

## Вариант 1

| A1 | A2 | A3 | A4 | A5  | A6 | A7 | A8  | A9 | A10 | A11 | A12 | A13 | A14 | A15 | A16 | A17 | A18 |
|----|----|----|----|-----|----|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 3  | 5  | 3  | 2  | 4   | 1  | 3  | 3   | 4  | 3   | 3   | 5   | 1   | 5   | 1   | 1   | 2   | 1   |
| B1 | B2 | B3 | B4 | B5  | B6 | B7 | B8  | B9 | B10 | B11 | B12 |     |     |     |     |     |     |
| 30 | 12 | 35 | 60 | 477 | 12 | 30 | 562 | 21 | 80  | 640 | 18  |     |     |     |     |     |     |

## Вариант 2

| A1 | A2 | A3 | A4  | A5  | A6 | A7 | A8  | A9 | A10 | A11 | A12 | A13 | A14 | A15 | A16 | A17 | A18 |
|----|----|----|-----|-----|----|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1  | 5  | 1  | 2   | 2   | 1  | 4  | 3   | 3  | 4   | 5   | 1   | 5   | 3   | 3   | 4   | 3   | 2   |
| B1 | B2 | B3 | B4  | B5  | B6 | B7 | B8  | B9 | B10 | B11 | B12 |     |     |     |     |     |     |
| 15 | 18 | 32 | 160 | 410 | 7  | 3  | 476 | 18 | 3   | 2   | 48  |     |     |     |     |     |     |

**В некоторых задачах я буду предлагать Вам краткие выдержки из теории. Не игнорируйте их, если хотите вникнуть в решение задачи.**

**Очень большое количество задач в этом тесте можно решить просто хорошо зная теорию. То есть вам не надо обладать глубокими познаниями в физике. Достаточно записать дано, вспомнить формулу по теме задачи и просто подставили данные. Все, задача решена!**

**Если у вас есть более красивые решения отдельных задач – поделитесь! ☺**

2016/2017, 1 этап, первый вариант

**A1.** Рекомендую скачать у меня с сайта [www.repet.by](http://www.repet.by) раздел «Кинематика» (он находится в свободном доступе) и внимательно изучить второй параграф (материал, изложенный в нем, пригодится вам для решения задачи A2). Так же рекомендую выучить наизусть определения всех физических величин (на самом деле их не так много).

**Ответ:** 3.

**A2.** Очень простая задача. В начальный момент времени тело было в точке с координатой 2 метра. К моменту времени 4 секунды тело переместилось в точку с координатой –2 метра, то есть тело прошло путь равный 4 метра. К моменту времени 8 секунд тело находится в точке с координатой –1 метр, то есть тело прошло путь 1 метр. Всего тело прошло путь равный 5 метров.

**Ответ:** 5.

**A3.** Средняя скорость пути равна отношению **ВСЕГО** пути, пройденного телом, ко **ВСЕМУ** времени движения (учитывается даже то время, когда тело не двигалось)  $v_{cp} = \frac{L}{t}$ , где  $L$  – весь путь, который прошло тело,  $t$  – все время движения. Таким образом, получаем  $v_{cp} = \frac{L_1 + L_2 + L_3 + \dots}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots}$ . При этом

$$L_1 = v_1 t_1, \quad L_2 = v_2 t_2, \quad L_3 = v_3 t_3$$

и т.д., где  $v_1, v_2, v_3$  – скорости движения тела на отдельных участках. Время тоже может быть выражено через путь и скорость на данном участке  $t_1 = \frac{L_1}{v_1}, t_2 = \frac{L_2}{v_2}, t_3 = \frac{L_3}{v_3}$ .

**Что раскрывать (путь или время), зависит только от условия задачи. Важно запомнить, что раскрывается всегда только одна величина – либо время, либо путь!**

Величины, которые определяются частным (то есть отношением) двух других величин, в физике можно разделить на два типа: средние и мгновенные. Скорость тоже делится на среднюю и мгновенную. Мгновенная скорость описывает движение в данный конкретный момент времени в данной конкретной точке пространства (ее, например, показывает спидометр автомобиля). Средняя скорость характеризует все движение целиком, не описывая подробности движения на каждом конкретном участке.

**КАК УЗНАТЬ КАКУЮ СКОРОСТЬ НАС ПРОСЯТ НАЙТИ В ЗАДАЧЕ?**

**Мгновенная скорость.** Это скорость в данной точке пространства или в данный момент времени. Например, скорость тела спустя 2 секунды падения или скорость мяча на высоте 4 метра над столом.

**Средняя скорость.** В задаче эта скорость на участке пути или за некоторое время движения. Например, скорость за 2 секунды падения (а не **через** две секунды) или скорость на первых 20 метрах пути.

**НЕ СОВЕРШАЙТЕ ОЧЕНЬ РАСПРОСТРАНЕННУЮ ОШИБКУ. СРЕДНЯЯ СКОРОСТЬ, КАК ПРАВИЛО, НЕ РАВНА СРЕДНЕМУ АРИФМЕТИЧЕСКОМУ СКОРОСТЕЙ ТЕЛА НА КАЖДОМ ЭТАПЕ ДВИЖЕНИЯ. СРЕДНЕЕ АРИФМЕТИЧЕСКОЕ ПОЛУЧАЕТСЯ ТОЛЬКО В НЕКОТОРЫХ ЧАСТНЫХ СЛУЧАЯХ, КОТОРЫЕ БУДУТ ОПИСАНЫ ДАЛЕЕ.**

Пусть  $t$  – время, затраченное на первую часть пути. Тогда  $2t$  – время, затраченное на вторую часть пути. Следовательно, автомобиль проходит за разные промежутки времени разные расстояния и раскрывать будем путь:  $S_1 = v_1 t_1 = v_1 t$  и  $S_2 = v_2 t_2 = v_2 2t$ . Тогда средняя скорость

$$v = \frac{S_1 + S_2}{t_1 + t_2} = \frac{v_1 t + v_2 2t}{t + 2t} = \frac{v_1 + 2v_2}{3} = \frac{24 + 2 \cdot 12}{3} = 16 \text{ (км/ч)}$$

Ответ: 3.

**А4. Динамика** – раздел механики, который изучает причины возникновения движения и тип возникающего движения. Динамика оперирует такими понятиями, как масса, сила, импульс, энергия.

**Взаимодействие** – процесс, в ходе которого тела оказывают взаимное действие друг на друга. В физике все взаимодействия обязательно парные. Поэтому они и называются **ВЗАИМО**действиями.

**Сила** – это количественная мера взаимодействия тел. Сила является причиной изменения скорости тела целиком или его частей (деформации). В механике силы могут иметь различную физическую природу: гравитационную (сила тяжести), электромагнитную (силы трения и упругости) и т. д. Сила является **векторной величиной**. Прямая, вдоль которой направлена сила, называется линией действия силы. Сила характеризуется тремя параметрами: точкой приложения, модулем и направлением.

В Международной системе единиц (СИ) сила измеряется в **Ньютонах (Н)**.

Для измерения сил используют откалиброванные пружины. Такие откалиброванные пружины называются **динамометрами**. Сила измеряется по величине растяжения пружины динамометра.

Сила, оказывающая на тело такое же действие, как и все силы, действующие на него, вместе взятые, называется **равнодействующей (резльтирующей) силой**. **ТО ЕСТЬ РАВНОДЕЙСТВУЮЩЕЙ МОЖНО ЗАМЕНИТЬ ВСЕ СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ТЕЛО.**

Равнодействующая равна векторной сумме всех сил, действующих на тело:  $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_N$ .

В самых простых случаях, когда на тело действует только **две силы**, равнодействующая находится как:

1. сумма двух сил, если они направлены в одну сторону вдоль одной прямой:  $F = F_1 + F_2$

2. модуль разности двух сил, если они направлены в разные стороны вдоль одной прямой (см. рисунок):  $F = |F_1 - F_2|$

3. по теореме Пифагора, если они направлены **под прямым углом** друг к другу (см.

рисунок):  $F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2}$

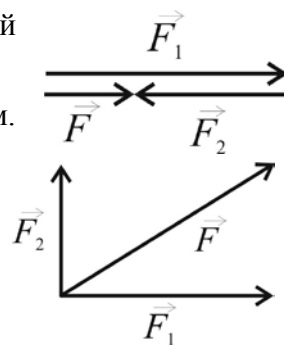
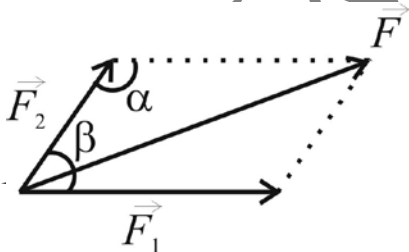
Во всех остальных случаях, когда **две силы** направлены под некоторым углом друг к другу, результирующая сила находится по теореме косинусов (см. рисунок)

$$F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 - 2F_1F_2 \cos \alpha}.$$

**ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ, КАКОЙ УГОЛ ДОЛЖЕН БЫТЬ ИСПОЛЬЗОВАН В ТЕОРЕМЕ КОСИНУСОВ!!!** В большинстве задач вам будет дан угол между векторами – угол  $\beta$  (векторы при этом начинаются в одной точке). Однако в теореме косинусов надо будет использовать угол  $\alpha$ , который равен  $180^\circ - \beta$ .

В любом случае при сложении двух сил результирующая сила всегда будет лежать в диапазоне от  $|F_1 - F_2|$  (силы направлены в противоположные стороны) до  $F_1 + F_2$  (силы направлены в одну сторону).

**ВТОРОЙ ЗАКОН НЬЮТОНА** – основной закон динамики. Приступая к формулировке второго закона, следует вспомнить, что в динамике вводятся две новые физические величины – масса тела  $m$  и сила  $F$ . Первая из этих величин – масса  $m$  – является количественной характеристикой инертных свойств те-



ла. Она показывает, как тело реагирует на внешнее воздействие. Вторая – сила  $F$  – является количественной мерой действия одного тела на другое.

Второй закон Ньютона – это фундаментальный закон природы. Он является обобщением опытных фактов, которые можно разделить на две категории:

1. Если на тела разной массы подействовать одинаковой силой, то ускорения, приобретаемые телами, обратно пропорциональны массам:  $a \sim 1/m$  при  $F = \text{const}$

Чем меньше масса тела, тем большее ускорение приобретает тело.

2. Если силами разной величины подействовать на одно и то же тело, то ускорения тела прямо пропорциональны приложенным силам:  $a \sim F$  при  $m = \text{const}$

Чем больше сила, приложенная к телу, тем большее ускорение приобретает тело.

Обобщая подобные наблюдения, Ньютон сформулировал основной закон динамики:

**Ускорение, приобретаемое телом при взаимодействии, прямо пропорционально равнодействующей всех сил, действующих на тело, и обратно пропорционально массе этого тела:**  $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$ .

Это ускорение будет постоянно до тех пор, пока не изменится результирующая сила либо пока не поменяется масса тела. Однако при решении задач второй закон Ньютона целесообразней записывать в виде:

$$\vec{F} = m\vec{a}.$$

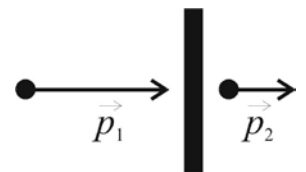
Если на тело одновременно действуют несколько сил (например,  $\vec{F}_1$ ,  $\vec{F}_2$  и  $\vec{F}_3$  то под силой  $\vec{F}$  нужно понимать **равнодействующую всех сил, то есть сумму всех сил:**  $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3$ ). Если равнодействующая сила  $\vec{F} = 0$ , то тело будет оставаться в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения (первый закон Ньютона).

Вернемся к задаче. По второму закону Ньютона  $F = ma = 3$  (Н). Так как силы направлены в разные стороны и модуль результирующей силы больше первой силы, то первая сила больше второй и равна  $F = F_1 - F_2 \Rightarrow F_1 = F + F_2 = 5$  (Н).

**Ответ: 2.**

**A5. Импульсом** (количеством движения) тела называют физическую векторную величину, являющуюся количественной характеристикой поступательного движения тел. Импульс обозначается  $p$ . Импульс тела равен произведению массы тела на его скорость:  $\vec{p} = m\vec{v}$ . Направление вектора импульса  $\vec{p}$  совпадает с направлением вектора скорости тела (направлен по касательной к траектории при криволинейном движении). Единица измерения импульса – кг·м/с.

Изменение импульса тела равно  $\Delta\vec{p} = \vec{p}_2 - \vec{p}_1$ , где  $\vec{p}_1$  – импульс тела в начальный момент времени,  $\vec{p}_2$  – в конечный. Например, найдем изменение импульса пули массой 10 гр, которая до того, как пробита стенку, имела скорость 300 м/с, а после – 100 м/с. Так как и начальная скорость пули и конечная имеют одинаковые направления, а так же учитывая то, что скорость пули уменьшилась, изменение импульса будет отрицательной величиной и равно:  $\Delta p = p_2 - p_1 = 0,01 \cdot 100 - 0,01 \cdot 300 = -2$  кг·м/с.



Не надо пугаться отрицательного значения. Просто импульс пули уменьшился при прохождении стены. Если же пуля не сможет пробить стенку, а застрянет в ней, то ее конечный импульс будет равен нулю. Следовательно, изменение импульса будет равно:  $\Delta p = p_2 - p_1 = 0 - 0,01 \cdot 300 = -3$  кг·м/с, то есть импульс пули в обоих случаях уменьшается.

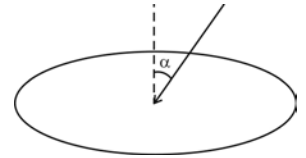
Если же после удара о стенку пуля **отскакивает в противоположном направлении**, то ее конечный импульс станет отрицательным, следовательно:  $\Delta p = p_2 - p_1 = -0,01 \cdot 100 - 0,01 \cdot 300 = -4$  кг·м/с.

И опять не боимся отрицательности. Положительным у нас было начальное направление полета пули, поэтому изменение получилось отрицательным.

А теперь вернемся к задаче. За положительное выберем направление, в котором будет двигаться шар после отскока. Получим:  $\Delta p = p_2 - p_1 = mv_1 - (-mv_2) = mv_1 + mv_2 = m(\sqrt{2gh_1} + \sqrt{2gh_2}) = 1$  (кг·м/с).

