{tgi}</math>, где <math>i</math> - угол падения, соответствующий полной поляризации отраженного луча</li> <li>4) <math>n = \frac{c}{v}</math>, где <math>c</math> - скорость света в вакууме, <math>v</math> - скорость света в среде</li> </ol>	<p>С волновой точки зрения, преломление на границе раздела сред связано с изменением скорости распространения волны. Участки фронта волны, достигнувшие границы раздела сред, начинают двигаться с другой скоростью, и в результате фронт волны разворачивается в ту или иную сторону в зависимости от того, уменьшается или увеличивается скорость. Это и воспринимается как преломление, характеризующееся показателем преломления <math>n = \frac{c}{v}</math>, где <math>c</math> - скорость света в вакууме, <math>v</math> - скорость света в среде</p>
<p>При переходе света из вакуума (воздуха) в какую-либо оптически прозрачную среду (воду, стекло) остается неизменной ...</p> <p>Ответ: частота</p> <p><b>Варианты ответа:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) длина волны</li> <li>2) скорость распространения</li> <li>3) частота колебаний в световой волне</li> <li>4) направление распространения</li> </ol>	<p>При переходе световой волны из вакуума в какую-либо оптически прозрачную среду атомы (частицы) среды начинают совершать под действием поля проходящей волны вынужденные колебания такой же частоты, что и в первичной волне, и сами становятся источниками вторичных волн, накладывающихся на первичную. Поскольку частота вторичных волн совпадает с частотой первичной волны, то именно частота остается неизменной.</p>

Свет переходит из оптически более плотной среды с показателем преломления  $n_1$  в оптически менее плотную с показателем преломления  $n_2 < n_1$ . При угле падения лучей  $i > \arcsin \frac{n_2}{n_1}$  происходит ...

**Ответ:** полное отражение света от прозрачной среды

**Варианты ответа:**

1. полная поляризация отраженного луча
2. полное отражение света от прозрачной среды
3. поворот плоскости поляризации
4. интерференционное гашение отраженного луча

На пути одного из интерферирующих лучей помещается стеклянная пластинка толщиной 12 мкм. Свет падает на пластинку нормально. Показатель преломления стекла  $n = 1,5$ ; длина волны света  $\lambda = 750$  нм. Число полос, на которое сместится интерференционная картина, равно ... **Ответ:** 8

**Варианты ответа:**

1.  $k = 24$
2.  $k = 48$
3.  $k = 16$
4.  $k = 8$

Два гармонических осциллятора, колеблющихся с одинаковыми частотой и начальной фазой, находятся на расстоянии  $l = 2\lambda$  друг от друга, где  $\lambda$  – длина волны излучения. Расстояние  $L$  до точки наблюдения  $M$  много больше расстояния  $l$  между осцилляторами. Амплитуда результирующей волны максимальна при угле излучения  $\varphi$ , равном ...

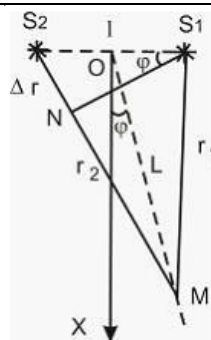


Угол падения лучей  $i_{np} = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$  является предельным углом полного внутреннего отражения. Все лучи, для которых угол падения  $i > i_{np}$ , испытывают полное внутреннее отражение на границе раздела сред, несмотря на то, что вторая среда является оптически прозрачной. Закон преломления показывает, что для заданных углов падения лучей и соотношения показателей преломления сред преломленные лучи не существуют. Следовательно, на границе раздела сред не происходит разделения падающего луча на преломленный и отраженный.

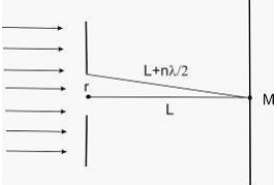
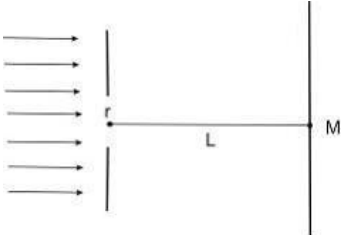
Обозначим толщину пластинки  $l$ . Дополнительная разность хода лучей при внесении пластинки  $\Delta = l(n - 1)$ . Число полос, на которое сместится интерференционная картина, должно равняться числу длин волн, на которое увеличилась разность хода лучей:  $\Delta = k\lambda$ .

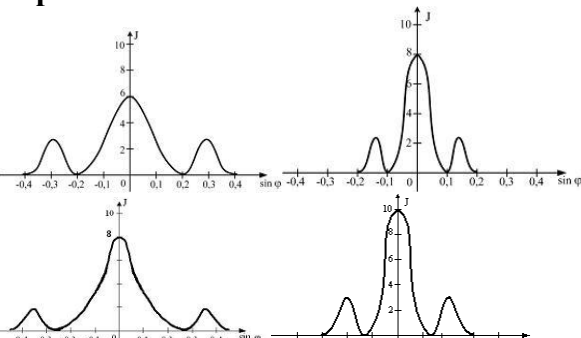
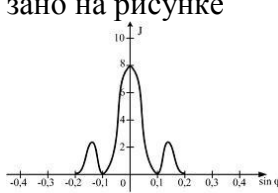
$$k = \frac{l(n-1)}{\lambda} = \frac{12 \cdot 10^{-6} (1,5 - 1)}{750 \cdot 10^{-9}} = 8$$

Получаем



Необходимым условием интерференции волн является их когерентность. Осцилляторы в условии данной задачи совершают гармонические колебания с одинаковой частотой и постоянной разностью фаз, излучаемые ими волны когерентны. Рассмотрим точку  $M$ , положение которой определяется углом  $\varphi$ . Обозначим через  $r_1, r_2$  расстояния от источников  $S_1$  и  $S_2$  до рассматриваемой точки  $M$ . Проведя перпендикуляр  $S_1N$ , найдем разность хода ( $MN \approx r_1$ ), то есть разность расстояний,

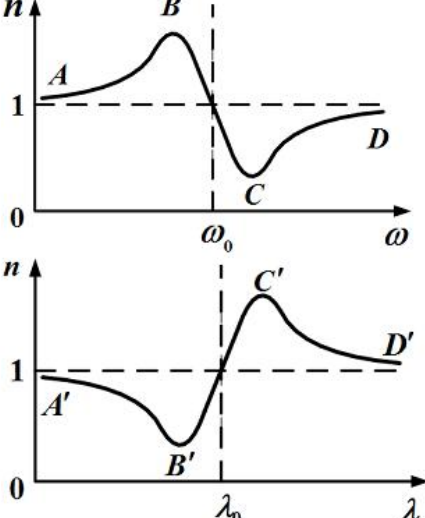
<p>○ 45°</p> <p>○ 30°</p> <p>○ 60°</p> <p>○ 10°</p>	<p>пройденных волнами, излученными источниками <math>S_1</math> и <math>S_2</math>, до точки М: <math>\Delta r = r_2 - r_1</math>. Из прямоугольного треугольника <math>S_1 S_2 N</math> найдем <math>\Delta r = l \sin \varphi</math>. Амплитуда результирующей волны максимальна, если разность хода равна целому числу длин волн. Следовательно, <math>l \sin \varphi = n\lambda</math>, где <math>n = 0, 1, 2, \dots</math>; <math>\lambda</math> – длина волны излучения; <math>\sin \varphi = \frac{n\lambda}{l} = \frac{n\lambda}{2\lambda} = \frac{n}{2}</math>. Амплитуда результирующей волны максимальна в направлениях излучения: <math>\varphi = 0^\circ (n = 0)</math>; <math>\varphi = 30^\circ (n = 1)</math>; <math>\varphi = 90^\circ (n = 2)</math>. Значение <math>n = 3</math> невозможно, так как должно выполняться соотношение <math>\sin \varphi \leq 1</math>. Из предложенных ответов верным будет <math>\varphi = 30^\circ</math>.</p>
<p>Установка для наблюдения колец Ньютона освещается монохроматическим светом с длиной волны <b>0,6 мкм</b>, падающим нормально. Толщина воздушного слоя между линзой (плосковыпуклой) и стеклянной пластинкой в том месте, где наблюдается четвертое темное кольцо в отраженном свете, равна...</p> <p><b>Ответ:</b> 1.2 мкм</p> <p><b>Варианты ответа:</b></p> <p>1. 1,35 мкм 2. 1,2 мкм 3. 1,05 мкм 4. 2,4 мкм</p>	<p>Обозначим искомую толщину воздушного слоя за <math>x</math>. Тогда разность хода интерферирующих лучей будет равна <math>\Delta = 2x + \frac{\lambda}{2}</math>, где дополнительная разность хода в полволны получается за счет разных условий отражения от верхней и нижней границы воздушной прослойки. Условие образования темного кольца <math>\Delta = \left(k + \frac{1}{2}\right)\lambda</math>, причем <math>k = 0</math> соответствует центральному темному пятну. Имеем <math>2x + \frac{\lambda}{2} = \left(4 + \frac{1}{2}\right)\lambda</math>. Отсюда находим <math>x = 2\lambda = 1,2 \text{ мкм}</math>.</p>
<p>На диафрагму с круглым отверстием радиусом 1 мм падает нормально параллельный пучок света длиной волны 0,5 мкм. На пути лучей, прошедших через отверстие, на расстоянии 1 м помещают экран. В центре экрана в точке М будет наблюдаться ...</p> <p><b>Ответ:</b> темное пятно, так как в отверстии укладываются 2 зоны Френеля</p>   <p><b>Варианты ответа:</b></p> <p>1. темное пятно, так как в отверстии укладываются 2 зоны Френеля</p> <p>2. светлое пятно, так как в отверстии укладываются 5 зон Френеля</p> <p>3. светлое пятно, так как в отверстии укладываются 3 зоны Френеля</p> <p>4. темное пятно, так как в отверстии уклады-</p>	<p>Определим, сколько зон Френеля укладывается в отверстие диафрагмы радиуса <math>r</math>. Расстояния от соседних зон Френеля до точки наблюдения М должны отличаться на <math>\frac{\lambda}{2}</math>. Следовательно, расстояние от точки М до крайней точки отверстия будет равно <math>L + n\frac{\lambda}{2}</math>, где <math>L</math> – расстояние от диафрагмы до экрана, <math>n</math> – число зон Френеля, <math>\lambda</math> – длина волны света. Воспользуемся теоремой Пифагора: <math>r^2 = \left(L + n\frac{\lambda}{2}\right)^2 - L^2 = Ln\lambda + n^2\frac{\lambda^2}{4}</math>. Учтем, что <math>\lambda^2</math> – величина второго порядка малости по сравнению с <math>L</math>, и пренебрежем слагаемым <math>n^2\frac{\lambda^2}{4}</math>. Тогда <math>n = \frac{r^2}{\lambda L} = \frac{10^{-6}}{0,5 \cdot 10^{-6} \cdot 1} = 2</math>. В отверстии диафрагмы</p>

<p>ваются 4 зоны Френеля</p>	<p>укладываются 2 зоны Френеля, четное число; следовательно, в центре экрана будет наблюдаться темное пятно.</p>
<p>В опыте с интерферометром Майкельсона для смещения интерференционной картины на 500 полос потребовалось переместить зеркало на расстояние 0,161 мм. Длина волны падающего света в нанометрах равна ...</p> <p><b>Ответ:</b> 644нм</p>	<p>В интерферометре Майкельсона луч проходит плечо интерферометра дважды: до отражения от зеркала и после. Если <math>l</math> – смещение зеркала, то дополнительная разность хода лучей <math>\Delta = 2l = k\lambda</math>, где <math>k</math> – число полос, на которое сместилась интерференционная картина. Отсюда находим <math>\lambda = \frac{2l}{k}</math> или <math>\lambda = 644 \text{ нм}</math>.</p>
<p>На дифракционную решетку нормально падает пучок света от разрядной трубки, наполненной гелием. Красная линия гелия (<math>\lambda = 670 \text{ нм}</math>) спектра второго порядка накладывается на линию в спектре третьего порядка с длиной волны...</p> <p><b>Ответ:</b> 447нм</p> <p><b>Варианты ответа:</b> 1. 1005нм 2. 223нм 3. 335нм 4. 447нм</p>	<p>Используем формулу дифракционной решетки, определяющую положение главных максимумов: <math>d \sin \varphi = k\lambda</math>. Наложение линий означает совпадение условий наблюдения соответствующих максимумов: <math>k_2\lambda_2 = k_3\lambda_3</math>. Отсюда находим <math>\lambda_3 = \frac{k_2\lambda_2}{k_3} = \frac{2 \cdot 670}{3} = 447 \text{ нм}</math>. Следовательно, красная линия спектра второго порядка накладывается на синюю линию спектра третьего порядка.</p>
<p>Одна и та же дифракционная решетка освещается различными монохроматическими излучениями с разными интенсивностями (<math>J</math> – интенсивность света, <math>\varphi</math> – угол дифракции). Зависимость интенсивности от синуса угла дифракции, соответствующая случаю освещения светом с наибольшей частотой показана на рисунке ...</p> <p><b>Варианты ответа:</b></p> 	<p>Угол дифракции зависит не от интенсивности света, а от длины волны и частоты. Из условия главных максимумов для дифракционной решетки (<math>d \sin \varphi = \pm k\lambda</math>, где <math>d</math> – период, <math>\varphi</math> – угол дифракции, <math>k</math> – порядок максимума, <math>\lambda</math> – длина световой волны) следует, чем больше длина волны, тем больше <math>\sin \varphi</math> или угол дифракции <math>\varphi</math>. Частота световой волны равна <math>\nu = \frac{c}{\lambda}</math>, где <math>c</math> – скорость света. Следовательно, наибольшей частоте соответствует наименьший угол дифракции, что показано на рисунке</p> 

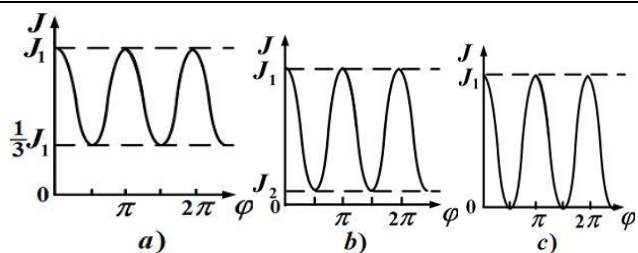
## 22. Поляризация и дисперсия.