**Ответ: 4.**

**А6.** Давлением называется скалярная физическая величина, равна отношению модуля силы  $F$  действующей **перпендикулярно** поверхности, к площади  $S$  этой поверхности  $p = F/S$ . В системе СИ давление измеряется в **паскалях (Па)**:  $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$ . Если же сила направлена под некоторым углом  $\alpha$  **к перпендикуляру к площадке (см. рисунок)**, то создаваемое этой силой давление находится по формуле  $p = \frac{F \cos \alpha}{S}$ . При этом **сила давления** находится по формуле  $F = pS$  или



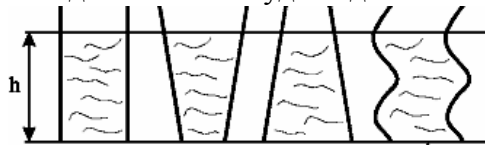
$$F = \frac{pS}{\cos \alpha}.$$

Если в условии задачи про силу, действующую под некоторым углом, обязательно обращайте внимание на то, какой угол (между силой и плоскостью или между силой и перпендикуляром) вам дан.

Давление жидкости на дно или боковые стенки сосуда, в котором она находится, зависит от высоты столба жидкости в этом сосуде. Сила давления на дно цилиндрического сосуда высотой  $h$  и площадью основания  $S$  равна весу столба жидкости  $mg$ , где  $m = \rho V = \rho hS$  – масса жидкости в сосуде,  $\rho$  – плотность

жидкости. Следовательно  $p = \frac{F}{S} = \frac{mg}{S} = \frac{\rho hSg}{S} = \rho gh$ .

Обратите внимание, что оказываемое давление **НИКОИМ ОБРАЗОМ НЕ ЗАВИСИТ ОТ ФОРМЫ СОСУДА, А ЗАВИСИТ ТОЛЬКО ОТ РОДА ЖИДКОСТИ (ПЛОТНОСТИ) И ВЫСОТЫ СТОЛБА ЖИДКОСТИ**. Например, давление на дно в этих сосудах одинаково.



Такое же давление на глубине  $h$  в соответствии с законом Паскаля жидкость оказывает и на **боковые стенки** сосуда. Давление столба жидкости  $\rho gh$  называют **гидростатическим давлением**.

Возвращаемся к задаче. Сила давления будет равна:  $F = p \cdot S = \rho gh \cdot S = 99\,000 \text{ (Н)} = 99 \text{ кН}$ .

**Ответ: 1.**

**А7.** Читаем теорию и самостоятельно решаем задачу.

**Первый закон термодинамики** является обобщением закона сохранения и превращения энергии для термодинамической системы. Он формулируется следующим образом:

**Изменение  $\Delta U$  внутренней энергии неизолзированной термодинамической системы равно разности между количеством теплоты  $Q$ , переданной системе, и работой  $A$ , совершенной системой над внешними телами:**  $\Delta U = Q - A$ . Соотношение, выражающее первый закон термодинамики, часто записывают в другой форме. На мой взгляд, следующая запись более понятна:  $Q = \Delta U + A$ . Сформулируем первый закон термодинамики по этой записи.

**Количество теплоты, полученное системой, идет на изменение ее внутренней энергии и на совершение работы системой над внешними телами (или просто на совершение системой работы).**

Первый закон термодинамики является обобщением опытных фактов. Согласно этому закону, энергия не может быть создана или уничтожена. Она передается от одной системы к другой и превращается из одной формы в другую. Важным следствием первого закона термодинамики является утверждение о невозможности создания машины, способной совершать полезную работу без потребления энергии извне и без каких-либо изменений внутри самой машины. Такая гипотетическая машина получила название **вечного двигателя (perpetuum mobile) первого рода**. Многочисленные попытки создать такую машину неизменно заканчивались провалом. Любая машина может совершать положительную работу  $A$  над внешними телами только за счет получения некоторого количества теплоты  $Q$  от окружающих тел или уменьшения своей внутренней энергии  $\Delta U$ .

Применим первый закон термодинамики к изопроцессам в газах.

В **изохорном процессе** ( $V = \text{const}$ ) газ работы не совершает (объем не меняется),  $A = 0$ . Следовательно,

$$Q = \Delta U = U(T_2) - U(T_1).$$

Здесь  $U(T_1)$  и  $U(T_2)$  – внутренние энергии газа в начальном и конечном состояниях при температурах  $T_1$  и  $T_2$ . Внутренняя энергия идеального газа зависит только от температуры. При изохорном нагревании тепло поглощается газом ( $Q > 0$ ), и его внутренняя энергия увеличивается. При охлаждении тепло отдается внешним телам ( $Q < 0$ ). Таким образом для **одноатомного** газа и изохорного процесса получаем



$$Q = \Delta U = \frac{3}{2} \nu R \Delta T \quad \text{или} \quad Q = \Delta U = \frac{3}{2} V \Delta p$$

В **изобарном процессе** ( $p = \text{const}$ ) работа, совершаемая газом, выражается соотношением

$$A = p(V_2 - V_1) = p \Delta V \quad \text{или} \quad A = \nu R \Delta T$$

Первый закон термодинамики для изобарного процесса будет иметь вид

$$Q = U(T_2) - U(T_1) + p(V_2 - V_1) = \Delta U + p \Delta V.$$

Если газ **одноатомный**, то

$$Q = \Delta U + A = \frac{3}{2} \nu R \Delta T + \nu R \Delta T = \frac{5}{2} \nu R \Delta T \quad \text{или} \quad Q = \Delta U + A = \frac{3}{2} p \Delta V + p \Delta V = \frac{5}{2} p \Delta V$$

При изобарном расширении  $Q > 0$  – тепло поглощается газом. Газ совершает положительную работу и его внутренняя энергия возрастает. При изобарном сжатии  $Q < 0$  – тепло отдается внешним телам. В этом случае  $A < 0$ . Температура газа при изобарном сжатии уменьшается ( $T_2 < T_1$ ); внутренняя энергия убывает, то есть  $\Delta U < 0$ .

В **изотермическом процессе** температура газа не изменяется. Следовательно, не изменяется и внутренняя энергия газа, то есть  $\Delta U = 0$ . Первый закон термодинамики для изотермического процесса выражается соотношением  $Q = A$ . Количество теплоты  $Q$ , полученной газом в процессе изотермического расширения, превращается в работу над внешними телами. При изотермическом сжатии работа внешних сил, произведенная над газом, превращается в тепло, которое передается окружающим телам.

**Ответ: 3.**

**A8.** И опять немного теории. Газ может участвовать в различных тепловых процессах, при которых могут изменяться все параметры, описывающие его состояние ( $p$ ,  $V$  и  $T$ ). В общем случае, если масса газа  $m$  и его состав (молярная масса)  $M$  не меняются  $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$  – объединенный газовый закон.

Интерес представляют процессы, в которых один из параметров ( $p$ ,  $V$  или  $T$ ) остается неизменным. Такие процессы называются **изопроцессами**.

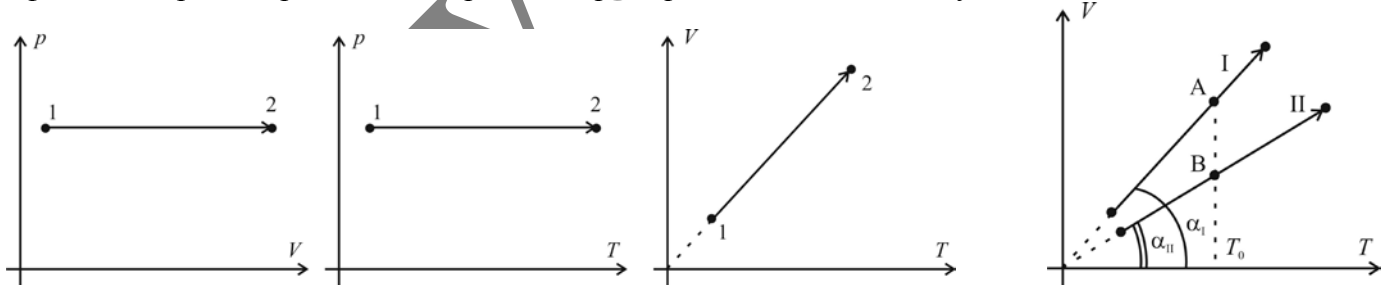
**Изобарный процесс ( $p = \text{const}$ )**

**Изобарным процессом** называют процесс, протекающий при неизменном давлении  $p$ . Уравнение изобарного процесса для некоторого неизменного количества вещества  $\nu$  имеет вид:

$$V/T = \text{const} \quad \text{или} \quad V_1/T_1 = V_2/T_2,$$

где  $V_1$  и  $T_1$  – начальные объем и температура газа,  $V_2$  и  $T_2$  – конечные объем и температура газа.

Графики изобарного процесса в координатах  $p$ – $V$ ;  $p$ – $T$ ;  $V$ – $T$  имеют следующий вид:



Обратите внимание на то, что продолжение графика в  $V$ – $T$  координатах (то есть в координатах, где нет давления) «смотрит» точно в начало координат. Однако он никогда не сможет начаться из начала координат, так как при очень низких температурах газ превращается в жидкость.

Рассмотрим два изобарных процесса. В каком из них давление больше? Выберем произвольную температуру  $T_0$  и соответствующие ей на графике точки A и B (см. самый правый график). Очевидно, что объем в точке A больше объема в точке B, а температуры одинаковы. Из уравнения  $pV/T = \text{const}$  следует, что давление в точке B будет больше, чем в точке A (если этот вывод для Вас не ясен уточните у меня). Чем **больше** угол наклона графика к оси, тем **меньше** будет давление.

**ПРИМЕНЕНИЕ.** Закон Гей–Люссака применяют, если неизменным остается давление газа. Ищите в задачах слова «газ в сосуде, закрытом **ПОДВИЖНЫМ** поршнем» или «газ в **открытом** сосуде». Иногда про сосуд ничего не сказано, но по условию понятно, что он сообщается с атмосферой. Тогда считается, что атмосферное давление всегда остается неизменным (если в условии не сказано иного).

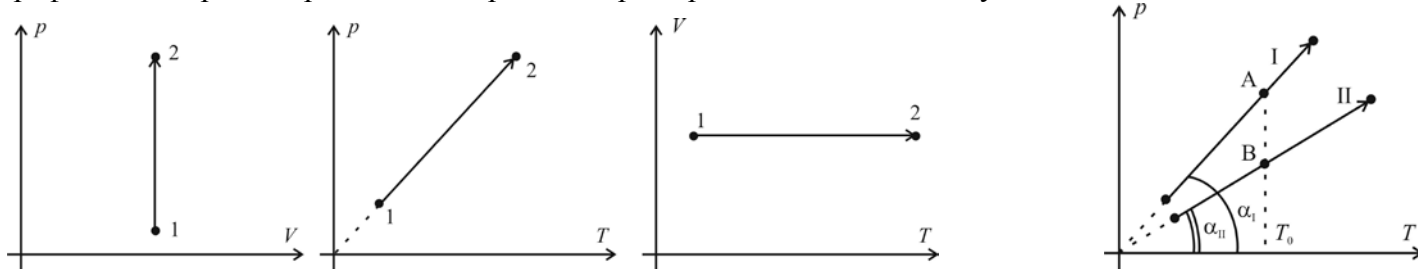
**Не забывайте про перевод температуры из градусов Цельсия в кельвины!!!**

**Изохорный процесс ( $V = \text{const}$ )**

**Изохорный процесс** – это процесс нагревания или охлаждения газа при постоянном объеме  $V$  и при условии, что количество вещества  $\nu$  в сосуде остается неизменным.

Как следует из уравнения состояния идеального газа, при этих условиях давление газа  $p$  изменяется прямо пропорционально его абсолютной температуре:  $p \sim T$  или  $p/T = \text{const}$  или  $p_1/T_1 = p_2/T_2$ , где  $p_1$  и  $T_1$  – начальные давление и температура газа,  $p_2$  и  $T_2$  – конечные давление и температура газа.

Графики изохорного процесса в координатах  $p-V$ ;  $p-T$ ;  $V-T$  имеют следующий вид:



Обратите внимание на то, что продолжение графика в  $p-T$  координатах (то есть в координатах, где нет объема) «смотрит» точно в начало координат. Однако он никогда не сможет начаться из начала координат, так как при очень низких температурах превращается в жидкость.

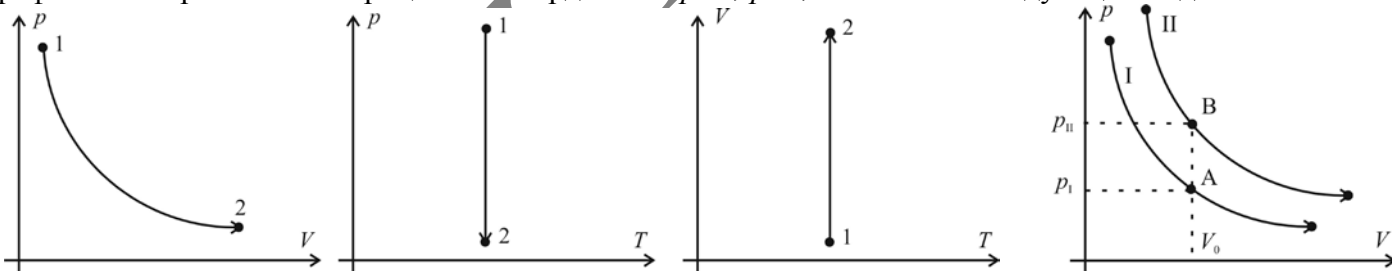
Рассмотрим два изохорных процесса. В каком из них объем больше? Выберем произвольную температуру  $T_0$  и соответствующие ей на графике точки А и В (см. самый правый график). Очевидно, что давление в точке А больше давления в точке В, а температуры одинаковы. Из уравнения  $pV/T = \text{const}$  следует, что объем в точке В будет больше, чем в точке А (если этот вывод для Вас не ясен уточните у меня). Чем **больше** угол наклона графика к оси, тем **меньше** будет объем газа.

**ПРИМЕНЕНИЕ.** Закон Шарля применяют в задачах, когда объем газа остается неизменным. Обычно это или сказано явно, или в задаче присутствуют слова «газ в **ЗАКРЫТОМ** сосуде без поршня». **Не забывайте про перевод температуры из градусов Цельсия в кельвины!!!**

#### Изотермический процесс ( $T = \text{const}$ )

**Изотермическим процессом** называют процесс, протекающий при постоянной температуре  $T$ . Из уравнения состояния идеального газа следует, что при постоянной температуре  $T$  и неизменном количестве вещества  $\nu$  в сосуде произведение давления  $p$  газа на его объем  $V$  должно оставаться постоянным:  $pV = \text{const}$  или  $p_1V_1 = p_2V_2$ , где  $p_1$  и  $V_1$  – начальные давление и объем газа,  $p_2$  и  $V_2$  – конечные давление и объем газа.

Графики изотермического процесса в координатах  $p-V$ ;  $p-T$ ;  $V-T$  имеют следующий вид:



Обратите внимание на график в координатах  $p-V$ . При переходе из состояния 1 в состояние 2 давление газа падает, а объем растет. Эту закономерность процесса мы используем при построении графиков в координатах  $p-T$  и  $V-T$ .

Рассмотрим два изотермических процесса. В каком из них температура больше? Выберем произвольный объем  $V_0$  и соответствующие ему на графике точки А и В (см. самый правый график). Очевидно, что давление в точке А меньше давления в точке В, а объемы одинаковы. Из уравнения  $pV/T = \text{const}$  следует, что температура в точке В будет больше, чем в точке А (если этот вывод для Вас не ясен уточните у меня). Чем **дальше** график находится от начала координат, тем **больше** будет температура газа. Задачу решите самостоятельно.

**ПРИМЕНЕНИЕ.** Закон Бойля–Мариотта. Тут сложнее всего. Хорошо, если в задаче написано, что температура газа неизменна. Чуть хуже, если в условии присутствует слово «медленно». Например, газ медленно сжимают или медленно расширяют. Еще хуже, если сказано, что газ закрыт теплопроводящим поршнем. Наконец, совсем плохо, если про температуру не сказано ничего, но из условия можно предположить, что она не изменяется. Обычно в этом случае ученики применяют закон Бойля–Мариотта от безысходности.

**КАК ЗАПОМНИТЬ НАЗВАНИЯ ПРОЦЕССОВ?** Изотермический. Термический – температура. Изобарный. Есть единица измерения давления – бар. Изохорный. Вычисляем его методом исключения.

**Ответ: 3.**

**A9.** Наряду с изохорным, изобарным и изотермическим процессами в термодинамике часто рассматриваются процессы, протекающие без теплообмена с окружающими телами – **адиабатические процессы**. Сосуды с теплонепроницаемыми стенками называются **адиабатическими оболочками**, а процессы расширения или сжатия газа в таких сосудах называются **адиабатическими**.

Теплота не подводится и не отводится от термодинамической системы именно в адиабатном процессе. Первый закон термодинамики для нашего случая будет имеет вид:  $A = -\Delta U$ . То есть при увеличении внутренней энергии  $\Delta U$ , на столько же должна уменьшаться работа  $A$  совершенная системой. Это выполняется в промежуток времени с 3 по 4 секунды. **Ответ: 4.**

**A10.** Открываем учебник по физике и читаем теорию. **Ответ: 3.**

**A11.** В проводниках при определенных условиях может возникнуть непрерывное упорядоченное движение свободных носителей электрического заряда. Такое движение называется **электрическим током**. За направление электрического тока принято направление движения положительных свободных зарядов, хотя в большинстве случаев движутся электроны – отрицательно заряженные частицы.

Количественной мерой электрического тока служит **сила тока  $I$  – скалярная физическая величина, равная отношению заряда  $q$ , переносимого через поперечное сечение проводника за интервал**

**времени  $t$ , к этому интервалу времени:**  $I = \frac{q}{t}$ .

Если сила тока и его направление не изменяются со временем, то такой ток называется **постоянным**. Сила тока измеряется амперметром, который включается в цепь **последовательно**. В Международной системе единиц СИ сила тока измеряется в **амперах (А)**.  $1 \text{ А} = 1 \text{ Кл/с}$ .

Средняя сила тока находится так же, как и средняя скорость  $I_{\text{cp}} = \frac{Q}{t}$ , где  $Q = q_1 + q_2 + q_3 \dots$  – весь заряд, который прошел по проводнику,  $t = t_1 + t_2 + t_3 \dots$  – время прохождения заряда.

$$I_{\text{cp}} = \frac{q_1 + q_2 + q_3}{t_1 + t_2 + t_3} = \frac{I_1 \cdot t_1 + I_2 \cdot t_2 + I_3 \cdot t_3}{t_1 + t_2 + t_3}.$$

Если же ток **равномерно** меняется с течением времени от значения  $I_1$  до значения  $I_2$ , то значение среднего тока можно найти как среднее арифметическое крайних значений  $I_{\text{cp}} = \frac{I_1 + I_2}{2}$ . При этом заряд, прошедший по проводнику, находится как  $q = I_{\text{cp}} t = \frac{I_1 + I_2}{2} t$ . Задачу решите самостоятельно. И не забудьте перевести минуты в секунды.

**Ответ: 3.**

**A12.** Немецкий физик Г. Ом в 1826 году экспериментально установил, что сила тока  $I$ , текущего по однородному металлическому проводнику (то есть проводнику, в котором не действуют сторонние силы)

сопротивлением  $R$ , пропорциональна напряжению  $U$  на концах проводника:  $I = \frac{U}{R}$ . Величину  $R$  принято

называть **электрическим сопротивлением**. Проводник, обладающий электрическим сопротивлением, называется **резистором**. Это соотношение выражает **закон Ома для однородного участка цепи: сила тока в проводнике прямо пропорциональна приложенному напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению проводника**.

Проводники, подчиняющиеся закону Ома, называются **линейными**. Графическая зависимость силы тока  $I$  от напряжения  $U$  (такие графики называются **вольт–амперными характеристиками**, сокращенно ВАХ) изображается прямой линией, проходящей через начало координат. Следует отметить, что существует много материалов и устройств, не подчиняющихся закону Ома. Например, полупроводниковый диод или газоразрядная лампа. Даже у металлических проводников при достаточно больших токах наблюдается отклонение от линейного закона Ома, так как **электрическое сопротивление металлических проводников растет с ростом температуры**.

Проводники в электрических цепях можно соединять двумя способами: **последовательно и параллельно**. У каждого способа есть свои закономерности.

### ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО СОЕДИНЕНИЯ

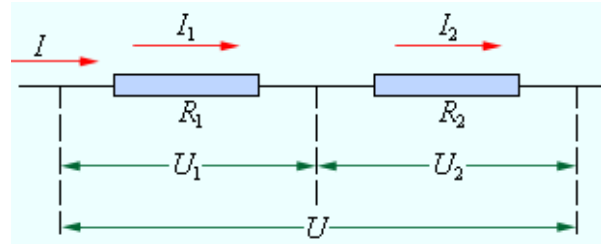
**При последовательном соединении** (когда конец одного проводника соединен с началом другого) проводников сила тока во всех проводниках одинакова:

$$I_1 = I_2 = I.$$

По закону Ома, напряжения  $U_1$  и  $U_2$  на проводниках равны:

$$U_1 = IR_1, \quad U_2 = IR_2.$$

Общее напряжение  $U$  на обоих проводниках равно сумме напряжений  $U_1$  и  $U_2$ :  $U = U_1 + U_2 = I(R_1 + R_2) = IR$ , где  $R$  – электрическое сопротивление всей цепи. Отсюда следует:  $R = R_1 + R_2$ .



При последовательном соединении полное сопротивление цепи равно сумме сопротивлений отдельных проводников. Этот результат справедлив для любого числа последовательно соединенных проводников:  $R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 \dots$

Если же в цепь последовательно включено  $n$  **ОДИНАКОВЫХ** сопротивлений  $R$ , то общее сопротивление  $R_0$  находится по формуле:  $R_0 = n \cdot R$ .

### ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО СОЕДИНЕНИЯ

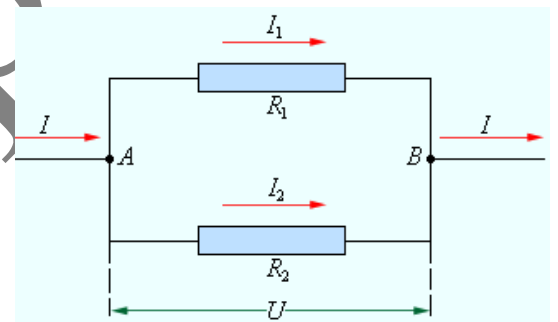
**При параллельном соединении** (когда у резисторов общее начало и общий конец) напряжения  $U_1$  и  $U_2$  на обоих проводниках одинаковы (каждый из потребителей напрямую подключен к источнику):  $U_1 = U_2 = U$ . Сумма токов  $I_1$  и  $I_2$ , протекающих по обоим проводникам, равна току в неразветвленной цепи:  $I = I_1 + I_2$ . Этот результат следует из того, что в точках разветвления токов (узлы А и В) в цепи постоянного тока не могут накапливаться заряды. Например, к узлу А за время  $\Delta t$  подтекает заряд  $I\Delta t$ , а утекает от узла за то же время заряд  $I_1\Delta t + I_2\Delta t$ . Следовательно,  $I = I_1 + I_2$ .

Записывая на основании закона Ома:  $I_1 = \frac{U}{R_1}$ ,  $I_2 = \frac{U}{R_2}$ ,  $I = \frac{U}{R}$ ,

где  $R$  – электрическое сопротивление всей цепи, получим

$$I = I_1 + I_2 \Rightarrow \frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} \Rightarrow \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

или (после приведения к общему знаменателю):  $R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ .



**При параллельном соединении проводников величина, обратная общему сопротивлению цепи, равна сумме величин, обратных сопротивлениям параллельно включенных проводников:**  $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} \dots$

То есть при параллельном соединении общее сопротивление **ВСЕГДА** будет меньше минимального сопротивления участка цепи. То есть если у нас сопротивления резисторов 3 и 5 Ом, то общее будет меньше 3 Ом. Этот результат справедлив для любого числа параллельно включенных проводников. Если же в цепь параллельно включено  $n$  **ОДИНАКОВЫХ** сопротивлений  $R$ , то общее сопротивление  $R_0$  находится по формуле:  $R_0 = \frac{R}{n}$ .

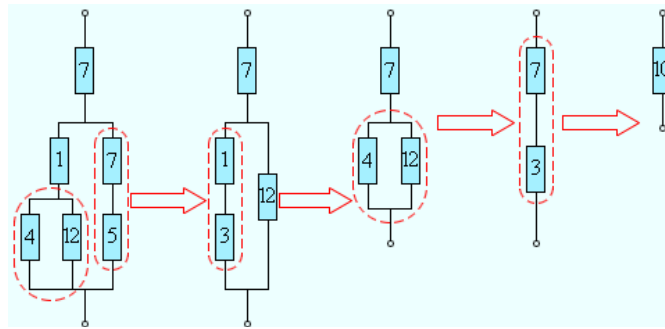
**ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ УДОБНО ПОЛЬЗОВАТЬСЯ СЛЕДУЮЩИМИ СООТНОШЕНИЯМИ:**

$$\text{для последовательного: } I_1 = I_2 \Rightarrow \frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2}; \quad \text{для параллельного: } U_1 = U_2 \Rightarrow I_1 R_1 = I_2 R_2.$$

Формулы для последовательного и параллельного соединения проводников позволяют во многих случаях рассчитывать сопротивление сложной цепи, состоящей из многих резисторов. На рисунке приведен пример такой сложной цепи и указана последовательность вычислений ( ).

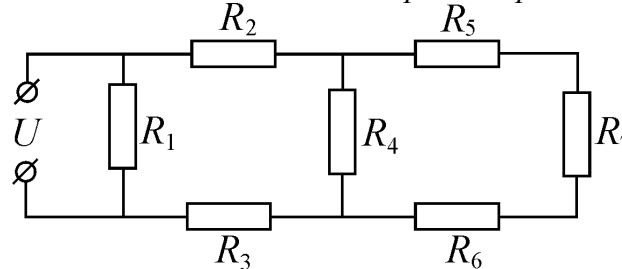
**ПРИМЕР.** Найдите общее сопротивление цепи. Все сопротивления в Омах.





Внимательно смотрите на рисунок. Задача решается устно.

**ПРИМЕР.** В цепь напряжением  $U = 220 \text{ В}$  включены семь резисторов так, как показано на схеме.



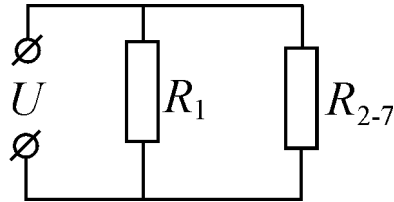
Найдите напряжение на резисторе  $R_5$ , если  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = R_7 = 4 \text{ Ом}$ .

**ЭТО ОЧЕНЬ ВАЖНЫЙ ПРИМЕР!!! ВАМ НЕОБХОДИМО ПОНЯТЬ ЛОГИКУ РАССУЖДЕНИЙ ПРИ РЕШЕНИИ ТАКОГО ТИПА ЗАДАЧ!!!**

Решим задачу в общем виде и рассчитаем сопротивления, токи, напряжения на каждом участке цепи.

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| <p>Резисторы <math>R_5, R_6, R_7</math> – соединены последовательно и их общее сопротивление равно</p> $R_5 + R_6 + R_7 = R_{5,6,7}.$ <p>Свернем цепь, заменив резисторы <math>R_5, R_6, R_7</math> на один резистор <math>R_{5,6,7}</math>.</p>                                                                                        |  |
| <p><math>R_{5,6,7}</math> и <math>R_4</math> – соединены параллельно (у них общее начало и конец) и, поэтому, их общее сопротивление</p> $R_{4,5,6,7} = \frac{R_{5,6,7} \cdot R_4}{R_{5,6,7} + R_4}.$ <p>Опять свернем цепь, заменив резисторы <math>R_{5,6,7}</math> и <math>R_4</math> на один резистор <math>R_{4,5,6,7}</math>.</p> |  |
| <p><math>R_2, R_3, R_{4,5,6,7}</math> – соединены последовательно и, поэтому, их общее сопротивление</p> $R_{2-7} = R_2 + R_3 + R_{4,5,6,7}.$                                                                                                                                                                                           |  |
| <p>Полное сопротивление цепи</p> $R = \frac{R_1 \cdot R_{2-7}}{R_1 + R_{2-7}}.$                                                                                                                                                                                                                                                         |  |

Тогда полная сила тока в цепи:  $I = \frac{U}{R}$ . Теперь будем разворачивать цепь назад.