Естественный свет с интенсивностью  $I_0$  падает на вход устройства, состоящего из двух скрещенных поляроидов. Между поляроидами поместили третий поляроид, ось которого составляет с осью первого угол  $\alpha$ . Отношение интенсивности света, прошедшего через систему, к интенсивности падающего на систему равно ...

Первый поляроид пропускает только половину интенсивности падающего естественного света. Свет становится поляризованным с интенсивностью  $I_1 = \frac{1}{2} I_0$ . После прохождения следующего поляроида получим по закону Малюса интенсивность  $I_2 = I_1 \cos^2 \alpha = \frac{1}{2} I_0 \cos^2 \alpha$ . После прохождения светом третьего поляроида получим интенсив-

<p>Ответ: <math>\frac{1}{8} \sin^2 2\alpha</math></p> <p>Варианты ответа:</p> <p>1. <math>\frac{1}{4}</math> 2. <math>\frac{1}{16} \sin^2 2\alpha</math> 3. 0 4. <math>\frac{1}{8} \sin^2 2\alpha</math></p>	<p><math>I_3 = I_2 \cos^2\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) = I_2 \sin^2 \alpha = \frac{1}{8} I_0 \sin^2 2\alpha</math></p> <p>Отноше- ние интенсивности прошедшего света к интензив- ности падающего равно: <math>\frac{I_3}{I_0} = \frac{1}{8} \sin^2 2\alpha</math>.</p>
<p>При падении света из воздуха на диэлектрик отраженный луч полностью поляризован. Угол преломления равен <math>30^\circ</math>. Тогда показатель преломления диэлектрика равен ...</p> <p>Ответ <math>n=1.73</math></p> <p>Варианты ответа:</p> <p>1. 1,5 2. 1,33 3. 1,41 4. 1,73</p>	<p>При полной поляризации отраженный луч перпендикулярен преломленному. Это означает, что сумма углов падения и преломления равна <math>90^\circ</math>. В соответствии с законом Брюстера <math>\text{tgi}_B = n</math>, где <math>i_B</math> - угол Брюстера, т.е. угол падения луча, при котором отраженный луч полностью поляризован. Находим <math>i_B = 90^\circ - 30^\circ = 60^\circ</math>; <math>\text{tg} 60^\circ = \sqrt{3} = 1,73</math>.</p> <p>Ответ: <math>n = 1,73</math>.</p>
<p>Графики дисперсионных кривых зависимостей показателя преломления среды от частоты <math>\omega</math> и длины волны <math>\lambda</math> света имеют вид, представленный на рисунках:</p>  <p>Участки кривых <math>AB</math> и <math>C'D'</math> соответствуют дисперсии ...</p> <p>Ответ: нормальная дисперсия</p> <p><input type="radio"/> <math>AB</math> - аномальной, <math>C'D'</math> - аномальной</p> <p><input type="radio"/> <math>AB</math> - аномальной, <math>C'D'</math> - нормальной</p> <p><input type="radio"/> <math>AB</math> - нормальной, <math>C'D'</math> - аномальной</p> <p><input type="radio"/> <math>AB</math> - нормальной, <math>C'D'</math> - нормальной</p>	<p>Дисперсию света в среде называют нормальной, если с ростом частоты <math>\omega</math> абсолютный показатель преломления <math>n</math> среды также возрастает (<math>\frac{dn}{d\omega} &gt; 0</math>) или если с ростом длины волны <math>\lambda</math> абсолютный показатель преломления <math>n</math> уменьшается (<math>\frac{dn}{d\lambda} &lt; 0</math>). Наоборот, если <math>\frac{dn}{d\omega} &lt; 0</math> и соответственно <math>\frac{dn}{d\lambda} &gt; 0</math>, то дисперсию света в среде называют аномальной. На участках <math>AB</math> и <math>C'D'</math> дисперсионных кривых показатель преломления <math>n</math> возрастает (<math>\frac{dn}{d\omega} &gt; 0</math>) с ростом частоты <math>\omega</math> и уменьшается (<math>\frac{dn}{d\lambda} &lt; 0</math>) с ростом длины волны <math>\lambda</math>. Следовательно, оба участка <math>AB</math> и <math>C'D'</math> дисперсионных кривых соответствуют нормальной дисперсии.</p>
<p>На рисунке представлены графики зависимости интенсивности <math>J</math> света, прошедшего через поляризатор, от угла поворота <math>\varphi</math> поляризатора для трех разных световых пучков.</p>	<p>Свет, в котором вектор напряженности <math>\vec{E}</math> электрического поля колеблется только в одной проходящей через луч плоскости, называется плоскополяризованным (линейно поляризованным). Частично поляризованный свет – это смесь естественного света с всевозможными равновероятными ориентациями вектора <math>\vec{E}</math> и линейно поляризованного света. Степенью поляризации называется ве-</p>





Для данных графиков верным соотношением степеней поляризации падающих на поляризатор световых волн всех трех пучков будет ...

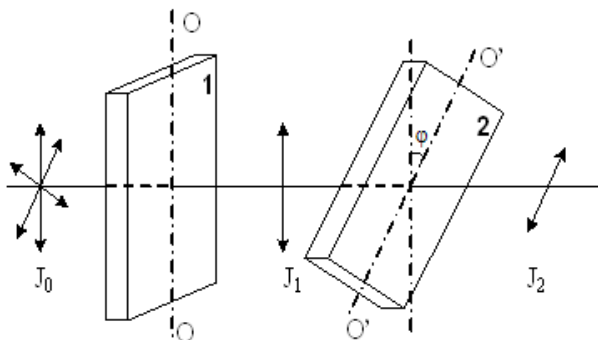
Ответ:  $P_a < P_b < P_c$

Варианты ответа:

1.  $P_a < P_b < P_c$
2.  $P_a = P_b < P_c$
3.  $P_a > P_b > P_c$
4.  $P_a < P_b = P_c$

личина  $P = \frac{J_{\max} - J_{\min}}{J_{\max} + J_{\min}}$ , где  $J_{\max}$  и  $J_{\min}$  – соответственно максимальная и минимальная интенсивности поляризованного света, пропускаемого поляризатором. Для естественного света  $J_{\max} = J_{\min}$  и  $P = 0$ , для частично поляризованного  $J_{\max} > J_{\min}$  и  $0 < P < 1$ , для линейно поляризованного света  $J_{\min} = 0$  и  $P = 1$ .

На пути естественного света помещены две пластинки турмалина. После прохождения пластинки 1 свет полностью поляризован. Если  $J_1$  и  $J_2$  – интенсивности света, прошедшего пластинки 1 и 2 соответственно, и угол между направлениями оптических осей  $OO$  и  $O'O'$   $\varphi = 60^\circ$ , то  $J_1$  и  $J_2$  связаны соотношением ...



Ответ:  $I_2 = I_1/4$

Интенсивность  $J_2$  света, прошедшего через вторую пластинку турмалина (анализатор), меняется в зависимости от угла  $\varphi$  между направлениями  $OO$  и  $O'O'$  оптических осей пластин турмалина по закону Малюса:  $J_2 = J_1 \cos^2 \varphi$ , здесь  $J_1$  – интенсивность плоскополяризованного света, прошедшего через первую пластинку 1 (поляризатор),  $J_1$  и  $J_2$  связаны соотношением:

$$J_2 = J_1 \cos^2 \varphi = J_1 \cos^2 60^\circ = J_1 (1/2)^2 = J_1 (1/4) = J_1 / 4$$

Варианты ответа:

- $J_2 = \frac{J_1}{2}$
- $J_2 = \frac{J_1}{4}$
- $J_2 = \frac{3}{4} J_1$
- $J_2 = J_1$

### 23. Тепловое излучение. Фотоэффект.

При температуре окружающей среды  $t_0 = 17^\circ C$  тело излучает в 81 раз больше энергии, чем поглощает. Температура тела в градусах Цельсия равна ... Ответ:  $597C$

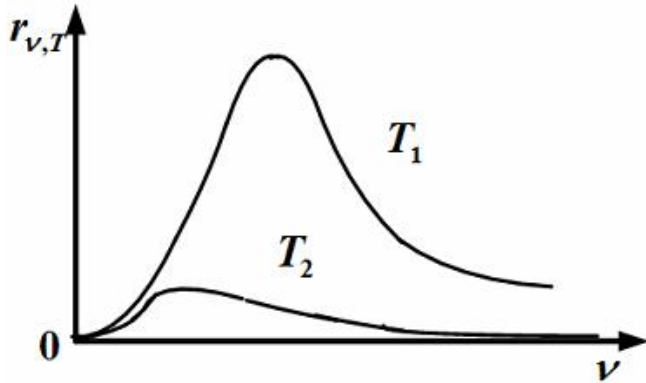
Пусть температура тела равна  $T$ , температура окружающей среды –  $T_0 = t_0 + 273 = 290 K$ . По закону Стефана – Больцмана энергия, излучаемая за единицу времени, пропорциональна  $T^4$ , а поглощаемая – пропорциональна  $T_0^4$ . Это справедливо не только для абсолютно черного тела, но и для серого, у которого поглощательная способность одинакова для всех длин волн. Получаем уравнение  $\left(\frac{T}{T_0}\right)^4 = 81$ . Отсюда находим  $T = 3T_0 = 870 K$ , или  $t = 597^\circ C$ .



<p>Электромагнитная теория света и теорема классической физики о равномерном распределении энергии системы по степеням свободы, будучи применены к тепловому равновесному излучению, приводят к...</p> <p><b>Ответ:</b> ультрафиолетовой катастрофе</p> <p><b>Варианты ответа:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) ультрафиолетовой катастрофе</li> <li>2) тепловой смерти Вселенной</li> <li>3) гипотезе квантов</li> <li>4) формуле Планка, представляющей распределение энергии в спектре излучения абсолютно черного тела</li> </ol>	<p>По теореме классической физики о равномерном распределении энергии системы по степеням свободы средняя энергия, приходящаяся на одну степень свободы, пропорциональна <math>kT</math>, где <math>k</math> – постоянная Больцмана, <math>T</math> – абсолютная температура. Электромагнитная теория света позволяет подсчитать число степеней свободы, приходящихся на единицу объема области, занятой равновесным монохроматическим тепловым излучением. Поскольку это число степеней свободы пропорционально третьей степени частоты и не зависит от температуры, спектральная плотность энергии равновесного теплового излучения должна возрастать при увеличении частоты. Этот результат П. Эренфест образно назвал ультрафиолетовой катастрофой.</p>
<p>Числовое значение постоянной Стефана - Больцмана теоретически можно определить с помощью...</p> <p><b>Ответ:</b> формулы Планка</p> <p><b>Варианты ответа</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. закона Кирхгофа</li> <li>2. формулы Планка</li> <li>3. закона смещения Вина</li> <li>4. закона Стефана – Больцмана</li> </ol>	<p>Формула Планка показывает распределение энергии в спектре излучения абсолютно черного тела и дает, таким образом, исчерпывающее описание равновесного теплового излучения. Из формулы Планка, интегрируя по всем длинам волн или частотам, можно получить энергетическую светимость абсолютно черного тела, т.е. закон Стефана - Больцмана, и выражение постоянной Стефана - Больцмана через универсальные физические константы:</p> $\sigma = \frac{\pi^2 k^4}{60c^2 \hbar^3} = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{Вт}{м^2 K^4},$ <p>где <math>k</math> - постоянная Больцмана, <math>c</math> – скорость света, <math>\hbar</math>- постоянная Планка.</p>
<p>Интенсивность монохроматического света, падающего на катод фотоэлемента, увеличилась в два раза. В результате этого ...</p> <p><b>Ответ:</b> фототок насыщения увеличился в два раза.</p> <p><b>Варианты ответа:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов увеличилась в два раза</li> <li>2.фототок насыщения увеличился в два раза</li> <li>3.задерживающая разность потенциалов уменьшилась в два раза</li> <li>4.температура фотоэлемента увеличилась в два раза</li> </ol>	<p>Увеличение интенсивности падающего излучения, с точки зрения квантовой теории света, означает увеличение числа фотонов, падающих на катод в единицу времени. Это приводит к увеличению числа выбиваемых в единицу времени электронов и увеличению фототока насыщения. Так как частота излучения не изменилась, то энергия фотонов осталась прежней. Поэтому максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов и задерживающая разность потенциалов не изменились.</p>
<p>При нагревании абсолютно черного тела длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости, изменилась от 750 нм до 500 нм. Энергетическая светимость тела при этом...</p> <p><b>Ответ:</b> увеличилась в 5 раз</p>	<p>Согласно закону смещения Вина <math>\lambda_1 T_1 = \lambda_2 T_2</math></p> <p>Подставляя <math>\lambda_1 = 750 \text{ нм}</math> и <math>\lambda_2 = 500 \text{ нм}</math>, получим отношение конечной и начальной температур черного тела <math>\frac{T_2}{T_1} = \frac{750}{500} = 1,5</math>. По закону Стефана - Больцмана энергетическая светимость абсолютно черного тела <math>R_3 = \sigma T^4</math></p> $\frac{(R_3)_2}{(R_3)_1} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^4 = (1,5)^4 = 5$