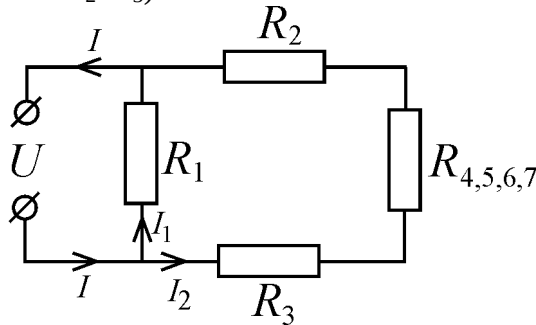


Напряжение на резисторе  $R_1$  равно  $U$  и поэтому:  $I_1 = \frac{U}{R_1}$ . Так как резисторы  $R_1$  и  $R_{2-7}$  параллельны, то

сила тока в неразветвленной части цепи равна сумме сил токов через резисторы  $R_1$  и  $R_{2-7}$ , то есть

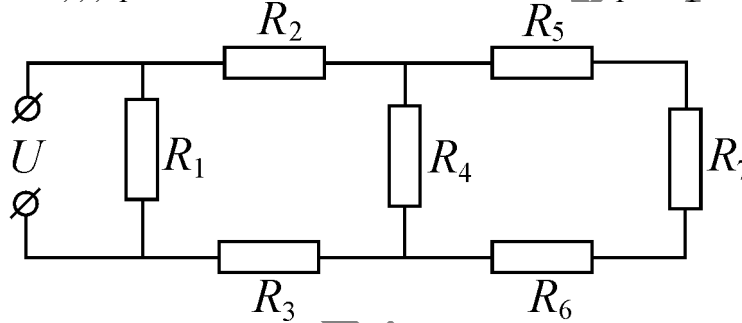
$$I = I_1 + I_{2-7}.$$

Силы тока  $I$  и  $I_1$  мы уже нашли, найдём ток  $I_{2-7}$ . Продолжаем разворачивать цепь. Через резисторы  $R_2$  и  $R_3$  идёт ток  $I_{2-7}$  (будем его обозначать  $I_2 = I_3$ ).



Тогда напряжение на резисторе  $R_2$  равно  $U_2 = I_2 R_2$ , напряжение на резисторе  $R_3$  равно  $U_3 = I_3 R_3$ .

Напряжение на резисторах  $R_{4,5,6,7}$  равно:  $U - U_2 - U_3 = U_4$ . Полностью развернём цепь.



Тогда сила тока через резистор  $R_4$  равна:  $I_4 = \frac{U_4}{R_4}$ . Тогда сила тока через резисторы  $R_5, R_6, R_7$  равна:

$$I_5 = I_6 = I_7 = \frac{U_4}{R_5 + R_6 + R_7},$$

а напряжение на резисторах:  $U_5 = I_5 R_5$ ,  $U_6 = I_6 R_6$ ,  $U_7 = I_7 R_7$ . Произведём вычисления для данной задачи и получим  $U_5 = 20$  В.

Вернемся к нашей задаче. Общее сопротивление цепи будет равно  $R_0 = R_{123} + R_{45} + R_6$ . Резисторы 1, 2 и 3 соединены параллельно. Следовательно

$$\frac{1}{R_{123}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{50} + \frac{1}{75} + \frac{1}{150} = \frac{6}{150} = \frac{1}{25} \Rightarrow R_{123} = 25 \text{ (Ом)}.$$

Резисторы 4 и 5 тоже соединены параллельно. Их общее сопротивление будет равно

$$\frac{1}{R_{45}} = \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} = \frac{1}{180} + \frac{1}{20} + \frac{1}{150} = \frac{1}{18} \Rightarrow R_{45} = 18 \text{ (Ом)}.$$

Общее сопротивление цепи будет равно  $R_0 = R_{123} + R_{45} + R_6 = 75 \text{ (Ом)}$ . Ток в цепи найдем по закону Ома.

**Ответ: 5.**

**A13.** В пространстве, окружающем движущиеся электрические заряды возникает магнитное поле.

О наличии магнитного поля можно судить по его действию на движущиеся электрические заряды, электрические токи, магниты. Из трех проявлений тока магнитное поле возникает всегда и зависит только от силы тока и его направления.

*Магнитным* называется *взаимодействие* между движущимися электрическими зарядами.

**Силовыми линиями** магнитного поля называют линии, по касательным к которым располагаются магнитные стрелки.

**Магнитной стрелкой** называют длинный и тонкий магнит, его полюса точечны. Подвешенная на нити магнитная стрелка всегда поворачивается в одну сторону. При этом один ее конец направлен в сторону севера, второй – на юг. Отсюда – название полюсов: северный (*N*) и южный (*S*).

**Вектор магнитной индукции** – векторная физическая величина, являющаяся характеристикой магнитного поля, численно равная силе, действующей на элемент тока в 1 А и длиной 1 м, если направление силовой линии перпендикулярно проводнику.

Обозначается *B*, единица измерения – 1 Тесла. 1 Тл – очень большая величина, поэтому в реальных магнитных полях магнитную индукцию измеряют в мТл.

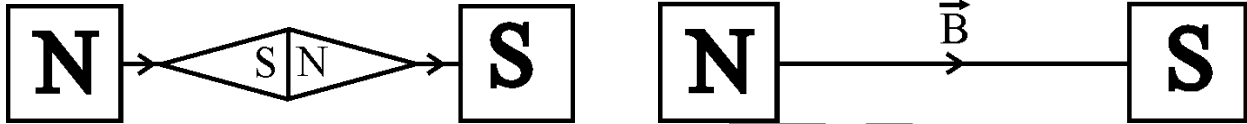
**Вектор магнитной индукции направлен по касательной к силовым линиям, то есть совпадает с направлением северного полюса магнитной стрелки, помещенной в данное магнитное поле.**

Направление  $\vec{B}$  определяется правилом правой руки. Направление  $\vec{B}$  не совпадает с направлением силы, действующей на проводник, поэтому силовые линии магнитного поля, строго говоря, силовыми не являются.

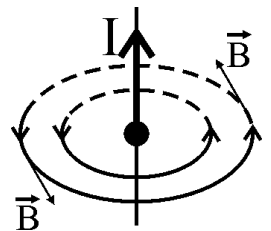
**Однородным магнитным полем** называется поле, в каждой точке которого  $\vec{B}$  одинаков. Почти однородное поле в соленоиде и между полюсами дугообразного магнита.

**СИЛОВАЯ ЛИНИЯ НАПРАВЛЕНА ОТ ЮЖНОГО ПОЛЮСА МАГНИТНОЙ СТРЕЛКИ К СЕВЕРНОМУ, ТО ЕСТЬ ОТ СЕВЕРНОГО ПОЛЮСА МАГНИТА К ЮЖНОМУ.**

В случае постоянных магнитов:

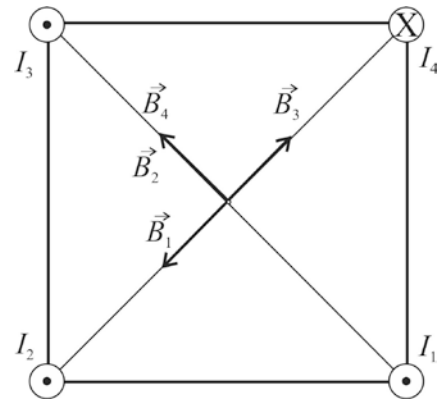


В случае магнитного поля электрического тока для определения направления силовых линий используют **ПРАВИЛО ПРАВОЙ РУКИ**: если взять проводник в правую руку так, чтобы большой палец был направлен по току, то четыре пальца, обхватывающие проводник, показывают направление силовых линий вокруг проводника. В случае прямого тока (см. рисунок) линии магнитной индукции – окружности, плоскости которых перпендикулярны току. Вектора магнитной индукции направлены по касательной к окружности.



Согласно принципу суперпозиции магнитных полей, индукция магнитного поля, порождаемого несколькими электрическими токами, будет равна векторной сумме индукций магнитных полей, порождаемых каждым током в отдельности. В принципе с индукцией магнитного поля мы поступаем так же, как с механическими силами, когда ищем результирующую силу. На рисунке указываем направление индукции магнитного поля каждого из токов. Магнитные поля первого и третьего токов компенсируют друг друга. Куда будет направлено результирующее поле решите сами.

**Ответ: 1.**

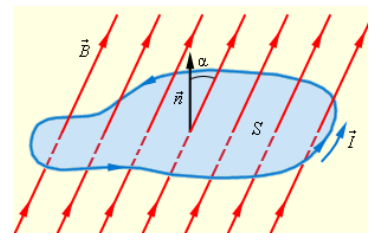


**A14.** Магнитным потоком  $\Phi$  через площадь *S* контура называют величину:  $\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha$ , где *B* – модуль вектора магнитной индукции,  $\alpha$  – угол между вектором  $\vec{B}$  и нормалью (перпендикуляром)  $\vec{n}$  к плоскости контура (см. рисунок).

Единица магнитного потока в системе СИ называется **вебером** (Вб). Магнитный поток, равный 1 Вб, создается магнитным полем с индукцией 1 Тл, пронизывающим по направлению нормали плоский контур площадью 1 м<sup>2</sup>:

$$1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot 1 \text{ м}^2.$$

Фарадей экспериментально установил, что при изменении магнитного потока в проводящем контуре возникает ЭДС индукции  $\varepsilon_{\text{инд}}$ , равная скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром, взятой со знаком минус (на знак минус в большинстве задач мы не будем обращать внимание):  $\varepsilon_{\text{инд}} = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ .



**Самоиндукция** является важным частным случаем электромагнитной индукции, когда изменяющийся магнитный поток, вызывающий ЭДС индукции, создается током в самом контуре. Если ток в рассматриваемом контуре по каким-то причинам изменяется, то изменяется и магнитное поле этого тока. Следовательно, и собственный магнитный поток, пронизывающий контур будет меняться. В контуре возникает ЭДС **самоиндукции**, которая согласно правилу Ленца препятствует изменению тока в контуре. **Собственный магнитный поток**  $\Phi$ , пронизывающий контур или катушку с током, пропорционален силе тока  $I$ :  $\Phi = LI$ . Коэффициент пропорциональности  $L$  в этой формуле называется **коэффициентом самоиндукции** или **индуктивностью** катушки. Единица индуктивности в СИ называется **генри** (Гн). Индуктивность контура или катушки равна 1 Гн, если при силе постоянного тока 1 А собственный поток равен 1 Вб:  $1 \text{ Гн} = 1 \text{ Вб} / 1 \text{ А}$ .

**ЭДС самоиндукции**, возникающая в катушке с постоянным значением индуктивности, согласно формуле Фарадея равна:  $\varepsilon_{\text{инд}} = \varepsilon_L = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$ . ЭДС самоиндукции прямо пропорциональна индук-

тивности катушки и скорости изменения силы тока в ней. Ну а теперь давайте подумаем чему будет равна ЭДС самоиндукции, если скорость изменения силы тока увеличиться в 4 раза.

**Ответ: 5.**

**A15. Математическим маятником** называют тело небольших размеров, подвешенное на тонкой нерастяжимой нити, масса которой пренебрежимо мала по сравнению с массой тела. В положении равновесия, когда маятник висит по отвесу, сила тяжести уравнивается силой натяжения нити. При отклонении маятника из положения равновесия и последующем предоставлении маятника самому себе возникают механические колебания. Период колебаний математического маятника находится по фор-

муле  $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ . Такая формула справедлива для случая, когда точка подвеса покоится или движется равномерно. Из формулы для периода колебаний математического маятника можно выразить ускорение свободного падения

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \Rightarrow (T)^2 = \left(2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}\right)^2 \Rightarrow T^2 = 4\pi^2 \frac{l}{g} \Rightarrow g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$$

Зачем это сделали? Есть тип задач в котором Вам предложат найти ускорение свободного падения на некоторой планете исходя из длины маятника и периода его колебаний. По условию задачи

$$T_2 = 2T_1 \Rightarrow 2\pi\sqrt{\frac{l_1 + \Delta l}{g}} = 2 \cdot 2\pi\sqrt{\frac{l_1}{g}} \Rightarrow \sqrt{l_1 + \Delta l} = 2\sqrt{l_1}$$

Возведем во вторую степень обе части уравнения:  $(\sqrt{l_1 + \Delta l})^2 = (2\sqrt{l_1})^2 \Rightarrow l_1 + \Delta l = 4l_1 \Rightarrow l_1 = \frac{\Delta l}{3}$

**Ответ: 1.**

**A16. Законы геометрической оптики** не могут объяснить такие явления, как интерференция, дифракция, дисперсия, поляризация. Для понимания этих явлений надо знать, что свет это электромагнитная волна. Диапазон длин волн видимого света лежит от 380 нм (фиолетовый свет) до 770 нм (красный свет). Существование электромагнитных волн было теоретически предсказано английским физиком Дж. Максвеллом в 1864 году. Из теории Максвелла (саму теорию изучать не будем из-за ее сложности) вытекает ряд важных выводов:

1. Существуют электромагнитные волны, то есть распространяющееся в пространстве и во времени электромагнитное поле. Электромагнитные волны **поперечны** – векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  перпендикулярны друг другу и лежат в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны.

2. Электромагнитные волны распространяются в веществе с **конечной скоростью**  $v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0}}$ .

Здесь  $\varepsilon$  и  $\mu$  – диэлектрическая и магнитная проницаемости вещества среды,  $\varepsilon_0$  и  $\mu_0$  – электрическая и магнитная постоянные:  $\varepsilon_0 = 8,85419 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ ,  $\mu_0 = 1,25664 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$ .