<p>Металлический шарик в вакууме облучают неограниченно долго светом с длиной волны, меньшей красной границы фотоэффекта для этого металла: <math>\lambda &lt; \lambda_{кр}</math>. Фотоэффект на поверхности шарика продолжается до тех пор, пока...</p> <p><b>Ответ:</b> потенциал шарика не сравнивается с задерживающим потенциалом</p> <p><b>Варианты ответа:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. концентрация свободных электронов внутри металлического шарика не сравнивается с концентрацией электронов в электронном облаке у поверхности шарика</li> <li>2. все свободные электроны не вылетят из шарика</li> <li>3. шарик не нагреется до температуры плавления и не расплавится</li> <li>4. потенциал шарика не сравнивается с задерживающим потенциалом</li> </ol>	<p>Каждый вырванный из металла электрон уносит с собой отрицательный электрический заряд. Поэтому шарик заряжается положительно и тем сильнее, чем больше электронов его покинуло. Вследствие электростатического притяжения разноименных зарядов, вырванные электроны будут двигаться в области пространства вблизи шарика, образуя так называемое электронное облако. Когда потенциал шарика достигнет величины задерживающего потенциала, фотоэффект прекратится (точнее, установится динамическое равновесие: некоторые электроны из электронного облака будут возвращаться в шарик, а вместо них такое же число свободных электронов будет покидать шарик).</p>
<p>Металл облучают светом с длиной волны <math>\lambda</math>. Красная граница фотоэффекта для этого металла равна <math>\lambda_{кр}</math>, работа выхода – <math>A</math>. Если <math>\lambda = \frac{1}{2}\lambda_{кр}</math>, то максимальная кинетическая энергия <math>\epsilon_i</math> вырванных электронов ...</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. <math>\epsilon_m = A</math></li> <li>2. <math>\epsilon_m = \frac{1}{2}A</math></li> <li>3. 0</li> <li>4. <math>\epsilon_m = \frac{3}{2}A</math></li> </ol>	<p>Запишем уравнение Эйнштейна для фотоэффекта, выраженное через длину волны <math>\lambda</math></p> $\frac{hc}{\lambda} = A + \epsilon_m$ <p>Красная граница фотоэффекта определяется условием <math>\frac{hc}{\lambda_{кр}} = A</math>. Если <math>\lambda = \frac{1}{2}\lambda_{кр}</math>, то из уравнения Эйнштейна получим <math>2\frac{hc}{\lambda_{кр}} = A + \epsilon_m</math> и <math>\epsilon_m = A</math>.</p>
<p>При нагревании абсолютно черного тела длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости, изменилась от <math>750 \text{ нм}</math> до <math>500 \text{ нм}</math>. Энергетическая светимость тела при этом...</p> <p><b>Ответ:</b> увеличилась в 5 раз</p> <p><b>Варианты ответа:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. уменьшилась в 5 раз</li> <li>2. увеличилась в 7,6 раза</li> <li>3. увеличилась в 5 раз</li> <li>4. увеличилась в 1,5 раза</li> </ol>	<p>Согласно закону смещения Вина <math>\lambda_1 T_1 = \lambda_2 T_2</math>. Подставляя <math>\lambda_1 = 750 \text{ нм}</math> и <math>\lambda_2 = 500 \text{ нм}</math>, получим отношение конечной и начальной температур черного тела <math>\frac{T_2}{T_1} = \frac{750}{500} = 1,5</math>. По закону Стефана – Больцмана энергетическая светимость абсолютно черного тела <math>R_s = \sigma T^4</math>. Находим отношение энергетических светимостей <math>\frac{(R_s)_2}{(R_s)_1} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^4 = (1,5)^4 = 5</math>.</p>

Если при уменьшении температуры площадь фигуры под графиком спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела  $r_{\nu,T}$  уменьшилась в 16 раз, то отношение температур  $T_1/T_2$  равно ...



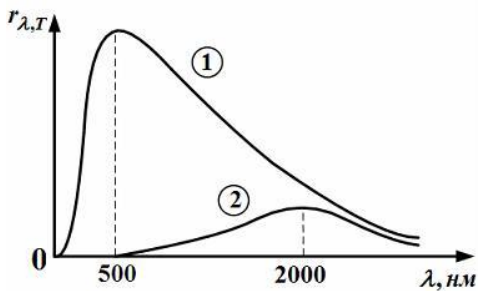
Ответ: 2

Зная спектральную плотность энергетической светимости, можно вычислить интегральную энергетическую светимость  $R_T = \int_0^{\infty} r_{\nu,T} d\nu$ , которая

графически определяется площадью фигуры, ограниченной кривой зависимости  $r_{\nu,T}$  от частоты при данной температуре и осью абсцисс. Согласно закону Стефана – Больцмана, энергетическая светимость абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени его термодинамической температуры, следовательно, и площадь фигуры под графиком зависимости  $r_{\nu,T}$  от частоты пропорциональна четвертой степени температуры:  $S \sim T^4$ . Тогда при уменьшении площади в 16 раз отношение температур  $T_1/T_2 = \sqrt[4]{S_1/S_2} = \sqrt[4]{16} = 2$ .

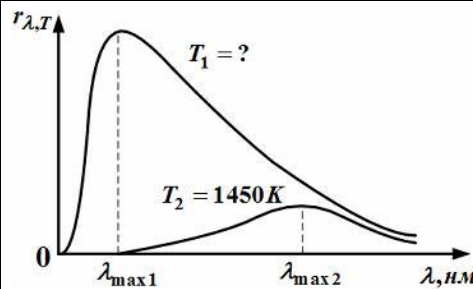
На рисунке показаны кривые зависимости спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела от длины волны при разных температурах. Если кривая 2 соответствует спектру излучения абсолютно черного тела при температуре 1450 К, то кривая 1 соответствует температуре (в К) ...

Ответ: 5800К



Варианты ответа:

1. 5800К    2. 1025К    3. 2900К    4. 725К



Воспользуемся законом смещения Вина для излучения абсолютно черного тела  $\lambda_{\max} T = b$ , где  $\lambda_{\max}$  – длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела  $r_{\lambda,T}$ ,  $T$  – его термодинамическая температура,  $b$  – постоянная Вина:

$$\left. \begin{array}{l} \lambda_{\max 1} T_1 = b \\ \lambda_{\max 2} T_2 = b \end{array} \right\} \Rightarrow \lambda_{\max 1} T_1 = \lambda_{\max 2} T_2 \Rightarrow T_1 = \frac{\lambda_{\max 2} T_2}{\lambda_{\max 1}}$$

Так как, согласно графику,  $\lambda_{\max 1} = 500 \text{ нм}$ ,  $\lambda_{\max 2} = 2000 \text{ нм}$ ,  $T_2 = 1450 \text{ К}$  то  $T_1 = \frac{2000 \text{ нм} \cdot 1450 \text{ К}}{500 \text{ нм}} = 5800 \text{ К}$ .

Установите соответствие между приведенными характеристиками теплового равновесного излучения и характером их зависимости от частоты или температуры.

1. Спектральная плотность энергии в спектре

1. Последовательная классическая теория для спектральной плотности энергии излучения абсолютно черного тела приводит к формуле Рэлея – Джинса. При этом используется теорема классической физики о равномерном распределении энергии системы по степеням свободы и электромагнитная

излучения абсолютно черного тела, согласно формуле Рэля – Джинса, с увеличением частоты...

2. Спектральная плотность энергии в спектре излучения абсолютно черного тела, согласно формуле Планка, с увеличением частоты ...

3. Энергетическая светимость абсолютно черного тела с увеличением температуры ...

4. Длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергии в спектре излучения абсолютно черного тела, с увеличением температуры ...

4. убывает пропорционально  $T^{-1}$   
2. стремится к нулю

возрастает пропорционально  $T^2$   
1. неограниченно возрастает

3. возрастает пропорционально  $T^4$

**Ответ:** 1-1, 2-2, 3-3, 4-4

теория света, которая позволяет подсчитать число степеней свободы, приходящихся на единицу объема области, занятой равновесным монохроматическим тепловым излучением. Поскольку, согласно классической теории, это число степеней свободы пропорционально третьей степени частоты и не зависит от температуры, спектральная плотность энергии равновесного теплового излучения должна неограниченно возрастать при увеличении частоты. Этот результат П. Эренфест образно назвал ультрафиолетовой катастрофой.

2. Формула Планка дает распределение энергии в спектре излучения абсолютно черного тела, согласующееся с экспериментом на всех частотах, т.е. во всем спектре, и дает, таким образом, исчерпывающее описание равновесного теплового излучения. Согласно формуле Планка, с ростом частоты убывает число степеней свободы, приходящихся на единицу объема, и ультрафиолетовая катастрофа не возникает.

3. Согласно закону Стефана – Больцмана, энергетическая светимость абсолютно черного тела с увеличением температуры возрастает пропорционально  $T^4$ .

Из формулы Планка, интегрируя по всем длинам волн или частотам, можно получить энергетическую светимость абсолютно черного тела, т.е. закон Стефана – Больцмана, и выражение постоянной Стефана – Больцмана через универсальные физические константы.

4. Согласно закону смещения Вина, длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергии в спектре излучения абсолютно черного тела, с увеличением температуры убывает пропорционально  $T^{-1}$ .

При освещении металла излучением с длиной волны  $\lambda_0$  фототок прекращается при задерживающем напряжении  $U_3$ . Если изменить длину волны излучения в 1,5 раза, то задерживающее напряжение увеличится в 2 раза. Работа выхода электронов из металла  $A = 4 \text{ эВ}$ .  
Задерживающее напряжение  $U_3$  в вольтах для излучения с длиной волны  $\lambda_0$  равно...

**Ответ:**  $U_3 = 4 \text{ В}$

Запишем уравнение Эйнштейна для фотоэффекта под действием излучения с длиной волны  $\lambda_0$ :

$$\frac{hc}{\lambda_0} = A + eU_3$$

. Изменение длины волны в данном случае означает уменьшение, так как задерживающее напряжение увеличилось. Имеем

$$\frac{3hc}{2\lambda_0} = A + 2eU_3$$

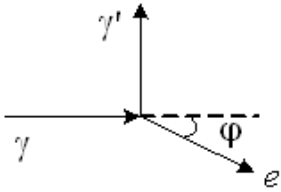
. Подставляя  $\frac{hc}{\lambda_0}$  из первого уравнения, получим  $\frac{3}{2}(A + eU_3) = A + 2eU_3$ .

Отсюда находим  $eU_3 = A$  и  $U_3 = 4 \text{ В}$ .

## 24. Эффект Комптона. Световое давление.

Эффект Комптона наблюдается на почти свободных электронах. На рисунке показаны направления падающего фотона ( $\gamma$ ), рассеянного фотона ( $\gamma'$ ) и электрона отдачи ( $e$ ). Угол рассеяния  $90^\circ$ , направление движения электрона отдачи составляет с направлением падающего фотона угол  $\varphi = 30^\circ$ . При рассеянии импульс фотона

**Ответ:** уменьшится в  $\sqrt{3}$  раз



**Варианты ответа:**

- уменьшится в  $\sqrt{3}$  раз     увеличится в  $\sqrt{3}$  раз  
 не изменится     уменьшится в 2 раза

Один и тот же световой поток падает нормально на зеркальную и абсолютно черную поверхность. Отношение давления света на первую и вторую поверхности равно ...

**Ответ:** в 2 раза

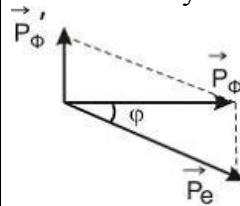
**Варианты ответа:**

1.  $1/2$ , 2.  $1/4$ , 3. 4, 4. 2

Свет, падая перпендикулярно, на абсолютно черную поверхность оказывает такое же давление, как и на зеркальную. Угол падения (отсчитывая от нормали) на зеркальную поверхность составляет...

**Ответ:**  $60^\circ$

При рассеянии фотона на свободном электроне выполняются законы сохранения импульса и энергии. По закону сохранения импульса,  $\vec{P}_\phi = \vec{P}'_\phi + \vec{P}_e$ , где  $\vec{P}_\phi$  – импульс фотона до рассеяния,  $\vec{P}'_\phi$  – импульс фотона после рассеяния,  $\vec{P}_e$  – импульс электрона отдачи. Из рисунка видно, что  $\frac{P'_\phi}{P_\phi} = \text{tg} \varphi = \text{tg} 30^\circ = \frac{1}{\sqrt{3}}$ . Следовательно, после рассеяния импульс фотона уменьшится в  $\sqrt{3}$  раз.

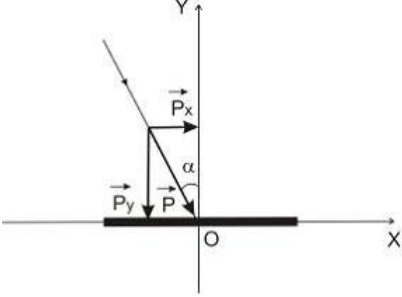


При взаимодействии фотонов с зеркальной поверхностью они полностью отражаются. Каждый отраженный фотон передает поверхности удвоенный импульс (при отражении импульс фотона меняет направление на противоположное). Абсолютно черной поверхностью фотоны полностью поглощаются, и каждый поглощенный фотон передает поверхности свой импульс. Следовательно, давление на зеркальную поверхность в 2 раза больше, чем на абсолютно черную поверхность:

$$p = \frac{nh\nu}{c}(1 + \rho)$$
 где  $p$  – давление света;  $n$  – число фотонов, падающих за единицу времени на единицу площади поверхности;  $h$  – постоянная Планка,  $\nu$  – частота света,  $c$  – скорость света,  $\rho$  – коэффициент отражения (для зеркальной поверхности  $\rho = 1$ , для абсолютно черной поверхности  $\rho = 0$ ).

Давление на зеркальную поверхность в 2 раза больше, чем на абсолютно черную поверхность. От зеркальной поверхности фотоны отражаются. Каждый отраженный фотон передает поверхности удвоенную величину нормальной составляющей импульса (импульс фотона при отражении меняет



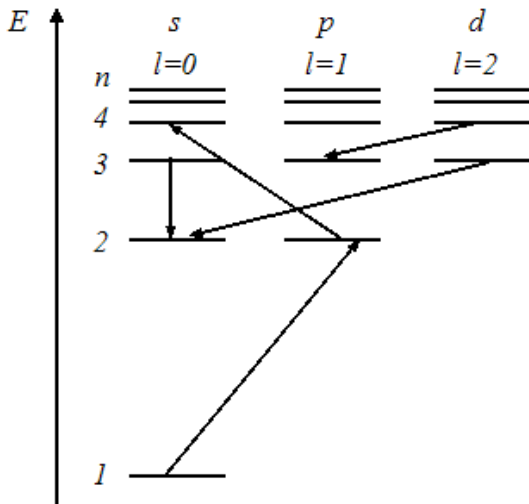
<p><b>Варианты ответа:</b> 1. <math>60^{\circ}</math> 2. <math>45^{\circ}</math> 3. <math>30^{\circ}</math> 4. <math>0^{\circ}</math></p>	<p>направление на противоположное). Абсолютно черная поверхность фотоны поглощает, и каждый поглощенный фотон передает поверхности величину нормальной составляющей своего импульса. Луч света падает на зеркальную поверхность под углом <math>\alpha</math>. Импульс фотона направлен вдоль луча. На поверхность будет оказывать давление только нормальная составляющая импульса <math>P_y = P \cos \alpha</math>. Тогда для давления можно записать следующее равенство: <math>P = 2P \cos \alpha</math>, откуда <math>\cos \alpha = \frac{1}{2}</math>, следовательно, <math>\alpha = 60^{\circ}</math>. Если свет падает на зеркальную поверхность под углом <math>60^{\circ}</math>, то он оказывает такое же давление, как и на черную, падая перпендикулярно.</p> 
<p>Давление <math>P</math> света на поверхность при энергетической освещенности <math>E_e = 120 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}</math> составило <math>0,5 \text{ мкПа}</math>. Коэффициент <math>\rho</math> отражения этой поверхности в процентах равен ... <b>Ответ</b> 25%</p>	<p>Применяем формулу для давления света <math>p = \frac{E}{c}(1 + \rho)</math>, где <math>E</math> – энергетическая освещенность поверхности, т.е. энергия, падающая на единицу площади поверхности за единицу времени. Отсюда коэффициент отражения <math>\rho = \frac{pc}{E} - 1</math>. Вычисляя, находим <math>\rho = 0,25 = 25\%</math>.</p>
<p>В явлении Комптона энергия падающего фотона распределяется поровну между рассеянным фотоном и электроном отдачи. Угол рассеяния равен <math>\frac{\pi}{2}</math>. Комптоновская длина волны электрона: <math>\Lambda = \frac{h}{mc} = 2,4 \cdot 10^{-12} \text{ м}</math>. Длина волны рассеянного фотона в фемтометрах (<math>\cdot 10^{-15}</math>) равна ...</p>	<p>Увеличение длины волны рассеянного фотона (комpton-эффект) равно <math>\Delta\lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos\varphi)</math>. Так как угол рассеяния <math>\varphi = \frac{\pi}{2}</math>, то <math>\cos\varphi = 0</math> и <math>\Delta\lambda = \frac{h}{mc}</math>. Энергия фотона, выраженная через длину волны, равна <math>\varepsilon = \frac{hc}{\lambda}</math>. По условию энергия рассеянного фотона равна половине энергии падающего фотона, <math>\frac{h}{c\lambda'} = \frac{1}{2} \frac{h}{c\lambda}</math>. Следовательно, длина волны увеличилась в два раза, <math>\lambda' = 2\lambda</math>. Соответственно, увеличение длины волны <math>\Delta\lambda = \lambda = \frac{h}{mc}</math> и <math>\lambda' = 2\Lambda = 4,8 \cdot 10^{-12} \text{ м} = 4800 \cdot 10^{-15} \text{ м} = 4800 \text{ фм}</math>.</p>



## 6. Квантовая физика и физика атома

### 25. Спектр атома водорода. Правило отбора.

На рисунке изображена схема энергетических уровней атома водорода. Показаны состояния с различными значениями орбитального квантового числа



Запрещенными правилом отбора для орбитального квантового числа являются переходы

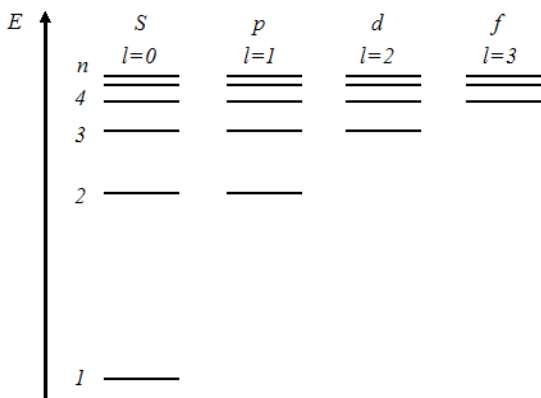
Ответ:  $3s \rightarrow 2s$  и  $3d \rightarrow 2s$

Варианты ответа:

1.  $3s \rightarrow 2s$
2.  $1s \rightarrow 2p$
3.  $3d \rightarrow 2s$
4.  $2p \rightarrow 4s$
5.  $4d \rightarrow 3p$

Для орбитального квантового числа  $l$  имеется правило отбора  $\Delta l = \pm 1$ . Это означает, что возможны только такие переходы, в которых  $l$  изменяется на единицу. Поэтому запрещены переходы:  $3s \rightarrow 2s$ , где орбитальное квантовое число  $l$  не изменяется, и  $3d \rightarrow 2s$ , где  $\Delta l = 2$ .

На рисунке изображена схема энергетических уровней атома водорода. Показаны состояния с различными значениями орбитального квантового числа.

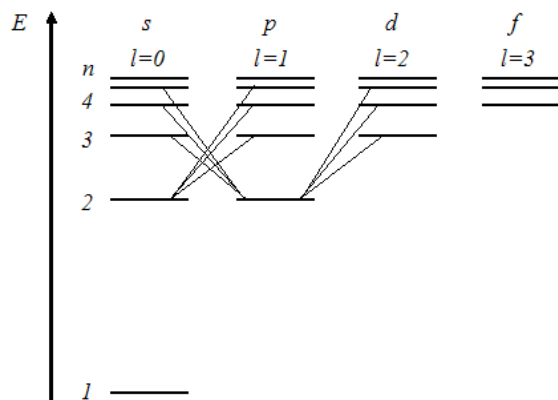


Серию Бальмера дают переходы ...

Ответ:  $ns \rightarrow 2p$ ,  $nd \rightarrow 2p$ ,  $np \rightarrow 2s$ ,

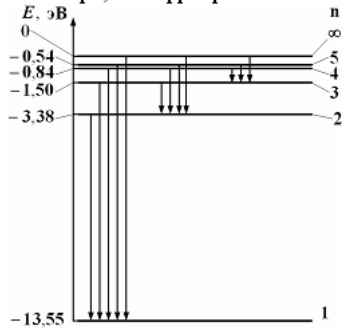
Варианты ответа:

Серию Бальмера дают переходы на второй энергетической уровень ( $n=2$ ). Учитывая правило отбора по орбитальному квантовому числу  $\Delta l = \pm 1$ , переходы, приводящие к возникновению серии Бальмера, можно представить в виде  $ns \rightarrow 2p$ ,  $nd \rightarrow 2p$ ,  $np \rightarrow 2s$ , где  $n = 3, 4, 5, \dots$



- $nd \rightarrow 2p$  ( $n = 3, 4, 5, \dots$ )
- $nf \rightarrow 3d$  ( $n = 4, 5, 6, \dots$ )
- $np \rightarrow 2s$  ( $n = 3, 4, 5, \dots$ )
- $np \rightarrow 1s$  ( $n = 2, 3, 4, \dots$ )
- $ns \rightarrow 2p$  ( $n = 3, 4, 5, \dots$ )
- $np \rightarrow 3d$  ( $n = 4, 5, 6, \dots$ )

На рисунке дана схема энергетических уровней атома водорода, а также условно изображены переходы электрона с одного уровня на другой, сопровождающиеся излучением кванта энергии. В ультрафиолетовой области спектра эти переходы дают серию Лаймана, в видимой области – серию Бальмера, в инфракрасной области – серию Пашена и т.д.



Отношение минимальной частоты серии Лаймана к максимальной частоте серии Бальмера равно ...

**Ответ: 3**

**Варианты ответа:**

- 7,2
- 3
- 5,4
- 4

Единая формула, объединяющая все серийные формулы спектра водорода, называемая обобщенной формулой

Бальмера, имеет вид:  $\nu = R \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ . Здесь  $R$  –

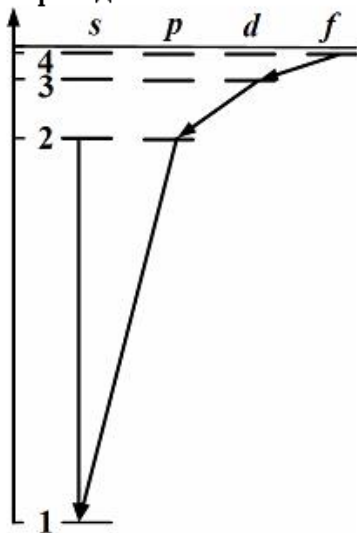
постоянная Ридберга;  $m$  и  $n$  – целые числа, причем для данной серии  $n = m + 1, m + 2, m + 3$  и т.д. Для серии Лаймана  $m = 1$ , для серии Бальмера  $m = 2$ , для серии Пашена  $m = 3$  и т.д. Поэтому минимальная частота серии

Лаймана  $\nu_{1\min} = R \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right) = \frac{3}{4} R$ , а максимальная частота

серии Бальмера  $\nu_{2\max} = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{\infty} \right) = \frac{1}{4} R$ . Тогда искомое

отношение равно:  $\frac{\nu_{1\min}}{\nu_{2\max}} = \left( \frac{3}{4} R \right) : \left( \frac{1}{4} R \right) = 3$ .

Закон сохранения момента импульса накладывает ограничения на возможные переходы электрона в атоме с одного уровня на другой (правило отбора). В энергетическом спектре атома водорода (рис.) **запрещенным** переходом является ...



Для орбитального квантового числа  $l$  имеется правило отбора  $\Delta l = \pm 1$ . Это означает, что возможны только такие переходы, в которых  $l$  изменяется на единицу. Поэтому **запрещенным** переходом является  $2s \rightarrow 1s$ .