Скорость электромагнитных волн в вакууме (для вакуума  $\varepsilon = \mu = 1$ ):

$$c = v = 1/\sqrt{\varepsilon_0\mu_0} = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ м/с} = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$$



Скорость  $c$  распространения электромагнитных волн в вакууме является одной из фундаментальных физических постоянных. Если электромагнитная волна распространяется в какой-либо среде, то скорость ее распространения уменьшается в  $n$  раз:  $v = \frac{c}{n}$ , где  $n$  – показатель преломления среды – физическая величина, показывающая во сколько раз скорость света в данной среде меньше чем в вакууме. При переходе электромагнитной волны из вакуума в некоторую среду меняется длина волны  $\lambda_{\text{среды}} = \frac{\lambda_{\text{вакуум}}}{n}$ . Напомню, что длина волны это расстояние, которое проходит волна за время равное периоду колебаний точек волны  $\lambda = vT = \frac{v}{\nu}$ , где  $v$  – скорость распространения волны,  $T$  – период колебаний точек волны,  $\nu$  – частота точек волны.

**Частота волны (как и период) остаются неизменными при переходе волны из среды 1 в среду 2.**

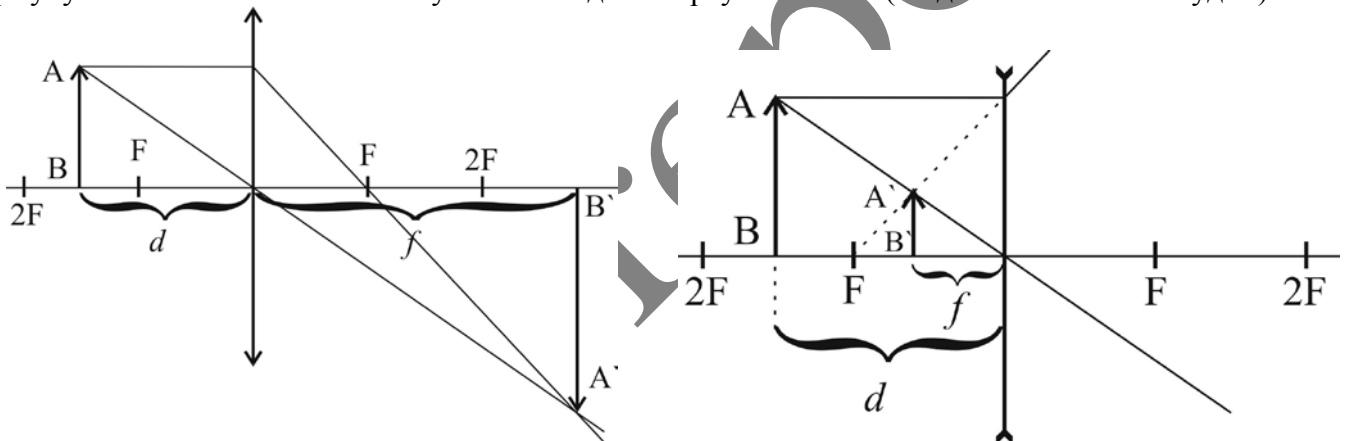
**Поэтому при решении задач удобно пользоваться соотношением**  $v_1 = v_2 \Rightarrow \frac{v_1}{\lambda_1} = \frac{v_2}{\lambda_2}$ .

Решите задачу самостоятельно.

**Ответ: 1.**

**A17.** Положение изображения относительно линзы можно рассчитать с помощью **формулы тонкой линзы**. Если расстояние от предмета до линзы обозначить через  $d$ , а расстояние от линзы до изображения через  $f$ , то формулу тонкой линзы можно записать в виде:  $\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F} = D$ .

Формулу тонкой линзы можно получить из подобия треугольников (но делать мы это не будем).



Величину  $D$ , обратную фокусному расстоянию, называют **оптической силой** линзы. Единица измерения оптической силы является 1 **диоптрия** (дптр). Диоптрия – оптическая сила линзы с фокусным расстоянием 1 м:

$$1 \text{ дптр} = \text{м}^{-1}.$$

## \* \* \* ПРАВИЛА ЗНАКОВ \* \* \*

Фокусным расстояниям линз принято приписывать определенные знаки:

для собирающей линзы  $F > 0$ , для рассеивающей  $F < 0$ .

Величины  $d$  и  $f$  также подчиняются определенному правилу знаков:

$d > 0$  для действительных предметов (то есть реальных источников света, а не продолжений лучей, сходящихся за линзой)

$f > 0$  – для действительных изображений;

$f < 0$  – для мнимых изображений.

Для случая, изображенного на первом рисунке, имеем:  $F > 0$  (линза собирающая),  $d > 0$  (действительный предмет). По формуле тонкой линзы получим, что  $f > 0$ , следовательно, изображение действительное.

В случае, изображенном на втором рисунке,  $F < 0$  (линза рассеивающая),  $d > 0$  (действительный предмет),  $f < 0$ , то есть изображение мнимое.

В зависимости от положения предмета по отношению к линзе изменяются линейные размеры изображения. **Линейным увеличением** линзы  $\Gamma$  называют отношение линейных размеров изображения  $h'$  и

предмета  $h$ . Величине  $h'$ , удобно приписывать знаки плюс или минус в зависимости от того, является изображение прямым или перевернутым. Величина  $h$  всегда считается положительной. Поэтому для прямых изображений  $\Gamma > 0$ , для перевернутых  $\Gamma < 0$ . Из подобия треугольников легко получить формулу для линейного увеличения тонкой линзы:  $\Gamma = \frac{h'}{h} = \frac{f}{d}$ .

Во многих оптических приборах свет последовательно проходит через две или несколько линз. Изображение предмета, даваемое первой линзой, служит предметом (действительным или мнимым) для второй линзы, которая строит второе изображение предмета. Это второе изображение также может быть действительным или мнимым. Расчет оптической системы из двух тонких линз сводится к двукратному применению формулы линзы, при этом расстояние  $d_2$  от первого изображения до второй линзы следует положить равным величине  $l - f_1$ , где  $l$  – расстояние между линзами. Рассчитанная по формуле линзы величина  $f_2$  определяет положение второго изображения и его характер ( $f_2 > 0$  – действительное изображение,  $f_2 < 0$  – мнимое изображение). Общее линейное увеличение  $\Gamma$  системы из двух линз равно произведению линейных увеличений обеих линз:  $\Gamma = \Gamma_1 \cdot \Gamma_2$ . Если предмет или его изображение находятся в бесконечности, то линейное увеличение утрачивает смысл.

При решении задач помните:

1. У линзы два фокуса – передний (обычно с этой же стороны расположен предмет, то есть справа) и задний.
2. Расстояние от предмета до линзы –  $d$ .
3. Расстояние от линзы до изображения (или до экрана) –  $f$ .
4. Если на место одной линзы поставили другую, не изменив при этом начального положения предмета, то  $d_1 = d_2 = d$ .
5. Если линза помещена между предметом и экраном и это расстояние равно  $L$ , то  $d + f = L$ .
6. Если линза собирающая, то:  $\frac{1}{d} \pm \frac{1}{f} = \frac{1}{F}$
7. Если линза рассеивающая, то:  $\frac{1}{d} - \frac{1}{f} = -\frac{1}{F}$
8. Если при решении задачи вам не дана оптическая сила и ее не надо находить, то можете решать задачу считая все расстояния в см. Если же наоборот – обязательно переводите все расстояния в метры.

По условию задачи  $\Gamma = \frac{f}{d} \Rightarrow f = \Gamma d = 48$  (см). Теперь запишем формулу тонкой линзы с учетом того, что у нас собирающая линза (только собирающая линза может дать действительное изображение)

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{f + d}{fd} \Rightarrow F = \frac{fd}{f + d} = 12 \text{ (см)}.$$

Ответ: 2.

**A18.** В настоящее время твердо установлено, что **атомные ядра различных элементов состоят из двух частиц – протонов и нейтронов**. Первая из этих частиц представляет собой атом водорода, из которого удален единственный электрон. По современным измерениям, положительный заряд протона в точности равен **элементарному заряду**  $e = 1,60217733 \cdot 10^{-19}$  Кл, то есть равен по модулю отрицательному заряду электрона. Такое совпадение зарядов двух непохожих друг на друга частиц вызывает удивление и остается одной из фундаментальных загадок современной физики. **Масса протона**, по современным измерениям, равна:  $m_p = 1,67262 \cdot 10^{-27}$  кг.

В ядерной физике массу частицы часто выражают в атомных единицах массы (а. е. м.), равной 1/12 массы атома углерода с массовым числом 12:  $1 \text{ а. е. м.} = 1,66057 \cdot 10^{-27}$  кг.

Следовательно,  $m_p = 1,007276 \cdot \text{а. е. м.}$  Во многих случаях массу частицы удобно выражать в эквивалентных значениях энергии в соответствии с формулой:  $E = mc^2$ .

Так как  $1 \text{ эВ} = 1,60218 \cdot 10^{-19}$  Дж, в энергетических единицах масса протона равна 938,272331 МэВ.

Вторая элементарная частица – **нейтрон**. По современным измерениям, **масса нейтрона**

$$m_n = 1,67493 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,008665 \text{ а. е. м.}$$

В энергетических единицах масса нейтрона равна 939,56563 МэВ. Масса нейтрона приблизительно на две электронные массы превосходит массу протона.

Сразу же после открытия нейтрона российский ученый Д. Д. Иваненко и немецкий физик В. Гейзенберг выдвинули гипотезу о протонно–нейтронном строении **атомных ядер**, которая полностью подтвердилась последующими исследованиями.

### ПРОТОНЫ И НЕЙТРОНЫ ПРИНЯТО НАЗЫВАТЬ НУКЛОНАМИ.

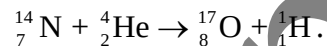
Для характеристики атомных ядер вводится ряд обозначений. Число протонов, входящих в состав атомного ядра, обозначают символом  $Z$  и называют **зарядовым числом** или атомным номером (это порядковый номер в периодической таблице Менделеева). Заряд ядра равен  $Ze$ , где  $e$  – элементарный заряд. Число нейтронов обозначают символом  $N$ . Общее число нуклонов (то есть протонов и нейтронов) называют **массовым числом**  $A$ :  $A = Z + N$ .

Ядра химических элементов обозначают символом  ${}_Z^AX$ , где  $X$  – химический символ элемента. Например,  ${}_1^1H$  – водород,  ${}_{-1}^0e$  – электрон,  ${}_{+1}^0e$  – позитрон (электрон, имеющий положительный заряд),  ${}_2^4He$  – гелий ( $\alpha$ -частица),  ${}_8^{16}O$  – кислород,  ${}_6^{12}C$  – углерод,  ${}_{92}^{238}U$  – уран.

Как определять число протонов и нейтронов. На примере урана  ${}_{92}^{238}U$  – число протонов:  $N_p = Z = 92$ , число нейтронов:  $N_n = A - Z = 238 - 92 = 146$ .

**Ядерная реакция – это процесс взаимодействия атомного ядра с другим ядром или элементарной частицей, сопровождающийся изменением состава и структуры ядра и выделением вторичных частиц или  $\gamma$ -квантов.**

В результате ядерных реакций могут образовываться новые радиоактивные изотопы, которых нет на Земле в естественных условиях. Первая ядерная реакция была осуществлена Э. Резерфордом в 1919 году в опытах по обнаружению протонов в продуктах распада ядер. Резерфорд бомбардировал атомы азота  $\alpha$ -частицами. При соударении частиц происходила ядерная реакция, протекавшая по следующей схеме:



При ядерных реакциях выполняется несколько **законов сохранения**: импульса, энергии, момента импульса, заряда. В дополнение к этим классическим законам сохранения при ядерных реакциях выполняется закон сохранения так называемого **барионного заряда** (то есть числа нуклонов – протонов и нейтронов). Например, имеем реакцию вида



Сразу можем записать, что

$$a + b = c + d \text{ и } A + B = C + D.$$

**Это значит, что общее число нуклонов до и после реакции остается неизменным.**

По условию задачи у нас был бета-распад. Следовательно,

$${}_{91}^{232}Pa \rightarrow {}_{-1}^0e + {}_Z^AX \Rightarrow 91 = -1 + Z \Rightarrow Z = 92 \Rightarrow N = A - Z = 232 - 92 = 140$$

**Ответ: 1.**

**B1.** И опять я предлагаю вам скачать у меня с сайта [www.repet.by](http://www.repet.by) раздел «Кинематика» и внимательно изучить параграфы 1.06 и 1.10. Весь путь, пройденный спортсменом, можно разбить на две части: разгон до максимальной скорости и равномерный бег. При этом первую часть пути мы рассчитаем через среднюю скорость движения спортсмена:  $l = l_1 + l_2 = \frac{0+v}{2}t_1 + vt_2 = \frac{v}{2}t_1 + vt_2$

Подставив числа мы найдем скорость, до которой разогнался спортсмен

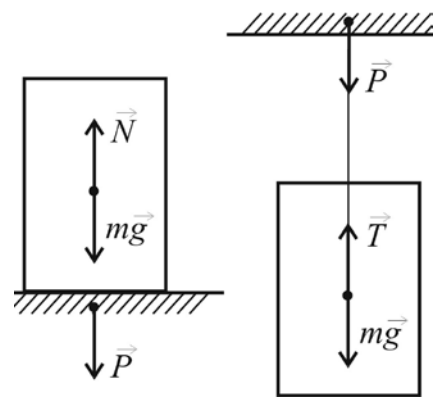
$$l = \frac{v}{2}t_1 + vt_2 \Rightarrow 96 = \frac{4}{2}v + 6v = 8v \Rightarrow v = 12 \text{ (м/с)}$$

А теперь самостоятельно найдите ускорение. И не забудьте перевести его в  $\text{дм/с}^2$ !!!

**Ответ: 30.**

**B2.** Поговорим немного о весе тела. Силу тяжести  $m\vec{g}$ , с которой тела притягиваются к Земле, нужно отличать от **веса тела**. Понятие веса широко используется в повседневной жизни.

Весом тела называют **СИЛУ**, с которой тело вследствие притяжения его к земле действует на опору или подвес. **Вес – сила, измеряется в ньютонах, а не в килограммах!!!**



При этом предполагается, что тело неподвижно **относительно опоры или подвеса** (однако может двигаться вместе с опорой или подвесом, о чем чуть ниже).