- $2s \rightarrow 1s$
- $2p \rightarrow 1s$
- $3d \rightarrow 2p$
- $4f \rightarrow 3d$

<u>26. Дуализм свойств микрочастиц. Соотношение неопределенностей Гейзенберга.</u>	
<p>Если позитрон, протон, нейтрон и <math>\alpha</math> – частица имеют одинаковую длину волны де Бройля, то наибольшей скоростью обладает...</p> <p><b>Ответ:</b> позитрон</p> <p><b>Варианты ответа:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. протон</li> <li>2. позитрон</li> <li>3. <math>\alpha</math> – частица</li> <li>4. нейтрон</li> </ol>	<p>Длина волны де Бройля определяется формулой <math>\lambda = \frac{h}{mv}</math>, где <math>h</math> – постоянная Планка, <math>m</math> и <math>v</math> – масса и скорость частицы. Отсюда скорость частицы равна <math>v = \frac{h}{\lambda m}</math>. По условию задания <math>\lambda_e = \lambda_n = \lambda_p = \lambda_\alpha</math>, следовательно, <math>v \sim \frac{1}{m}</math>. Тогда наибольшей скоростью обладает частица с наименьшей массой. Известно, что <math>m_e &lt; m_p \approx m_n &lt; m_\alpha</math>. Следовательно, наибольшей скоростью обладает позитрон.</p>
<p>Согласно положению о корпускулярно-волновом дуализме свойств вещества электроны можно рассматривать как частицы и описывать их движение законами классической механики, не учитывая волновые свойства, в ...</p> <p><b>Ответ:</b> электронно-лучевой трубке</p> <p><b>Варианты ответа:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. электронном микроскопе</li> <li>2. металле</li> <li>3. электронно-лучевой трубке</li> <li>4. атоме</li> </ol>	<p>Двойственная корпускулярно-волновая природа частиц вещества ставит вопрос о границах применимости понятий классической физики для объектов микромира. В классической механике всякая частица движется по определенной траектории, так что в любой момент времени точно фиксированы ее координата и импульс. Микрочастицы не имеют траектории, и неправомерно говорить об одновременных точных значениях координаты и импульса. Это выражается соотношением неопределенностей для координаты и импульса <math>\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h</math>, где <math>\Delta x</math> неопределенность координаты, <math>\Delta p_x</math> неопределенность проекции импульса. <math>h</math> постоянная Планка. Для электронов неопределенность координаты крайне мала по сравнению с размерами пятна на экране трубки. Следовательно, можно говорить о движении электронов по определенной траектории, описывать их движение законами классической механики.</p>
<p>Отношение длин волн де Бройля электрона и протона <math>\frac{\lambda_e}{\lambda_p}</math>, имеющих одинаковую скорость, составляет величину порядка ...</p> <p><b>Ответ:</b> 1000</p> <p><b>Варианты ответа:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. <math>10^3</math></li> <li>2. 1</li> <li>3. 10</li> <li>4. <math>10^{-3}</math></li> </ol>	<p>Длина волны де Бройля <math>\lambda = \frac{h}{m\vartheta}</math>, где <math>h</math> – постоянная Планка, <math>m</math> – масса частицы, <math>\vartheta</math> – скорость частицы. Следовательно,</p> $\frac{\lambda_e}{\lambda_p} = \frac{h}{m_e \vartheta} \cdot \frac{m_p \vartheta}{h} = \frac{m_p}{m_e} = 1840 \sim 10^3$
<p>Длина волны де Бройля увеличится в два раза, если кинетическая энергия микрочастицы...</p> <p><b>Ответ:</b> уменьшится в 4 раза</p>	<p>Длина волны де Бройля <math>\lambda = \frac{h}{m\vartheta}</math>, где <math>h</math> – постоянная Планка, <math>m</math> – масса частицы, <math>\vartheta</math> – скорость частицы. Кинетическая энергия частицы определяется по формуле <math>E_k = \frac{m\vartheta^2}{2}</math>. Следовательно, длина волны де Бройля увеличится в два раза при уменьшении скорости частицы в 2 раза, а кинетической энергии – в 4 раза.</p>

Положение бусинки массы  $m_b = 1$  г и положение электрона ( $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \approx 10^{-30}$  кг) определены с одинаковой погрешностью  $\Delta x = 10^{-7}$  м. Если квантовомеханическая неопределенность x-компоненты скорости бусинки составляет примерно  $\Delta v_{xb} \sim 10^{-24}$  м/с, то для электрона неопределенность  $\Delta v_{xe}$  равна ...

Ответ: 1000 м/с

Из соотношения неопределенностей Гейзенберга для координаты и соответствующей компоненты импульса  $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar$  следует, что  $\Delta x \cdot m \cdot \Delta v_x \geq \hbar$ , где  $\Delta x$  – неопределенность координаты,  $\Delta p_x$  – неопределенность x-компоненты импульса,  $\Delta v_x$  – неопределенность x-компоненты скорости,  $m$  – масса частицы,  $\hbar$  – постоянная Планка, деленная на  $2\pi$ . Неопределенность x-компоненты скорости можно найти из соотношения  $\Delta v_x \sim \frac{\hbar}{m \cdot \Delta x}$ . Следовательно, для бусинки и электрона можно записать следующее выражение:  $\frac{\Delta v_{xe}}{\Delta v_{xb}} = \frac{m_b}{m_e}$ , откуда

$$\Delta v_{xe} = \Delta v_{xb} \frac{m_b}{m_e} \sim 10^{-24} \frac{10^{-3}}{10^{-30}} = 10^3 \text{ м/с}.$$

В опыте Дэвиссона и Джермера исследовалась дифракция прошедших ускоряющее напряжение электронов на монокристалле никеля. Если ускоряющее напряжение уменьшить в 2 раза, то длина волны де Бройля электрона ...

Ответ: увеличится в  $\sqrt{2}$  раз

Варианты ответа:

1. увеличится в 2 раза
2. увеличится в  $\sqrt{2}$  раз
3. уменьшится в  $\sqrt{2}$  раз
4. уменьшится в 2 раза

Длина волны де Бройля  $\lambda = \frac{h}{p}$ , где  $h$  – постоянная Планка,  $p$  – импульс частицы. При прохождении электроном ускоряющего напряжения увеличивается его кинетическая энергия. Если считать начальную скорость электрона равной нулю, то  $\frac{mv^2}{2} = eU$ , где  $m$  и  $e$  – масса и заряд электрона,  $U$  – ускоряющее напряжение,  $v$  – приобретенная электроном скорость. После преобразования получим  $\frac{p^2}{2m} = eU$ , или  $p = \sqrt{2meU}$ . Следовательно,  $\lambda = \frac{h}{\sqrt{2meU}}$ , и при уменьшении ускоряющего напряжения  $U$  в 2 раза длина волны де Бройля электрона  $\lambda$  увеличится в  $\sqrt{2}$  раз.

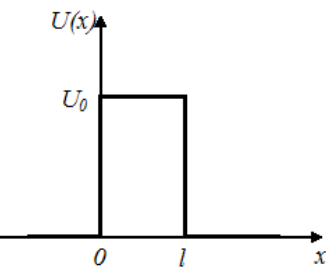
<p>Отношение длин волн де Бройля для дейтрона и <math>\alpha</math>-частицы, прошедших одинаковую ускоряющую разность потенциалов, равно ...</p> <p>Ответ: 2</p>	<p>Дейтрон – ядро тяжелого водорода (дейтерия). Длина волны де Бройля определяется по формуле <math>\lambda = \frac{h}{p}</math>, где <math>p</math> – импульс частицы. Импульс частицы можно выразить через ее кинетическую энергию: <math>E_k = \frac{p^2}{2m} \Rightarrow p = \sqrt{2mE_k}</math>. По теореме о кинетической энергии, согласно которой работа сил электрического поля идет на приращение кинетической энергии, <math>qU_{\text{уск}} = \Delta E_k</math>. Отсюда можно найти <math>E_k</math> в предположении о том, что первоначально частица покоилась <math>qU_{\text{уск}} = E_k</math>. Окончательное выражение для длины волны де Бройля через ускоряющую разность потенциалов имеет вид: <math>\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2mE_k}} = \frac{h}{\sqrt{2mqU_{\text{уск}}}}</math>. Учитывая, что <math>m_d \cong 2m_p</math>, <math>m_\alpha \cong 4m_p</math>, <math>q_d = e</math>, <math>q_\alpha = 2e</math>, получим: <math>\frac{\lambda_d}{\lambda_\alpha} = \sqrt{\frac{m_\alpha q_\alpha}{m_d q_d}} = \sqrt{4} = 2</math>.</p>
<p>Среднее время жизни <math>\pi^0</math>-мезона равно <math>1,9 \cdot 10^{-16}</math> с. Энергетическая разрешающая способность прибора, с помощью которого можно зарегистрировать <math>\pi^0</math>-мезон, должна быть не менее ... (ответ выразите в эВ и округлите до целых; используйте значение постоянной Планка <math>\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34}</math> Дж·с).</p> <p>Ответ: 3эВ</p>	<p>Соотношение неопределенностей для энергии и времени имеет вид <math>\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar</math>, где <math>\Delta E</math> – неопределенность в задании энергии (ширина энергетического уровня), <math>\Delta t</math> – время жизни частицы в данном состоянии. Для того чтобы частицу можно было зарегистрировать с помощью измерительного прибора, его энергетическая разрешающая способность должна быть не менее <math>\Delta E</math>. Из соотношения неопределенностей</p> $\Delta E \geq \frac{\hbar}{\Delta t} = \frac{1,05 \cdot 10^{-34}}{1,9 \cdot 10^{-16}} = 0,55 \cdot 10^{-18} \text{ Дж} = 3,4 \text{ эВ} \approx 3 \text{ эВ}$
<p><b>27. Уравнение Шредингера (общие свойства).</b></p>	
<p>С помощью волновой функции, являющейся решением уравнения Шредингера, можно определить ...</p> <p>Варианты ответа:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> вероятность того, что частица находится в определенной области пространства</li> <li><input type="checkbox"/> траекторию частицы</li> <li><input type="checkbox"/> средние значения физических величин, характеризующих частицу</li> <li><input type="checkbox"/> местонахождение частицы</li> </ul>	<p>Величина <math> \psi ^2</math> имеет смысл плотности вероятности (вероятности, отнесенной к единице объема), т.е. определяет вероятность пребывания частицы в соответствующем месте пространства. Тогда вероятность <math>W</math> обнаружения частицы в определенной области пространства равна <math>W = \int_V  \psi ^2 dV</math>.</p>



<p>Установите соответствие между квантовомеханическими задачами и уравнениями Шредингера для них.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Электрон в одномерном потенциальном ящике с бесконечно высокими стенками</li> <li>2. Линейный гармонический осциллятор</li> <li>3. Электрон в атоме водорода</li> </ol> <p><b>Ответ:</b> 1-3, 2-1, 3-4</p> <p><b>Варианты ответа:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. <math>\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{2m}{\hbar^2} \left( E - \frac{kx^2}{2} \right) \psi = 0</math></li> <li>2. <math>\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U_0) \psi = 0</math></li> <li>3. <math>\nabla^2 \psi + \frac{2m}{\hbar^2} E \psi = 0</math></li> <li>4. <math>\nabla^2 \psi + \frac{2m}{\hbar^2} \left( E + \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \right) \psi = 0</math></li> <li>5. <math>\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{2m}{\hbar^2} E \psi = 0</math></li> </ol>	<p>Общий вид стационарного уравнения Шредингера:</p> $\nabla^2 \psi + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U) \psi = 0$ <p>Здесь <math>U = U(x, y, z)</math> – потенциальная энергия частицы, <math>\nabla^2 = \Delta</math> – оператор Лапласа. Для одномерного случая <math>\nabla^2 = \frac{d^2}{dx^2}</math>.</p> <p>Выражение для потенциальной энергии линейного гармонического осциллятора, т.е. частицы, совершающей одномерное движение под действием квазиупругой силы <math>F_x = -kx</math>, имеет вид <math>U = \frac{kx^2}{2}</math>. Значение потенциальной энергии электрона в потенциальном ящике с бесконечно высокими стенками <math>U = 0</math>. Электрон в водородоподобном атоме обладает потенциальной энергией <math>U = -\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r}</math>. Для атома водорода <math>Z = 1</math>. Таким образом, для электрона в одномерном потенциальном ящике уравнение Шредингера имеет следующий вид:</p> $\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{2m}{\hbar^2} E \psi = 0$ <p>для линейного гармонического осциллятора –</p> $\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{2m}{\hbar^2} \left( E - \frac{kx^2}{2} \right) \psi = 0$ <p>для электрона в атоме водорода –</p> $\nabla^2 \psi + \frac{2m}{\hbar^2} \left( E + \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \right) \psi = 0$
<p>Стационарное уравнение Шредингера в общем случае имеет вид: <math>\nabla^2 \psi + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U) \psi = 0</math>, где <math>U</math> – потенциальная энергия микрочастицы. Электрону в атоме водорода соответствует уравнение ...</p> <p><input type="radio"/> <math>\nabla^2 \psi + \frac{2m}{\hbar^2} E \psi = 0</math>      <input type="radio"/> <math>\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{2m}{\hbar^2} E \psi = 0</math></p> <p><input type="radio"/> <math>\nabla^2 \psi + \frac{2m}{\hbar^2} \left( E + \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \right) \psi = 0</math>      <input type="radio"/> <math>\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{2m}{\hbar^2} \left( E - \frac{m\omega^2 x^2}{2} \right) \psi = 0</math></p>	<p>Потенциальная энергия взаимодействия электрона с ядром водородоподобном атоме определяется выражением <math>U = -\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r}</math>, где <math>Ze</math> – заряд ядра, <math>e</math> – заряд электрона, <math>r</math> – радиус орбиты электрона. Для атома водорода <math>Z = 1</math>. Следовательно, уравнение <math>\nabla^2 \psi + \frac{2m}{\hbar^2} \left( E + \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \right) \psi = 0</math> соответствует электрону в атоме водорода.</p>
<p>Стационарное уравнение Шредингера имеет вид <math>\frac{d^2 \psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2} E \psi = 0</math>. Это уравнение записано для ...</p> <p><b>Ответ:</b> частицы в одномерном потенциальном ящике с бесконечно высокими стенками</p> <p><b>Варианты ответа:</b></p>	<p>Стационарное уравнение Шредингера в общем случае имеет вид <math>\nabla^2 \psi + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U) \psi = 0</math>, где <math>U</math> – потенциальная энергия микрочастицы. Для одномерного случая <math>\nabla^2 = \frac{d^2}{dx^2}</math>. Кроме того, внутри потенциального ящика <math>U = 0</math>, а вне ящика частица</p>

<p>1. частицы в трехмерном потенциальном ящике с бесконечно высокими стенками</p> <p>2. частицы в одномерном потенциальном ящике с бесконечно высокими стенками</p> <p>3. электрона в атоме водорода</p> <p>4. линейного гармонического осциллятора</p>	<p>находиться не может, т.к. его стенки бесконечно высоки. Поэтому данное уравнение Шредингера записано для частицы в одномерном ящике с бесконечно высокими стенками</p>
<p>Из предложенных утверждений:</p> <p>1) уравнение стационарно;</p> <p>2) уравнение соответствует трехмерному случаю;</p> <p>3) уравнение характеризует состояние частицы в бесконечно глубоком прямоугольном потенциальном ящике;</p> <p>4) уравнение характеризует движение частицы вдоль оси OX под действием квазиупругой силы, пропорциональной смещению частицы от положения равновесия,</p> <p>Выберите те, которые являются справедливыми для уравнения Шредингера</p> $\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{2m}{\hbar^2} \left( E - \frac{m\omega^2 x^2}{2} \right) \psi = 0$ <p>...</p> <p><b>Ответ:</b> уравнение стационарно; уравнение характеризует движение частицы вдоль оси OX под действием квазиупругой силы, пропорциональной смещению частицы от положения равновесия,</p>	<p>Уравнение стационарно, так как волновая функция <math>\psi</math> не зависит от времени (отсутствует производная по времени). Потенциальная энергия <math>U = \frac{m\omega^2 x^2}{2} = \frac{kx^2}{2}</math> соответствует гармоническому осциллятору, то есть движению частицы под действием квазиупругой силы. Следовательно, верными являются ответы 1 и 4.</p>

### 28. Уравнение Шредингера (конкретные ситуации).

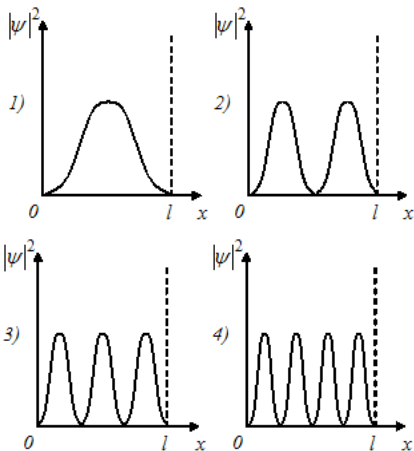
<p>Частица, движущаяся слева направо, встречает на своем пути потенциальный барьер высоты <math>U_0</math> и ширины <math>l</math></p>  <p>Согласно квантовой механике ...</p> <p><b>Ответ:</b> если энергия частицы меньше высоты барьера (<math>E &lt; U_0</math>), то есть отличная от нуля вероятность того, что частица проникнет сквозь барьер и окажется в области, где <math>x &gt; l</math></p> <p>2. если энергия частицы больше высоты барьера (<math>E &gt; U_0</math>), то есть отличная от нуля вероятность того, что частица отразится от барьера и</p>	<p>Поведение частицы по классическим и квантовомеханическим представлениям совершенно различается. По классическим представлениям:</p> <p>1) если энергия частицы больше высоты барьера (<math>E &gt; U_0</math>), частица беспрепятственно проходит над барьером (на участке <math>0 \leq x \leq l</math> лишь уменьшается скорость частицы, но затем при <math>x &gt; l</math> она снова принимает первоначальное значение);</p> <p>2) если же <math>E &lt; U_0</math>, то частица отражается от барьера и движется в обратном направлении; проникнуть сквозь барьер частица не может. Согласно квантовой механике:</p> <p>1) даже при <math>E &gt; U_0</math> есть отличная от нуля вероятность отражения частицы от барьера;</p> <p>2) при <math>E &lt; U_0</math> имеется отличная от нуля вероятность того, что частица проникнет «сквозь» барьер и окажется в области, где <math>x &gt; l</math>.</p>
---	--

будет двигаться в обратном направлении

**Варианты ответа:**

1. если энергия частицы меньше высоты барьера ( $E < U_0$ ), то есть отличная от нуля вероятность того, что частица проникнет сквозь барьер и окажется в области, где  $x > l$
2. если энергия частицы больше высоты барьера ( $E > U_0$ ), то есть отличная от нуля вероятность того, что частица отразится от барьера и будет двигаться в обратном направлении
3. если энергия частицы меньше высоты барьера ( $E < U_0$ ), то частица отразится от барьера и будет двигаться в обратном направлении; проникнуть сквозь барьер она не может
4. если энергия частицы больше высоты барьера ( $E > U_0$ ), частица беспрепятственно пройдет над барьером

На рисунках схематически представлены графики распределения плотности вероятности обнаружения электрона по ширине одномерного потенциального ящика с бесконечно высокими стенками для состояний с различными значениями главного квантового числа  $n$ .



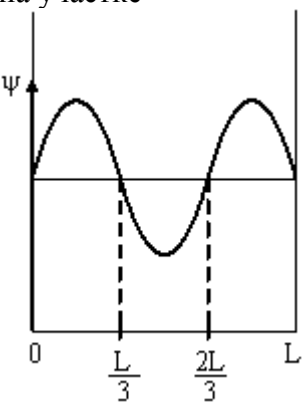
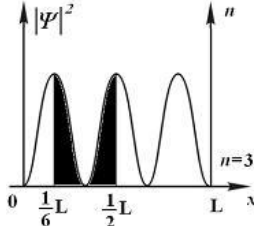
Отношение вероятности обнаружить электрон на первом энергетическом уровне в левой половине ящика к вероятности обнаружить электрон на четвертом энергетическом уровне в интервале  $L/4-L/2$  равно ...

**Ответ:** 2

Частица находится в потенциальном ящике шириной  $L$  с бесконечно высокими стенками в определенном энергетическом состоянии  $E_n$  с квантовым числом  $n$ . Известно, что  $\frac{E_{n+1}}{E_{n-1}} = 4$ . В этом случае  $n$  равно ...

Вероятность обнаружить микрочастицу в интервале  $(a, b)$  для состояния, характеризуемого определенной  $\psi$ -функцией, равна  $W = \int |\psi(x)|^2 dx$ . Из графика зависимости  $|\psi(x)|^2$  эта вероятность находится как отношение площади под кривой зависимости  $|\psi(x)|^2$  в интервале  $(a, b)$  к площади под кривой во всем интервале существования  $|\psi|^2$ , т.е. в интервале  $(0, l)$ . При этом состояниям с различными значениями главного квантового числа  $n$  соответствуют разные кривые зависимости  $|\psi(x)|^2$ :  $n=1$  соответствует график под номером 1,  $n=2$  – график под номером 2 и т.д. Тогда  $\frac{W_1}{W_2} = \frac{1/2}{1/4} = 2$  легко видеть, что искомое отношение

Собственная энергия  $E_n$  микрочастицы в потенциальном ящике шириной  $L$  с бесконечно высокими стенками принимает лишь определенные дискретные значения, причем  $E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2} n^2 \sim n^2$ , где  $n$  – целое число, имеющее смысл номера

<p><b>Ответ</b> <math>n=3</math>  <b>Варианты ответа:</b> 4 3 5 2</p>	<p>уровня энергии. Тогда отношение значений энергии <math>\frac{E_{n+1}}{E_{n-1}} = \frac{(n+1)^2}{(n-1)^2}</math> и по условию <math>\frac{E_{n+1}}{E_{n-1}} = 4</math>. Следовательно, <math>\sqrt{\frac{(n+1)^2}{(n-1)^2}} = \frac{n+1}{n-1} = 2</math>. Отсюда квантовое число <math>n = 3</math>.</p>
<p>Собственные функции электрона в одномерном потенциальном ящике с бесконечно высокими стенками имеют вид <math>\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin \frac{n\pi}{L} x</math>, где <math>L</math> – ширина ящика, <math>n</math> – квантовое число, имеющее смысл номера энергетического уровня. Если <math>N</math> – число узлов <math>\psi_n</math>-функции на отрезке <math>0 \leq x \leq L</math> и <math>N_{n+1}/N_{n-1} = 1,5</math>, то <math>n</math> равно..  <b>Ответ:</b> <math>n=4</math>  <b>Варианты ответа:</b> 1. <math>n=6</math> 2. <math>n=2</math> 3. <math>n=4</math> 4. <math>n=5</math></p>	<p>Число узлов <math>N</math>, т.е. число точек, в которых волновая функция на отрезке <math>0 \leq x \leq L</math> обращается в нуль, связано с номером <math>n</math> энергетического уровня соотношением <math>N_n = n + 1</math>. Тогда <math>\frac{N_{n+1}}{N_{n-1}} = \frac{(n+1)+1}{(n-1)+1} = \frac{n+2}{n}</math>, и по условию это отношение равно 1,5. Решая полученное уравнение относительно <math>n</math>, получаем, что <math>n = 4</math>.</p>
<p>Если <math>\psi_n(x)</math>-функция электрона в одномерном потенциальном ящике шириной <math>L</math> с бесконечно высокими стенками имеет вид, указанный на рисунке, то вероятность обнаружить электрон на участке <math>\frac{L}{6} \leq x \leq \frac{L}{2}</math> равна ...    <b>Ответ:</b> 1/3  <b>Варианты ответа:</b> 1. <math>\frac{5}{6}</math> 2. <math>\frac{2}{3}</math> 3. <math>\frac{1}{2}</math> 4. <math>\frac{1}{3}</math></p>	<p>Вероятность обнаружить микрочастицу в интервале <math>(a, b)</math> равна <math>W = \int_a^b  \psi_n(x) ^2 dx</math>. Используя геометрический смысл интеграла, эту вероятность можно найти как отношение площади под кривой зависимости <math> \psi_n(x) ^2</math> в интервале <math>(a, b)</math> к площади под кривой во всем интервале существования <math> \psi ^2</math>, т.е. в интервале <math>(0, L)</math>. Кривая зависимости <math> \psi_n(x) ^2</math> от <math>x</math> представлена на рисунке где вероятность обнаружить электрон на участке <math>\frac{L}{6} \leq x \leq \frac{L}{2}</math> соответствует доле «закрашенной» площади от всей площади под кривой (см. рис.).    т.е. <math>W = \frac{2}{6} = \frac{1}{3}</math>.</p>
<p>Собственные функции электрона в атоме водорода <math>\Psi_{nlm}(r, \vartheta, \varphi)</math> содержат три целочисленных параметра <math>n, l</math> и <math>m</math>. Параметр <math>n</math> называется главным квантовым числом, параметры <math>l</math> и <math>m</math> – орбитальным и магнитным квантовыми числами соответственно. Магнитное квантовое число <math>m</math> определяет ...  <b>Ответ:</b> проекцию орбитального момента импульса электрона на некоторое направление  <b>Варианты ответа:</b></p>	<p>Главное квантовое число <math>n</math> определяет энергию электрона в атоме водорода: <math>E_n = -\frac{m_e e^4}{8h^2 \epsilon_0^2} \cdot \frac{1}{n^2}</math>. Орбитальное <math>l</math> и магнитное <math>m</math> квантовые числа определяют модуль орбитального момента импульса <math>L</math> и его проекцию <math>L_z</math> на некоторое направление <math>z</math> по следующим формулам:  <math>L = \sqrt{l(l+1)}\hbar</math> и <math>L_z = m\hbar</math></p>

1. энергию электрона в атоме водорода 2. модуль собственного момента импульса электрона 3. модуль орбитального момента импульса электрона 4. проекцию орбитального момента импульса электрона на некоторое направление	
<b>7. Элементы ядерной физики и физики элементарных частиц.</b>	
<u>29. Ядро. Элементарные частицы</u>	
Примером $e^-$ -захвата может быть превращение бериллия ${}^7_4\text{Be}$ в ... <b>Ответ:</b> <input checked="" type="radio"/> ${}^7_3\text{Li}$ <b>Варианты ответа:</b> <input type="radio"/> ${}^{11}_6\text{C}$ <input type="radio"/> ${}^7_5\text{B}$ <input type="radio"/> ${}^6_4\text{Be}$ <input type="radio"/> ${}^7_3\text{Li}$	При $e^-$ -захвате ядро захватывает электрон из $K$ -оболочки атома: ${}^7_4\text{Be} + {}^0_{-1}e \longrightarrow {}^4_2\text{Y} + {}^0_0\nu$ По закону сохранения массового числа: $(7) + (0) = (A) + (0)$ . По закону сохранения зарядового числа: $(4) + (-1) = (Z) + (0)$ . Следовательно, массовое и зарядовое числа соответственно равны: $(A) = 7$ , $(Z) = 3$ . Значит в результате ядерной реакции образуется ${}^7_3\text{Li}$ .
К фундаментальным частицам относятся ... <b>Ответ:</b> кварки, фотоны, электроны <b>Варианты ответа:</b> 1. кварки 2. фотоны 3. электроны 4. нейтроны 5. протоны	Согласно современным представлениям, к истинно элементарным (фундаментальным) частицам относятся лептоны (к этому классу принадлежит электрон); кварки, из которых состоят адроны (к ним относятся протоны и нейтроны); переносчики фундаментальных взаимодействий (к ним относятся фотоны).
Установите соответствие между основными характеристиками и обладающими ими элементарными частицами. Первое значение – заряд в единицах заряда электрона, второе – масса в единицах массы электрона, третье – спин в единицах $\hbar$ . <b>Ответ:</b> 1-фотон, 2-нейтрино, 3-мюон, 4-протон 1. 0; 0; 1 2. 0; 0; $\frac{1}{2}$ 3. 1; 206,8; $\frac{1}{2}$ 4. 1; 1836,2; $\frac{1}{2}$ <input type="checkbox"/> фотон <input type="checkbox"/> нейтрон <input type="checkbox"/> нейтрино <input type="checkbox"/> мюон <input type="checkbox"/> протон	Не имеют заряда из предложенных частиц фотон, нейтрино и нейтрон. Масса покоя равна нулю у фотона и нейтрино (существование массы у нейтрино пока не доказано). Масса мюона составляет 206,8 масс электрона. Масса протона составляет 1836,2 масс электрона, а нейтрона – 1838,7 масс электрона. Из представленных частиц бозоном, т.е. частицей с целым спином в единицах $\hbar$ является только фотон. Остальные частицы имеют полуцелый спин, равный $\frac{1}{2}\hbar$ , и являются фермионами. Следовательно, первая частица – фотон, а далее нейтрино, мюон и протон.