Пусть тело лежит на неподвижном относительно Земли горизонтальном столе (см. рисунок). На тело действуют сила тяжести  $F_T = mg$ , направленная вертикально вниз, и сила упругости  $F_{\text{упругости}} = N$ , с которой опора действует на тело. Силу  $N$  называют **силой нормального давления** или **силой реакции опоры**. Силы, действующие на тело, уравнивают друг друга:  $mg = N$ .

В соответствии с третьим законом Ньютона **тело действует на опору** с некоторой силой  $P$  равной по модулю силе реакции опоры и направленной **в противоположную сторону**:  $\vec{P} = -\vec{N}$

(знак минус говорит о том, что вектора направлены в противоположные стороны).

По определению, сила  $P$  и называется **весом тела**. Из приведенных выше соотношений видно, что

$$P = F_T = mg,$$

то есть вес тела  $P$  равен силе тяжести  $mg$  (**ТОЛЬКО КОГДА ТЕЛО НАХОДИТСЯ В ПОКОЕ**).

**Эти силы приложены к разным телам и имеют разную природу! Сила тяжести – гравитационную природу, вес, как и сила упругости, – электромагнитную.**

Если же тело подвешено на нити (см. рисунок выше) то вместо силы реакции опоры  $N$  появляется сила натяжения нити  $T$ . Остальные рассуждения остаются такими же. Если тело неподвижно висит на пружине, то роль силы реакции опоры (подвеса) играет упругая сила пружины. По растяжению пружины можно определить вес тела и равную ему силу притяжения тела Землей.

Рассмотрим теперь случай, когда тело лежит на опоре (или подвешено на пружине) в кабине лифта, движущейся с некоторым ускорением  $a$  относительно Земли. На тело по-прежнему действуют сила тяжести  $mg$ , и сила реакции опоры  $N$ , но теперь эти силы не уравнивают друг друга. По второму закону Ньютона:  $m\vec{g} + \vec{N} = m\vec{a}$ .

Пусть вектор ускорения  $\vec{a}$  направлен по вертикали вниз (см. рисунок). Тогда

$$mg - N = ma \Rightarrow N = mg - ma = m(g - a), \text{ откуда } P = m(g - a)$$

Из формулы видно, что вес тела  $P$  в ускоренно движущемся вертикально вниз лифте меньше нормального веса. Наконец, если

$$a = g, \text{ то } P = 0$$

(тело свободно падает на Землю вместе с кабиной, см. рисунок).

Такое состояние называется **невесомостью**. Оно возникает, например, в кабине космического корабля при его движении по орбите с выключенными реактивными двигателями.

Если вектор ускорения  $a$  направлен вертикально вверх (см. рисунок), то второй закон Ньютона запишется в виде:  $N - mg = ma \Rightarrow N = mg + ma = m(g + a)$

Следовательно, вес тела будет равен:  $P = m(g + a)$

то есть вес тела всегда будет превышать по модулю нормальный вес.

Возвращаемся к нашей задаче. Давление, оказываемое мальчиком на пол лифта, равно отношению веса мальчика в лифте к площади соприкосновения обу-

$$\text{ви с лифтом: } p = \frac{F}{S} = \frac{P}{S} = \frac{m(g - a)}{S}$$

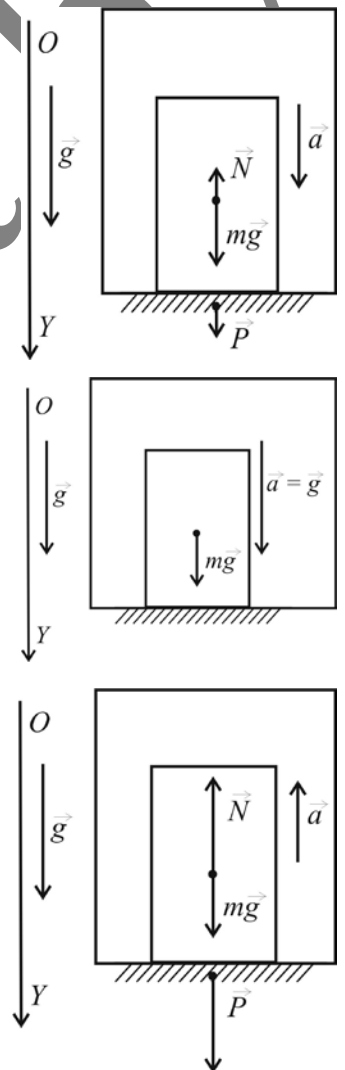
**Ответ: 12.**

**В3.** Простая задача, в которой удар шайбы о борт в целом ни на что не влияет (из-за того, что скорость после удара не изменяется). В начале движения шайба обладает кинетической энергией. В процессе движения скорость шайбы падает, так как сила трения совершает отрицательную работу. В результате действия силы трения шайба остановится пройдя некоторый путь  $S$ .

$$E_{\text{кинетическая}} = A_{\text{трения}} \Rightarrow \frac{mv^2}{2} = F_{\text{тр}} S \Rightarrow \frac{mv^2}{2} = \mu mg S \Rightarrow S = \frac{v^2}{2\mu g} = 60 \text{ (метров).}$$

А теперь обязательно вычтем путь, пройденный шайбой до удара о стенку.

**Ответ: 35.**



**В4.** При взаимодействии тел **импульс** одного тела может частично или полностью передаваться другому телу. В замкнутой системе векторная сумма импульсов всех тел, входящих в систему, остается постоянной при любых взаимодействиях тел этой системы между собой (если на систему тел не действуют внешние силы со стороны других тел, такая система называется замкнутой).

Этот фундаментальный закон природы называется **законом сохранения импульса**. Следствием его являются **законы Ньютона**.

Второй закон Ньютона:  $\vec{F}\Delta t = \Delta \vec{p}$ . Если  $\vec{F} = 0$ , то  $\vec{F}\Delta t = \vec{p} - \vec{p}_0 = 0 \Rightarrow \vec{p} = \text{const}$ , то есть если на тело или систему тел не действуют **ВНЕШНИЕ** силы или результирующая этих сил равна нулю, то **изменение импульса (А НЕ САМ ИМПУЛЬС)** тоже равно нулю. То есть импульс тела (или суммарный импульс системы тел) не изменяется.

Аналогично это можно применить для равенства нулю **проекции силы** на выбранную ось. Если

$$F_x = 0 \Rightarrow p_x = \text{const} \quad \text{или} \quad p_{1x} = p_{2x},$$

где  $p_{1x}$  – проекция импульса на ось OX в начальный момент времени,  $p_{2x}$  – в конечный.

**При этом сами импульсы могут меняться, а их сумма остается постоянной.**

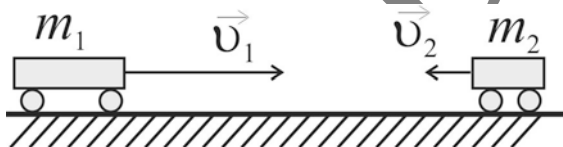
Для случая взаимодействия двух тел закон сохранения импульса часто записывают в виде:

$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_1\vec{u}_1 + m_2\vec{u}_2,$$

где  $m_1\vec{v}_1$  и  $m_1\vec{u}_1$  – импульс первого тела до и после взаимодействия,  $m_2\vec{v}_2$  и  $m_2\vec{u}_2$  – импульс второго тела до и после взаимодействия. Это равенство означает, что в результате взаимодействия двух тел их **СУММАРНЫЙ ИМПУЛЬС** не изменился.

**ПРИМЕР.** Тележка массой  $m_1 = 6$  кг движется навстречу тележке массой  $m_2 = 10$  кг. Определить скорость тележек после неупругого соударения, если скорость первой тележки до удара 4 м/с, второй тележки 2 м/с.

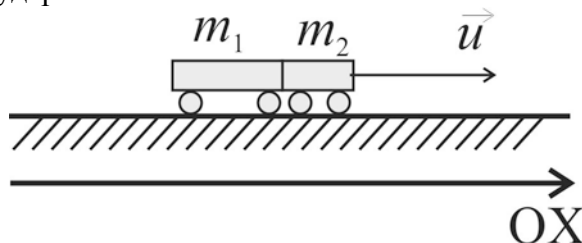
Сделаем пояснительный рисунок.



По условию задачи удар является неупругим. Это значит, что после удара тележки будут двигаться как одно целое. В каком направлении тележки продолжат движение? Есть два способа как это определить.

1. Решать задачу так, как будто обе тележки продолжают движение в направлении первоначального движения первой тележки. Если в ответе выскочит знак «-», значит, Вы ошиблись, и обе тележки будут двигаться в обратном направлении.
2. Импульс первой тележки до удара  $p_1 = m_1v_1 = 24$  кг•м/с. Импульс второй  $p_2 = m_2v_2 = 20$  кг•м/с. А теперь угадайте с трех раз какая тележка победит в столкновении. Именно этот способ я и рекомендую.

Делаем второй рисунок, на котором показываем дальнейшее движение тележек. Ось OX направляем по ходу движения тележек после удара



Запишем закон сохранения импульса в векторной форме:  $m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = (m_1 + m_2)\vec{u}$

Обращаю Ваше внимание на то, что скорость тележек после удара удобней обозначить другой буквой, например  $u$ . Это избавит Вас от путаницы со штрихованными скоростями.

В проекции на ось OX уравнение примет вид:  $m_1v_1 - m_2v_2 = (m_1 + m_2)u$ . У второго тела импульс до удара отрицательный, так как второе тело до удара двигалось **против** оси OX. Теперь найдем скорость тележек после удара:  $u = \frac{m_1v_1 - m_2v_2}{m_1 + m_2}$ .



Таким образом, для того чтобы найти скорость тележек после неупругого удара нам совсем не обязательно знать какие силы действовали на тележки во время удара, как он происходил и много других подробностей. Нам достаточно знать импульсы тележек до удара и все!!! В ЭТОМ И ЕСТЬ ЗАМЕЧАТЕЛЬНАЯ ОСОБЕННОСТЬ ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА.

Механической энергией называется сумма кинетической энергии (энергии движения) и потенциальной энергии (энергия взаимодействия тел силами тяготения и упругости) тела.

Если при движении тела (системы тел) его механическая энергия не переходит ни в какие другие формы энергии (например, внутреннюю [тепловую] энергию), то сумма кинетической и потенциальной энергии тела (системы тел) остается неизменной:  $E_{k1} + E_{p1} = E_{k2} + E_{p2}$

Это утверждение выражает закон сохранения энергии (ЗСЭ) в механических процессах.

Во всех задачах на ЗСЭ всегда будет как минимум два состояния системы тел. Закон гласит, что суммарная энергия первого состояния будет равна суммарной энергии второго состояния.

Если же полная энергия тела уменьшается, то изменение механической энергии будет равно работе силы трения или потерям энергии или количеству выделившегося тепла.

### АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ НА ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ.

1. Найти точки начального и конечного положения тела. Сделать пояснительный рисунок.
2. Записать какой или какими энергиями обладает тело в данных точках.
3. Приравнять суммарную начальную и конечную энергию тела.

Вернемся к нашей задаче. При решении задач такого типа надо помнить, что условие прохождения верхней точки при вращении на нити с минимальной скоростью: СИЛА РЕАКЦИИ ОПОРЫ  $N$  в верхней точке равна 0. Такое же условие выполняется при прохождении верхней точки мертвой петли. При вращении на стержне условие прохождения всей окружности: МИНИМАЛЬНАЯ СКОРОСТЬ в верхней точке равна 0.

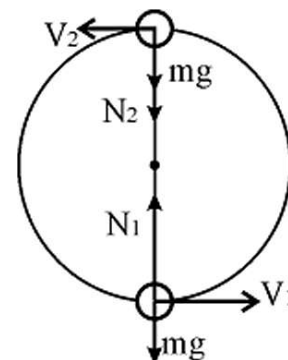
Условие прохождения верхней точки на нити с минимальной скоростью:  $N_2 = 0$ .

Тогда в верхней точке  $(M + m) \frac{v_2^2}{L} = (M + m)g$ . По закону сохранения энергии:

$$E_{кин1} = E_{кин2} + E_{потенц2} \Rightarrow \frac{(M + m)v_1^2}{2} = \frac{(M + m)v_2^2}{2} + 2(M + m)gL$$

(за нулевой уровень берем нижнее положение шарика с пулей). Теперь нам осталось найти скорость шарика с пулей в нижней точке. В этом нам поможет закон сохранения импульса:  $mv_0 = (m + M)v_1$ . Дорешайте задачу самостоятельно.

Ответ: 60.



**В5.** Идеальный газ – это газ, молекулы которого не взаимодействуют друг с другом, за исключением процессов упругого столкновения. Молекулы такого газа считают материальными точками.

В молекулярно-кинетической теории вводится новая величина – количество вещества, которую принято считать пропорциональной числу частиц. Единица количества вещества называется молем (моль).

**МОЛЬ** – это количество вещества, содержащее столько же частиц (атомов, молекул), сколько содержится атомов в 0,012 кг углерода  $^{12}\text{C}$ .

Молекула углерода состоит из одного атома. В некотором роде 1 моль подобен единице измерения дюжине (или просто двенадцати). Ведь не имеет значения чего будет дюжина: стульев, столов, учебников, машин, планет. То же самое с молем: не важно какого вещества будет 1 моль. Важно, что мы будем иметь определенное количество частиц вещества. Таким образом, в одном моле **любого вещества** содержится одно и то же число частиц (атомов или молекул). Это число называется **постоянной или числом Авогадро**:  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$  моль $^{-1}$ .

Таким образом в двух молях **ЛЮБОГО** вещества будет  $2 \cdot 6,02 \cdot 10^{23} = 12,04 \cdot 10^{23}$  частиц, в трех –  $3 \cdot 6,02 \cdot 10^{23} = 18,06 \cdot 10^{23}$  частиц, в половине моля –  $0,5 \cdot 6,02 \cdot 10^{23} = 3,01 \cdot 10^{23}$  частиц.

**ПОСТОЯННАЯ АВОГАДРО – ОДНА ИЗ ВАЖНЕЙШИХ ПОСТОЯННЫХ В МКТ!!!**

Количество вещества  $\nu$  (обозначается греческой буквой «ню», не путайте со скоростью  $v$ ) равно отношению числа  $N$  частиц (атомов или молекул) вещества к постоянной Авогадро  $N_A$ :  $\nu = \frac{N}{N_A}$ .