В центральной части атома, занимая небольшой объем и обладая его основной массой, находится положительно заряженное ядро. **Неверным** является утверждение, что ...

- протоны, входящие в состав ядра, определяют его заряд
- масса ядра равна сумме масс образующих ядро нуклонов
- наиболее устойчивы ядра с четными числами протонов и нейтронов
- ядерные силы, удерживающие ядро, обладают зарядовой независимостью

масса ядра равна сумме масс

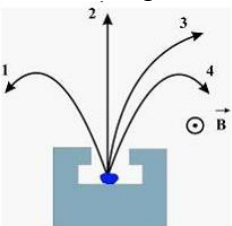
**Ответ:** образующих ядро нуклонов

Экспериментально установлено, что атомное ядро состоит из протонов и нейтронов (нуклонов), а его заряд равен суммарному положительному заряду протонов  $q_{\text{я}} = Ze$ , где  $Z$  – число протонов в ядре (зарядовое число),  $e$  – заряд протона. Ядерные силы, удерживающие ядро, обладают зарядовой независимостью – пары нуклонов одинаково притягиваются. Ядерные силы не являются центральными силами. Ядерное взаимодействие возникает в условиях обмена виртуальными мезонами между нуклонами. Чтобы разбить ядро на составляющие части – протоны и нейтроны – нужно совершить работу по преодолению ядерных сил, то есть сообщить ядру энергию, называемую энергией связи. По закону сохранения энергии такая же энергия связи выделится при соединении свободных нуклонов в ядро. Таким образом, при образовании ядра в результате выделения энергии должна уменьшиться и масса нуклонов. Масса ядра всегда меньше суммы масс нуклонов, из которых оно состоит:  $\Delta m = \sum m_{\text{нуклонов}} - m_{\text{ядра}}$  (дефект массы). Следовательно, масса ядра не является аддитивной величиной.

У разных атомов число протонов и нейтронов в ядре различно, среди них имеются стабильные ядра (с большой энергией связи). Наиболее устойчивы ядра с четными числами протонов и нейтронов ( ${}^4_2\text{He}$ ,  ${}^{16}_8\text{O}$  и др.). В одной из

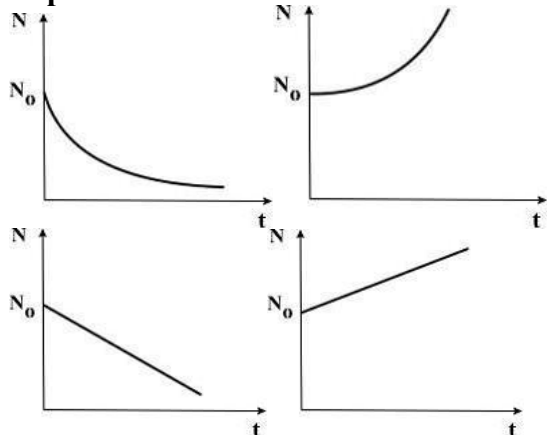
существующих моделей ядра – оболочечной – считается, что имеют место дискретные энергетические уровни, заполненные нуклонами с учетом принципа Паули. Уровни объединены в оболочки, которые, будучи полностью заполненными, образуют устойчивые структуры.

## 30. Ядерные реакции.

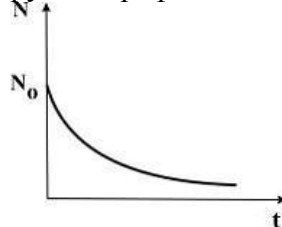
<p>Если <math>m_p, m_n, m_\alpha</math> – соответственно массы протона, нейтрона, ядра, а <math>m_H, m_e, m_a</math> – соответственно массы водорода, электрона и масса атома, то энергию связи ядра можно вычислять по формулам ...</p> <p><input type="checkbox"/> <math>E_{св} = [Zm_p + (A - Z)m_n - m_\alpha]c^2</math></p> <p><input type="checkbox"/> <math>E_{св} = [Zm_H + (A - Z)m_n - m_a]c^2</math></p> <p><input type="checkbox"/> <math>E_{св} = [Zm_n + (A - Z)m_p - m_\alpha]c^2</math></p> <p><input type="checkbox"/> <math>E_{св} = [Zm_H + (A - Z)m_n - m_a]c^2</math></p>	<p>Энергия, которую необходимо затратить, чтобы расщепить ядро на отдельные нуклоны, называется энергией связи ядра. Масса ядра меньше, чем сумма масс составляющих его нуклонов. Эту разницу называют дефектом массы ядра. Зная дефект массы, можно определить соответствующую энергию: <math>\Delta E = \Delta m c^2</math>. Следовательно, энергию связи ядра можно определить по формуле <math>E_{св} = [Zm_p + (A - Z)m_n - m_\alpha]c^2</math>, а также <math>E_{св} = [Zm_H + (A - Z)m_n - m_a]c^2</math>, где <math>Z</math> – зарядовое число, <math>A</math> – массовое число. В последней формуле в <math>Zm_H</math> и <math>m_a</math> входит масса электронов, но при вычитании она уничтожается.</p>
<p>Активностью данного радиоактивного вещества называется величина, равная ...</p> <p><b>Ответ:</b> число распадов за единицу времени</p> <p><b>Варианты ответа:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. времени, в течение которого число нераспавшихся ядер уменьшается вдвое</li> <li>2. вероятности распада ядер за одну секунду, т.е. доле ядер, распадающихся за единицу времени</li> <li>3. числу распадов за единицу времени</li> <li>4. величине, обратной постоянной радиоактивного распада</li> </ol>	<p>Активность радиоактивного вещества <math>A = \frac{dN}{dt}</math>, где <math>dN</math> – число распавшихся ядер за время <math>dt</math>, т.е. активность равна числу распадов за единицу времени.</p>
<p>Четыре вида радиоактивного излучения <math>\alpha-, \beta^\pm-, \gamma</math> – лучи отклоняются в магнитном поле, индукция которого направлена на нас (рис.). <math>\beta^-</math> – лучи отклоняются в направлении ...</p> <p><b>Ответ:</b> по траектории 1</p> 	<p><math>\beta^-</math> – излучение представляет собой поток быстрых электронов. Эти частицы имеют отрицательный заряд. На движущиеся заряженные частицы в магнитном поле действует сила Лоренца, которая искривляет траекторию, направлена к центру кривизны. Она зависит от скорости частицы и индукции магнитного поля. Направление силы Лоренца находят по правилу векторного произведения (правило левой руки); также следует учесть, что заряд частицы отрицательный. Таким образом, <math>\beta^-</math> – частицы движутся по траектории 1.</p>
<p>Через интервал времени, равный двум периодам полураспада, нераспавшихся радиоактивных атомов останется...</p> <p><b>Ответ:</b> 25%</p> <p><b>Варианты ответа:</b> 1. 75% 2. 50% 3. 33% 4. 25%</p>	<p>Периодом полураспада <math>T_{1/2}</math> называется промежуток времени, за который в среднем число нераспавшихся атомных ядер уменьшается вдвое. Если начальное число радиоактивных атомов принять за 100%, то согласно определению через интервал времени, равный одному периоду полураспада, останется 50% нераспавшихся атомных ядер, тогда еще через период полураспада останется 25% нераспавшихся атомных ядер.</p>

Согласно закону радиоактивного распада изменение числа нераспавшихся ядер  $N$  ( $N_0$  – начальное число) со временем  $t$  иллюстрируется графиком ...

**Варианты ответа:**



Согласно закону радиоактивного распада  $N = N_0 e^{-\lambda t}$ , где  $N_0$  – начальное число радиоактивных ядер,  $N$  – число нераспавшихся ядер к моменту времени  $t$ ,  $\lambda$  – постоянная распада. Число радиоактивных ядер со временем уменьшается по экспоненциальному закону, что иллюстрируется графиком



Чтобы торий  ${}^{232}_{90}\text{Th}$  превратился в стабильный изотоп свинца  ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ , должны произойти ...

**Ответ:** 6  $\alpha$ -распадов и 4  $\beta$ -распада

7  $\alpha$ -распадов и 3  $\beta$ -распада

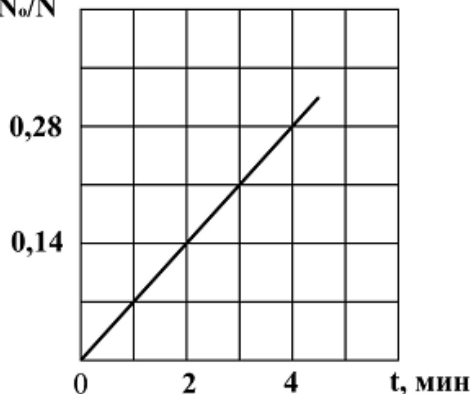
5  $\alpha$ -распадов и 5  $\beta$ -распадов

4  $\alpha$ -распада и 6  $\beta$ -распадов

6  $\alpha$ -распадов и 4  $\beta$ -распада

$\alpha$ -частица – это ядро атома гелия с массовым числом 4 и зарядовым числом +2.  $\beta$ -частица – это электрон с массовым числом 0 и зарядовым числом -1. При радиоактивном распаде выполняются законы сохранения массового числа и зарядового числа. В результате превращения тория в свинец массовое число изменяется на 24, следовательно, произойдет 6  $\alpha$ -распадов. Зарядовое число изменяется на 8. В результате 6  $\alpha$ -распадов зарядовое число уменьшится на 12. Чтобы зарядовое число увеличить на 4 единицы, должны произойти 4  $\beta$ -распада.

$\ln N_0/N$



На графике в полупологарифмическом масштабе показана зависимость изменения числа радиоактивных ядер изотопа  ${}^{27}_{12}\text{Mg}$  от времени.

Постоянная радиоактивного распада в  $\text{час}^{-1}$  равна ... (ответ округлите до целых)

**Ответ:** 4  $\text{час}^{-1}$

Число радиоактивных ядер изменяется со временем по закону  $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$ , где  $N_0$  – начальное число ядер,  $\lambda$  – постоянная радиоактивного распада. Прологарифмировав это выражение, получим  $\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t$ , или  $\ln \frac{N_0}{N} = \lambda t$ .

Следовательно,

$$\lambda = \frac{\ln \frac{N_0}{N}}{t} = 0,07 \text{ мин}^{-1} = 0,07 \cdot 60 = 4,2 \approx 4 \text{ час}^{-1}$$

В ядерной реакции  ${}^{14}_6\text{C} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + X$  буквой  $X$  обозначена частица ...

**Ответ:** нейтрон

**Варианты ответа:**

нейтрон  протон

электрон  позитрон

Из законов сохранения массового числа и зарядового числа следует, что заряд частицы равен нулю, а массовое число равно 1. Следовательно, буквой  $X$  обозначен нейтрон.