Массу одного моля вещества принято называть **молярной массой**  $M$ . Молярную массу можно найти умножив массу одной молекулы  $m_0$  данного вещества на постоянную Авогадро (то есть на количество частиц в одном моле):  $M = N_A \cdot m_0$

Молярная масса выражается в **килограммах на моль** (кг/моль). В таблице Менделеева молярная масса указана в граммах на моль. При решении задач молярную массу мы берем из таблицы Менделеева.

Например, молярная масса натрия Na – 23 г/моль или 0,023 кг/моль или 23 кг/кмоль. Молярная масса азота  $N_2$  –  $2 \cdot 14$  г/моль = 28 г/моль. А вот молярную массу сложных веществ Вам придется считать самостоятельно. Например, молярная масса воды  $H_2O$  –  $(2 \cdot 1 + 16)$  г/моль = 18 г/моль.

**Помните, что в системе СИ молярная масса обязательно имеет размерность кг/моль!!!**

При решении задач удобно пользоваться формулами:  $\nu = \frac{m}{M} = \frac{N}{N_A}$  и  $m_0 = \frac{m}{N} = \frac{M}{N_A}$ ,

где  $M$  – молярная масса,  $N_A$  – число Авогадро,  $m_0$  – масса одной частицы вещества,  $\nu$  – количество вещества,  $N$  – число частиц вещества, содержащееся в массе вещества  $m$ . **ЗАПОМНИТЕ ЭТИ ОБОЗНА-**

**ЧЕНИЯ!!!** Так же очень часто будет удобно использовать соотношение:  $\frac{m}{M} = \frac{N}{N_A}$

При своем движении молекулы газа непрерывно сталкиваются друг с другом. Из-за этого характеристики их движения меняются, поэтому, говоря об импульсах, скоростях, кинетических энергиях молекул, всегда имеют в виду **средние значения этих величин**.

Задача молекулярно-кинетической теории состоит в том, чтобы установить связь между **микроскопическими** (масса, скорость, кинетическая энергия молекул) и **макроскопическими** (давление, температура) **параметрами, характеризующими газ**.

Число столкновений молекул газа при нормальных условиях с другими молекулами измеряется миллионами раз в секунду. Если пренебречь размерами и взаимодействием молекул (как в модели **идеального газа**), то можно считать, что между последовательными столкновениями молекулы движутся **равномерно и прямолинейно**. Естественно, подлетая к стенке сосуда, в котором расположен газ, молекула испытывает столкновение и со стенкой. **Все столкновения молекул друг с другом и со стенками сосуда считаются абсолютно упругими столкновениями шариков**. При столкновении со стенкой импульс молекулы изменяется, значит, **на молекулу со стороны стенки действует сила** (вспомните второй закон Ньютона). Но по третьему закону Ньютона с точно такой же силой, направленной в противоположную сторону, **молекула действует на стенку**, оказывая на нее **ДАВЛЕНИЕ**. Совокупность всех ударов всех молекул о стенку сосуда и приводит к возникновению давления газа.

**Давление газа – это результат столкновений молекул со стенками сосуда.**

Если нет стенки или любого другого препятствия для молекул, то само понятие давления теряет смысл. Например, совершенно антинаучно говорить о давлении в центре комнаты, ведь там молекулы не давят на стенку. Почему же тогда, поместив туда барометр, мы с удивлением обнаружим, что он показывает какое-то давление? Потому, что сам по себе барометр является той самой стенкой, на которую и давят молекулы.

Поскольку давление есть следствие ударов молекул о стенку сосуда, очевидно, что его величина должна зависеть от характеристик отдельно взятых молекул (от средних характеристик, конечно, Вы ведь помните про то, что скорости всех молекул различны). Эта зависимость выражается **ОСНОВНЫМ УРАВ-**

**НЕНИЕМ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА:**  $p = \frac{1}{3} n m_0 v_{\text{кв}}^2$ ,

где  $p$  – давление газа,  $n$  – концентрация молекул газа,  $m_0$  – масса одной молекулы,  $v_{\text{кв}}$  – средняя квадратичная скорость (для простоты понимания считайте ее просто средней скоростью; обратите так же внимание, что в самом уравнении стоит квадрат средней квадратичной скорости). Физический смысл этого уравнения состоит в том, что оно устанавливает связь между характеристикой всего газа целиком (давлением) и параметрами движения отдельных молекул газа, то есть связь между макро- и микромиром.

### СЛЕДСТВИЯ ИЗ ОСНОВНОГО УРАВНЕНИЯ

Если Вы думаете, что на последней формуле в данном разделе все закончится, то Вы сильно ошибаетесь. **ФОРМУЛ БУДЕТ ОЧЕНЬ МНОГО!!!** И это будут не все возможные формулы, а лишь их часть. Остальные вы должны научиться получать сами.

**1. Начинаю играть в формулы (помножим и поделим уравнение на 2)**

$$p = \frac{1}{3} n m_0 v_{\text{кв}}^2 = \frac{2}{3} n \frac{m_0 v_{\text{кв}}^2}{2} = \frac{2}{3} n E_K \Rightarrow p = \frac{2}{3} n E_K,$$

где  $E_K$  – средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы идеального газа.

2. Продолжим игры. Теперь опять вернемся к исходному уравнению и раскроем концентрацию

$$p = \frac{1}{3} n m_0 v_{\text{кв}}^2 = \frac{1}{3} \frac{N}{V} m_0 v_{\text{кв}}^2 = \frac{1}{3} \frac{N m_0}{V} v_{\text{кв}}^2 = \frac{1}{3} \frac{m}{V} v_{\text{кв}}^2 = \frac{1}{3} \rho v_{\text{кв}}^2 \Rightarrow p = \frac{1}{3} \rho v_{\text{кв}}^2,$$

где  $\rho$  – плотность газа,  $m = N m_0$  – масса всего вещества.

3. Как уже было отмечено в предыдущем параграфе, скорость теплового движения молекул определяется температурой вещества. Для идеального газа эта зависимость выражается простой формулой

$$v_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}},$$

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

Сразу же оговоримся, что далее во всех задачах Вы должны, не задумываясь, **ПЕРЕВОДИТЬ ТЕМПЕРАТУРУ В КЕЛЬВИНЫ ИЗ ГРАДУСОВ ЦЕЛЬСИЯ** (кроме задач на уравнение теплового баланса (тема 7), где вы в основном будете иметь дело с изменением температуры, а не самой температурой), пользуясь простым правилом: **В ГРАДУСАХ ДУМАЮТ ТОЛЬКО АЛКОГОЛИКИ!!!** Это же правило можно, кстати, применять и в кинематике, переводя углы из градусов в радианы.

Дальнейшие игры в формулы приведут нас к **ЗАКОНУ ТРЕХ ПОСТОЯННЫХ**

$$k \cdot N_A = R,$$

где  $R = 8,31$  Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная. Значит,  $v_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3 \cdot k N_A \cdot T}{m_0 N_A}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$ .

Запомнить эту формулу очень легко. На физическом сленге она называется формулой трех голодных животных:

$$v_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{\text{Три КоТа}}{\text{Мышка}}} - \text{Три кота на мышку.} \quad v_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} = \sqrt{\frac{\text{Три РТа}}{\text{Миска}}} - \text{Три рта на миску.}$$

4. Итак, игры в формулы продолжаются. Подставим в формулу для **энергии одной молекулы** значение

ее скорости:  $E_K = \frac{m_0 v_{\text{кв}}^2}{2} = \frac{3m_0 kT}{2m_0} = \frac{3}{2} kT \Rightarrow E_K = \frac{3}{2} kT.$

Оказывается, что средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул зависит только от температуры и одинакова при данной температуре для всех молекул. Если в задаче Вас попросят найти энергию молекул, содержащихся некотором количестве вещества, то надо будет просто умножить энергию одной молекулы на количество молекул:

$$E_K = N \cdot \frac{3}{2} kT = \frac{m}{M} N_A \cdot \frac{3}{2} kT = \frac{3}{2} \frac{m}{M} (N_A \cdot k) T = \frac{3}{2} \nu RT$$

5. Далее  $p = \frac{1}{3} n m_0 v_{\text{кв}}^2 = \frac{1}{3} n m_0 \frac{3kT}{m_0} = nkT \Rightarrow p = nkT.$

6. Мы уже близки к финалу  $p = nkT = \frac{N}{V} kT.$

Следовательно,  $pV = NkT.$

**ВНИМАТЕЛЬНО ЧИТАЙТЕ УСЛОВИЕ ЗАДАЧИ И ВЫБИРАЙТЕ НАИБОЛЕЕ ПОДХОДЯЩУЮ ПОД УСЛОВИЕ ФОРМУЛУ.**

### НЕМНОГО ТЕОРИИ О ТЕМПЕРАТУРЕ

Понятие температуры тесно связано с понятием **теплового равновесия**. Тела, находящиеся в контакте друг с другом, могут обмениваться энергией. Энергия, передаваемая одним телом другому при тепловом контакте, называется **количеством теплоты**.

**Тепловое равновесие** – это такое состояние системы тел, находящихся в тепловом контакте, при котором не происходит теплопередачи от одного тела к другому, и все макроскопические параметры тел остаются неизменными. Температура – это физический параметр, одинаковый для всех тел, находящихся в тепловом равновесии. Для измерения температуры используются физические приборы – **термометры (НЕ ГРАДУСНИКИ, А ИМЕННО ТЕРМОМЕТРЫ!!!)**, в которых о величине температуры судят по изменению какого-либо физического параметра. Для создания термометра необходимо выбрать **термометрическое вещество** (например, ртуть, спирт) и **термометрическую величину**, характеризующую свойство вещества (например, длина ртутного или спиртового столбика). В различных конструкциях термометров используются разнообразные физические свойства вещества (например, изменение

линейных размеров твердых тел или изменение электрического сопротивления проводников при нагревании).

Термометры должны быть откалиброваны. Для этого их приводят в тепловой контакт с телами, температуры которых считаются заданными. Чаще всего используют простые природные системы, в которых температура остается неизменной, несмотря на теплообмен с окружающей средой – это смесь льда и воды и смесь воды и пара при кипении при нормальном атмосферном давлении. По температурной **шкале Цельсия** точке плавления льда приписывается температура  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а точке кипения воды  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Изменение длины столба жидкости в капиллярах термометра на одну сотую длины между отметками  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  принимается равным  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В ряде стран (например в США) широко используется **шкала Фаренгейта** ( $T_F$ ), в которой температура замерзающей воды принимается равной  $32\text{ }^{\circ}\text{F}$ , а температура кипения воды равной  $212\text{ }^{\circ}\text{F}$ . Следовательно,  $T_F = \frac{9}{5}T_C + 32$  или  $T_C = \frac{5}{9}(T_F - 32)$ .

Английский физик У. Кельвин (Томсон) в 1848 г. предложил использовать точку нулевого давления газа для построения новой температурной шкалы (**шкала Кельвина**). В этой шкале единица измерения температуры такая же, как и в шкале Цельсия, но нулевая точка сдвинута:  $T(\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273,15$ .

В системе СИ принято единицу измерения температуры по шкале Кельвина называть **кельвином** и обозначать буквой К. Например, комнатная температура  $T_C = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  по шкале Кельвина равна  $T_K = 293,15\text{ K}$ . Температурная шкала Кельвина называется **абсолютной шкалой температур**. Она оказывается наиболее удобной при построении физических теорий. При решении задач считайте, что  $T_K = T_C + 273$ .

При решении задач нет необходимости переводить **ИЗМЕНЕНИЕ** температуры!!! То есть изменение температуры на  $20\text{ K}$  НИКОГДА не будет равно изменению температуры на  $293\text{ }^{\circ}\text{C}$ !!! Например, была температура  $290\text{ K}$ . Стала  $310\text{ K}$ . Изменение составит  $20\text{ K}$ . Если перевести в градусы Цельсия, то начальная температура была  $T_1 = 290 - 273 = 17\text{ }^{\circ}\text{C}$ , конечная стала  $T_2 = 310 - 273 = 37\text{ }^{\circ}\text{C}$ , то есть **ИЗМЕНЕНИЕ** равно  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ !!!

Вернемся к нашей задаче.

$$\begin{aligned} v_{\text{кв}2} &= \sqrt{\frac{3RT}{M_2}} \\ v_{\text{кв}1} &= \sqrt{\frac{3RT}{M_1}} \end{aligned} \Rightarrow \frac{v_{\text{кв}2}}{v_{\text{кв}1}} = \frac{\sqrt{\frac{3RT}{M_2}}}{\sqrt{\frac{3RT}{M_1}}} = \sqrt{\frac{M_1}{M_2}} \Rightarrow v_{\text{кв}2} = v_{\text{кв}1} \sqrt{\frac{M_1}{M_2}}$$

**Ответ:** 477.

**В6.** Если в результате теплообмена телу передается некоторое количество теплоты, то внутренняя энергия тела и, естественно, его температура изменяются. Количество теплоты  $Q$ , необходимое для нагревания  $1\text{ кг}$  вещества на  $1\text{ K}$  называют **удельной теплоемкостью вещества**  $c$ :  $Q = cm(t_2 - t_1) = cm\Delta t$ .

При этом в этой формуле абсолютно не важно в каких единицах подставлена температура, так как нам важно не ее абсолютное значение, а **ИЗМЕНЕНИЕ!** Поэтому **НЕ ВАЖНО** в каких единицах мы будем подставлять температуру!!! Единица измерения удельной теплоемкости вещества

$$c = \frac{Q}{m\Delta t}; \quad [c] = \frac{1\text{ Дж}}{1\text{ кг} \cdot 1\text{ }^{\circ}\text{C}}.$$

**Физический смысл УДЕЛЬНОЙ теплоёмкости вещества:** она показывает, какое количество теплоты надо сообщить телу массой  $1\text{ кг}$ , чтобы нагреть его на один градус.

Например, теплоемкость воды  $4200\text{ Дж/кг}^{\circ}\text{C}$ , следовательно для того чтобы нагреть  $1\text{ кг}$  воды на  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  надо затратить  $4200\text{ Дж}$  энергии. Чем больше теплоемкость тела, тем медленней оно нагревается, и, естественно, тем медленней тело остывает.