<p>Распад изотопа урана <math>{}_{92}^{238}\text{U} \rightarrow {}_{90}^{234}\text{Th} + ?</math> сопровождается испусканием ...</p> <p><b>Ответ:</b> <math>{}_{2}^{4}\text{He}</math></p> <p><b>Варианты ответа:</b></p> <p>1. <math>\beta^{+}</math> -частиц 2. <math>\beta^{-}</math> -частиц 3. <math>p</math> -протонов 4. <math>\alpha</math> -частиц</p>	<p>Используем закон сохранения массового и зарядового числа. Массовое число неизвестной частицы равно 4, а зарядовое равно 2. Следовательно, неизвестная частица – ядро гелия <math>{}_{2}^{4}\text{He}</math> (<math>\alpha</math>-частица).</p>
<p>При <math>\beta^{-}</math>-распаде калия <math>{}_{19}^{40}\text{K} \rightarrow Y + \beta^{-} + \bar{\nu}_e</math> в дочернем ядре <math>Y</math> ...</p> <p><b>Ответ:</b> число протонов увеличится на 1, число нейтронов уменьшится на 1</p> <p><b>Варианты ответа:</b></p> <p>1. число протонов уменьшится на 1, число нейтронов увеличится на 1 2. число протонов увеличится на 1, число нейтронов увеличится на 1 3. число протонов уменьшится на 1, число нейтронов уменьшится на 1 4. число протонов увеличится на 1, число нейтронов уменьшится на 1</p>	<p>При <math>\beta^{-}</math>-распаде в ядре радиоактивного элемента происходит превращение нейтрона в протон по схеме <math>{}_{0}^{1}n \rightarrow {}_{1}^{1}p + {}_{-1}^{0}e + {}_{0}^{0}\bar{\nu}_e</math>. Нижний индекс указывает зарядовое число, а верхний – массовое число. Ядро испускает электрон (<math>\beta^{-}</math>-частицу) и электронное антинейтрино. Следовательно, число протонов увеличится на 1, а число нейтронов уменьшится на 1.</p>
<p>Постоянная распада изотопа радия <math>{}_{88}^{219}\text{Ra}</math> равна <math>\lambda = 700\text{с}^{-1}</math>. Число радиоактивных ядер уменьшится в <math>e^2</math> (<math>e \sim 2,7</math>) раз за время ...</p> <p><b>Ответ:</b> 0,0028 с</p> <p><b>Варианты ответа:</b></p> <p>1. 0,01 с 2. 0,0028 с 3. 96 с 4. 0,0014 с</p>	<p>Закон радиоактивного распада – <math>N = N_0 e^{-\lambda t}</math>, где <math>N</math> – число радиоактивных ядер в момент времени <math>t</math>, <math>N_0</math> – число радиоактивных ядер в начальный момент времени, <math>\lambda</math> – постоянная распада.</p> <p><math>\frac{N}{N_0} = e^{-2} = e^{-\lambda t}</math></p> <p>Следовательно, <math>\lambda t = 2</math>, тогда <math>t = \frac{2}{\lambda} = \frac{2}{700} \approx 0,0028\text{ с}</math>.</p>
<p>Ядро полония <math>{}_{84}^{216}\text{Po}</math> образовалось после двух последовательных <math>\alpha</math>-распадов. Ядро исходного элемента содержало ...</p> <p><b>Ответ:</b> 88 протонов и 136 нейтронов.</p> <p><b>Варианты ответа:</b></p> <p>1. 92 протона, 128 нейтронов 2. 88 протонов, 224 нейтрона 3. 80 протонов, 128 нейтронов 4. 88 протонов, 136 нейтронов</p>	<p><math>\alpha</math>-частица – это ядро атома гелия, которое содержит 2 протона и 2 нейтрона, зарядовое число (число протонов) равно 2, массовое число (число протонов и нейтронов) равно 4. Символически это записывается в виде <math>{}_{2}^{4}\text{He}</math>. Ядро полония содержит 84 протона и <math>216 - 84 = 132</math> нейтрона. В результате двух последовательных <math>\alpha</math>-распадов число протонов исходного ядра уменьшилось на 4, число нейтронов также уменьшилось на 4. Следовательно, ядро исходного элемента содержало <math>34 + 4 = 88</math> протонов и <math>132 + 4 = 136</math> нейтронов.</p>
<p>Радиоактивное излучение, которое обладает очень большой проникающей способностью, относительно слабой ионизирующей способностью, не отклоняется электрическим и магнитным полями, не вызывает изменения заряда и массового числа распадающихся ядер,</p>	<p>Все перечисленные свойства относятся к <math>\gamma</math>-излучению, которое представляет собой коротковолновое электромагнитное излучение с длиной волны <math>\lambda &lt; 10^{-10}\text{ м}</math> и вследствие этого ярко выраженными корпускулярными свойствами, т.е. является потоком частиц – <math>\gamma</math>-квантов (фотонов). <math>\gamma</math>-кван-</p>

<p>является ...</p> <p><b>Ответ:</b> <math>\gamma</math> - излучение</p> <p><b>Варианты ответа:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li><math>\beta^-</math> -излучением</li> <li><math>\alpha</math> -излучением</li> <li><math>\gamma</math> -излучением</li> <li><math>\beta^+</math> -излучением</li> </ol>	<p>ты не имеют электрического заряда, масса покоя равна нулю, обладают большой энергией; этим объясняются все перечисленные свойства. Гамма-излучение – основная форма уменьшения энергии возбужденных продуктов радиоактивных превращений. Ядро, испытывающее радиоактивный распад, называется материнским; возникающее дочернее ядро, как правило, оказывается возбужденным, и его переход в основное состояние сопровождается испусканием <math>\gamma</math>-фотона.</p>
<p>Неизвестный радиоактивный химический элемент самопроизвольно распадается по схеме:</p> $X \rightarrow {}_{11}^{23}\text{Na} + e^+ + \nu_e .$ <p>Ядро этого элемента содержит ...</p> <p><b>Ответ:</b> 12 протонов и 11 нейтронов</p> <p><b>Варианты ответа:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>12 протонов и 12 нейтронов</li> <li>11 протонов и 11 нейтронов</li> <li>12 протонов и 11 нейтронов</li> <li>11 протонов и 12 нейтронов</li> </ol>	<p>В процессе этой ядерной реакции помимо изотопа углерода <math>{}_{11}^{23}\text{Na}</math> образуются позитрон <math>{}^0_1e^+</math> и нейтрино <math>{}^0_0\nu_e</math>. Нижний индекс указывает зарядовое число (число протонов или заряд частицы в относительных единицах относительно заряда электрона), а верхний – массовое число (число протонов и нейтронов). Используем закон сохранения массового и зарядового числа. Массовое число неизвестной частицы равно 23, а зарядовое – 12, это магний <math>{}_{12}^{23}\text{Mg}</math>. Следовательно, ядро неизвестной частицы содержит 12 протонов и <math>23 - 12 = 11</math> нейтронов.</p>

### 31. Законы сохранения в ядерных реакциях.

<p>Реакция <math>p+n \rightarrow e^+ + \nu_e</math> не может идти из-за нарушения закона сохранения...</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="radio"/> лептонного заряда</li> <li><input type="radio"/> электрического заряда</li> <li><input type="radio"/> спинового момента импульса</li> <li><input type="radio"/> барионного заряда</li> </ul> <p><b>Ответ:</b> барионного заряда</p>	<p>Во всех фундаментальных взаимодействиях выполняются законы сохранения: энергии, импульса, момента импульса (спина) и всех зарядов (электрического <math>Q</math>, барионного <math>B</math> и лептонного <math>L</math>). Эти законы сохранения не только ограничивают последствия различных взаимодействий, но определяют также все возможности этих последствий. Для выбора правильного ответа надо проверить, каким законом сохранения запрещена и какими разрешена приведенная реакция взаимопревращения элементарных частиц. Согласно закону сохранения барионного заряда <math>B</math>, для всех процессов с участием барионов и антибарионов суммарный барионный заряд сохраняется. Барионам (нуклонам <math>n, p</math> и гиперонам) приписывается барионный заряд <math>B = +1</math>. Антибарионам (антинуклонам <math>\bar{n}, \bar{p}</math> и антигиперонам) – барионный заряд <math>B = -1</math>, а всем остальным частицам – барионный заряд <math>B = 0</math>. Реакция <math>p+n \rightarrow e^+ + \nu_e</math> не может идти из-за нарушения закона сохранения барионного заряда <math>B</math>, т.к. <math>(+1) + (+1) \neq +(0) + (0)</math>.</p>
---	--



Законом сохранения электрического заряда **запрещены** реакции ...

**Ответ:**  $n + \nu_e \rightarrow p + e^+$ ,  $n \rightarrow p + e^+ + \nu_e$ .

**Варианты ответа:**

1.  $n + \nu_e \rightarrow p + e^+$
2.  $n \rightarrow p + e^+ + \nu_e$
3.  $\nu_\mu + n \rightarrow p + \mu^-$
4.  $\mu^- \rightarrow e^- + \tilde{\nu}_e + \nu_\mu$
5.  $n + \tilde{p} \rightarrow e^- + \tilde{\nu}_e$

При взаимодействии элементарных частиц и их превращении в другие возможны только такие процессы, в которых выполняются законы сохранения, в частности закон сохранения электрического заряда: суммарный электрический заряд частиц, вступающих в реакцию, равен суммарному электрическому заряду частиц, полученных в результате реакции. Электрический заряд  $Q$  в единицах элементарного заряда равен: у нейтрона ( $n$ )  $Q=0$ , протона ( $P$ )  $Q=+1$ , электрона ( $e^-$ )  $Q=-1$ , позитрона ( $e^+$ )  $Q=+1$ , электронного нейтрино и антинейтрино ( $\nu_e, \tilde{\nu}_e$ )  $Q=0$ , антипротона ( $\tilde{P}$ )  $Q=-1$ , мюонного нейтрино ( $\nu_\mu$ )  $Q=0$ , мюона ( $\mu^-$ )  $Q=-1$ . Закон сохранения электрического заряда не выполняется в реакциях  $n + \nu_e \rightarrow p + e^+$ ,  $n \rightarrow p + e^+ + \nu_e$ .

### 32. Фундаментальные взаимодействия.

Расположите четыре вида фундаментальных взаимодействий в порядке возрастания их сравнительной интенсивности.

- электромагнитное  
 гравитационное  
 сильное  
 слабое

**Ответ:** гравитационное, слабое, электромагнитное, сильное

Под отношением интенсивностей взаимодействий в первом приближении можно понимать отношение энергий этих взаимодействий для двух одинаковых частиц (например, протонов), разделенных достаточно малым расстоянием. Наиболее слабое – гравитационное взаимодействие, сравнительная интенсивность  $10^{-38}$ . Далее идет слабое взаимодействие с интенсивностью  $10^{-10}$ , электромагнитное –  $10^{-2}$  и сильное, сравнительная интенсивность которого принята за 1.

Установите соответствие между видами фундаментальных взаимодействий и радиусами их действия в метрах.

**Ответ:** электромагнитное- $\infty$ м, слабое  $10^{-18}$ м, сильное-  $10^{-15}$ м

1. Электромагнитное
2. Слабое
3. Сильное

- $10^{-10}$    $10^{-18}$   
  $10^{-15}$    $\infty$

Радиус действия электромагнитного взаимодействия равен бесконечности. Сильное взаимодействие проявляется на очень малых расстояниях порядка  $10^{-15}$  м, сравнимых с размерами ядер. Для слабого взаимодействия радиус действия  $10^{-18}$  м.

<p>Известно четыре вида фундаментальных взаимодействий. В одном из них участниками являются все заряженные частицы и частицы, обладающие магнитным моментом, переносчиками – фотоны. Этот вид взаимодействия характеризуется сравнительной интенсивностью <math>10^{-2}</math>, радиус его действия равен ...</p> <p><b>Ответ:</b> бесконечность</p> <p><b>Варианты ответа:</b></p> <p>1) <math>10^{-10}</math> м    2) <math>10^{-15}</math> м    3) <math>\infty</math>    4) <math>10^{-18}</math> м</p>	<p>Все перечисленные характеристики соответствуют электромагнитному взаимодействию. Его радиус действия равен бесконечности</p>
<p>Известно четыре вида фундаментальных взаимодействий. В одном из них выполняются все законы сохранения; оно характеризуется сравнительной интенсивностью, равной 1; радиус его действия составляет <math>10^{-15}</math> м. Всё перечисленное относится к _____ взаимодействию.</p> <p><b>Ответ:</b> сильное</p> <p><input type="radio"/> сильному                      <input type="radio"/> слабому</p> <p><input type="radio"/> гравитационному    <input type="radio"/> электромагнитному</p>	<p>Между нуклонами в ядре, характерный размер которого <math>10^{-15}</math> м, осуществляется сильное взаимодействие. Его интенсивность принята за 1. Для сильного взаимодействия выполняются все законы сохранения: энергии; импульса; момента импульса; зарядов электрического, лептонного и барионного; изоспина; странности; четности.</p>

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

Введение.....	2
<b>1</b> Механика.....	<b>4</b>
<b>2</b> Молекулярная физика и термодинамика.....	<b>20</b>
<b>3</b> Электричество и магнетизм.....	<b>33</b>
<b>4</b> Механические и электромагнитные колебания и волны.....	<b>48</b>
<b>5</b> Волновая и квантовая оптика.....	<b>59</b>
<b>6</b> Квантовая физика и физика атома.....	<b>71</b>
<b>7</b> Элементы ядерной физики и физики элементарных частиц.....	<b>80</b>
<b>8</b> Оглавление	<b>88</b>

Учебное издание

Корнилов Андрей Викторович  
Сабылинский Александр Владимирович

## **ЗАДАЧИ ПО ФИЗИКЕ С РЕШЕНИЯМИ И ОТВЕТАМИ**

Учебное пособие

Подписано в печать 21.11.12. Формат 60×84/16. Усл.печ.л.                      Уч.изд.л.

Тираж 200 экз. Заказ N                      Цена

Отпечатано в Белгородском государственном технологическом университете  
им. В.Г.Шухова  
308012, г. Белгород, ул. Костюкова,46