Если  $t_2 > t_1$ , то  $Q > 0$  – тело нагревается (получает тепло). Если  $t_2 < t_1$ , то  $Q < 0$  – тело охлаждается (отдает тепло).

Процесс перехода из жидкого состояния в газообразное (**парообразование**) или из твердого в жидкое (**плавление**) может происходить только при сообщении веществу некоторого количества теплоты.

Простой пример. Вы ставите на плиту чайник с водой и доводите воду до кипения. Вода в чайнике кипит. Что будет, если выключить конфорку? Правильно, кипение прекратится. То есть для того, чтобы вода полностью превратилась в пар, конфорка должна продолжать работать и постоянно передавать воде тепло, необходимое для превращения воды в пар.

Обратные фазовые переходы (**конденсация и кристаллизация [отвердевание]**) сопровождаются **ВЫ-**



**ДЕЛЕНИЕМ ТАКОГО ЖЕ КОЛИЧЕСТВА ТЕПЛОТЫ.** То есть если на плавление некоторого количества металла мы затратили 1000 Дж, то те же 1000 Дж выделяются при затвердевании такого же количества металла.

Количество теплоты, поступающее в систему или выделяющееся из нее, изменяет ее внутреннюю энергию. Это означает, что внутренняя энергия пара при 100 °С больше, чем, чем внутренняя энергия жидкости при той же температуре. Указанные фазовые переходы идут при постоянных температурах, которые называются соответственно **температурой кипения и температурой плавления.**

**Испарение.** Количество теплоты, необходимое для превращения жидкости в пар при постоянной температуре или **выделяемое** паром при конденсации, называется **теплотой парообразования**:  $Q = Lm$ , где  $L$  (в некоторых учебных пособиях обозначают  $r$ ) – **удельная теплота парообразования**. Единица измерения  $[L] = 1 \text{ Дж/кг}$ . Эта энергия тратится на увеличение потенциальной энергии молекул.

**Физический смысл удельной теплоты парообразования:** теплота, необходимая для перевода 1 килограмма вещества находящегося при температуре кипения из жидкого агрегатного состояния в газообразное. Например, удельная теплота парообразования воды – 2260 кДж/кг. Это означает, что для того, чтобы превратить 1 кг воды, находящийся при температуре кипения (100 °С) в 1 кг пара при той же температуре понадобится 2260 кДж. В общем случае превращение жидкости в пар не требует доведение жидкости до кипения. Вода может превратиться в пар и при комнатной температуре. Такой процесс называется испарением. Отличие испарения от кипения в том, что испарение происходит медленнее и только с поверхности жидкости, а кипение идет по всему объему жидкости и гораздо интенсивнее.

**Плавление.** Количество теплоты, необходимое для **плавления** тела или **выделяемое** при кристаллизации (отвердевании), называется **теплотой плавления**:  $Q = \lambda m$ , где  $\lambda$  – **удельная теплота плавления**. Единица измерения  $[\lambda] = 1 \text{ Дж/кг}$ .

**Физический смысл удельной теплоты плавления:** теплота, необходимая для перевода 1 килограмма вещества находящегося при температуре плавления из твердого агрегатного состояния в жидкое. Например, удельная теплота плавления льда 330 кДж/кг. Это означает, что для того, чтобы превратить 1 кг льда при 0 °С в 1 кг воды при той же температуре понадобится 330 кДж.

Удельные теплоты парообразования и плавления называются **скрытыми теплотами**, поскольку при фазовых переходах температура системы не меняется, несмотря на то, что теплота к ней подводится.

Рассмотрим один простой пример. Нам необходимо превратить 1 кг льда при температуре –50 °С в пар при 100 °С. Для начала лед нужно нагреть до температуры плавления, то есть до 0 °С

$$Q_1 = c_{\text{льда}} m (0^\circ\text{C} - (-50^\circ\text{C})) = c_{\text{льда}} m \cdot 50.$$

Потом лед при 0 °С необходимо расплавить:  $Q_2 = \lambda_{\text{льда}} m$ .

Потом нагреваем получившуюся воду до температуры кипения. **Очевидно, что масса получившейся воды будет равна массе льда:**  $Q_3 = c_{\text{воды}} m (100^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}) = c_{\text{воды}} m \cdot 100.$

И, наконец, превращаем воду в пар:  $Q_4 = Lm_{\text{пара}}$ .

Таким образом, на преобразование льда в пар мы затратили количество теплоты равное

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4.$$

Графически данный процесс представлен на рисунке.

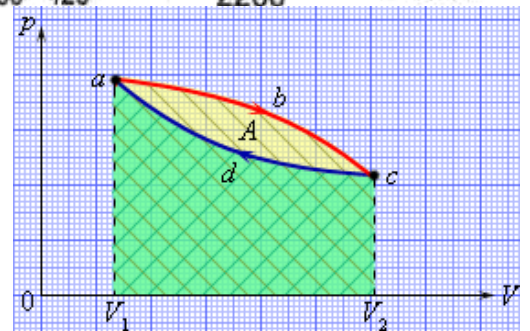
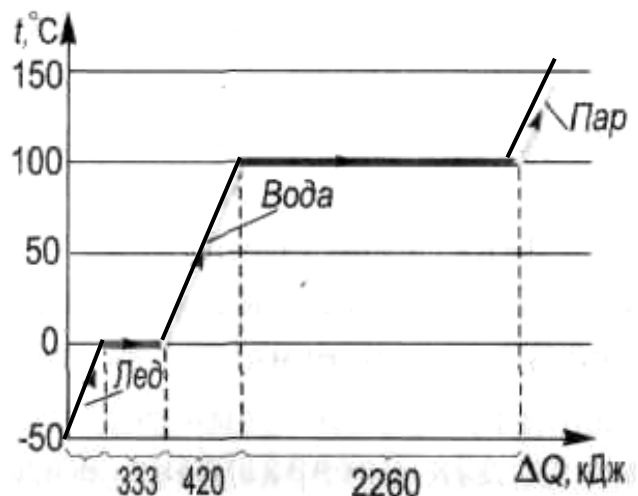
Удельная теплота парообразования вещества всегда больше удельной теплоты плавления. Почему? При парообразовании сильно меняется потенциальная энергия взаимодействия молекул. В газообразном состоянии расстояние между молекулами всегда намного больше расстояний в твердом и в жидком состояниях.

Возвращаемся к нашей задаче. Процесс охлаждения занял  $t = 15$  минут (не забываем при вычислениях перевести в секунды)/ Далее все просто

$$Q = cm\Delta T \Rightarrow m = \frac{Q}{m\Delta T} = \frac{|Q_0| \cdot t}{m(T_A - T_B)}$$

**Ответ: 12.**

**В7. Тепловым двигателем** называется устройство, способное





превращать полученное количество теплоты в механическую работу. Механическая работа в тепловых двигателях производится в процессе расширения некоторого вещества, которое называется **рабочим телом**. В качестве рабочего тела обычно используются газообразные вещества (пары бензина, воздух, водяной пар).

Как следует из первого закона термодинамики, полученное газом **количество теплоты**  $Q$  полностью превращается в **работу**  $A$  при изотермическом процессе, при котором внутренняя энергия остается неизменной ( $\Delta U = 0$ ):  $A = Q$ .

Но такой **однократный акт** преобразования теплоты в работу не представляет интереса для техники. Реально существующие тепловые двигатели (паровые машины, двигатели внутреннего сгорания и т. д.) работают **циклически**. Процесс теплопередачи и преобразования полученного количества теплоты в работу периодически повторяется. Для этого рабочее тело должно совершать **круговой процесс** или термодинамический цикл, при котором периодически восстанавливается **исходное** состояние системы. Круговые процессы изображаются на диаграмме ( $p, V$ ) с помощью замкнутых кривых. При расширении газ совершает положительную работу  $A_1$ , равную площади под кривой  $abc$ . При сжатии газ совершает **отрицательную** работу  $A_2$ , равную по модулю площади под кривой  $cda$ . Полная работа за цикл  $A = A_1 + A_2$  или  $A = A_1 - |A_2|$  на диаграмме ( $p, V$ ) равна площади цикла. Работа  $A$  положительна, если цикл обходится по часовой стрелке (как раз такое направление указано на рисунке), и  $A$  отрицательна, если цикл обходится в противоположном направлении.

Общее свойство всех круговых процессов состоит в том, что их невозможно провести, приводя рабочее тело (на рисунке обозначено (3)) в тепловой контакт только с одним тепловым резервуаром. Их нужно, по крайней мере, два. Тепловой резервуар с более высокой температурой называют **нагревателем** (на рисунке обозначено (1)), а с более низкой – **холодильником** (на рисунке обозначено (2)). Совершая круговой процесс, рабочее тело получает от нагревателя некоторое количество теплоты  $Q_1$  и отдает холодильнику количество теплоты  $Q_2$ , которое двигатель **не смог преобразовать в работу**  $A$ . Таким образом, работа газа за цикл будет равна:  $A = Q_1 - Q_2$ .

Отношение работы  $A$  к количеству теплоты  $Q_1$ , полученному рабочим телом за цикл от нагревателя, называется **коэффициентом полезного действия**  $\eta$  тепловой машины:  $\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$ . или  $\eta = \frac{A}{A + Q_2}$ .

Возможно несколько разных вариантов формул для КПД. Важно понимать, что в числителе должна стоять **полезная работа**, которую можно выразить как разность между теплотой, полученной рабочим телом от нагревателя, и теплотой, отданной нагревателем холодильнику  $A = Q_1 - Q_2$ . А в знаменателе обязательно будет стоять количество теплоты, полученное рабочим телом от нагревателя. В любом случае мы должны помнить, что КПД это всегда отношение **полезной работы к полной работе**.

Коэффициент полезного действия указывает, какая часть тепловой энергии, полученной рабочим телом от «горячего» теплового резервуара, превратилась в полезную работу. Остальная часть  $(1 - \eta)$  была «бесполезно» передана холодильнику. Поэтому если в условии задачи сказано, что холодильнику было передано 60% теплоты, это значит, что КПД будет 40%.

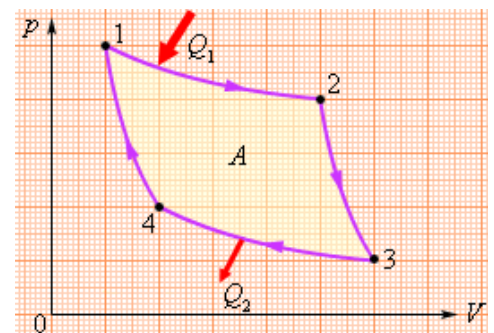
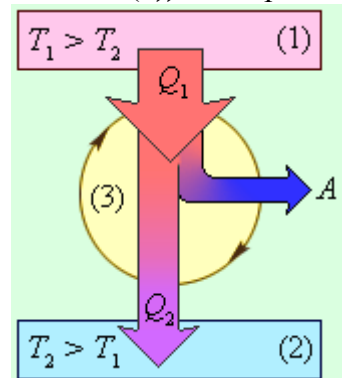
Если не отдать эту энергию холодильнику, то тепловая машина может разрушиться. Именно поэтому у любого двигателя внутреннего сгорания есть система охлаждения и подключенный к ней радиатор. Коэффициент полезного действия тепловой машины всегда меньше единицы ( $\eta < 1$ ).

В 1824 году французский инженер Карно рассмотрел круговой процесс, состоящий из двух изотерм и двух адиабат. Этот круговой процесс сыграл важную роль в развитии учения о тепловых процессах. Он называется **циклом Карно** (см. рисунок). Карно выразил **коэффициент полезного действия цикла** через температуры нагревателя  $T_1$  и холодильника  $T_2$

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad \text{или} \quad \eta = \frac{T_{\text{Нагр}} - T_{\text{Хол}}}{T_{\text{Нагр}}} = 1 - \frac{T_{\text{Хол}}}{T_{\text{Нагр}}}.$$

Цикл Карно – **наиболее эффективный круговой процесс из всех возможных при заданных температурах нагревателя и холодильника**:  $\eta_{\text{Карно}} = \eta_{\text{max}}$ .

Первый закон термодинамики – закон сохранения энергии для тепловых процессов – устанавливает



связь между **количеством теплоты**  $Q$ , полученной системой, изменением  $\Delta U$  ее **внутренней энергии** и **работой**  $A$ , совершенной над внешними телами  $Q = \Delta U + A$ . Согласно этому закону, энергия не может быть создана или уничтожена. Она передается от одной системы к другой и превращается из одной формы в другую. Процессы, нарушающие первый закон термодинамики, никогда не наблюдались. На рисунке изображены устройства, запрещенные первым законом термодинамики – циклически работающие тепловые машины, запрещаемые первым законом термодинамики. На первом рисунке вечный двигатель 1 рода, совершающий работу без потребления энергии извне. На втором – тепловая машина с коэффициентом полезного действия  $\eta > 1$ . Задачу решите самостоятельно. **Ответ: 30.**

**В8. Фотон** — элементарная частица, переносчик электромагнитного взаимодействия, квант электромагнитного поля. Фотоны обозначаются буквой  $\gamma$ , поэтому их часто называют гамма-квантами (особенно фотоны высоких энергий). Эти термины практически синонимичны.

Фотон не имеет массы покоя и электрического заряда. Фотон участвует в электромагнитном и гравитационном взаимодействии. **Масса ПОКОЯ фотона равна нулю.** Энергия фотона равна

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = mc^2$$

$m$  — его масса (**но не масса покоя**),  $\nu$  — частота фотона,  $\lambda$  — длина волны фотона,  $c$  — скорость света,  $h$  — постоянная Планка ( $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$  Дж·с). Фотон движется в вакууме со скоростью света, равной 300 000 км/с.

**Фотоэлектрический эффект** (или точнее – внешний фотоэффект) заключается в вырывании электронов из вещества под действием падающего на него света (фотонов). Для того чтобы вырвать электрон из металла фотон должен обладать некоторой минимальной энергией, равной так называемой **работе выхода** электрона из металла. Эта энергия разная для разных веществ и указывается в соответствующих

таблицах. Работа выхода находится по формуле:  $A = h\nu_{\min} = \frac{hc}{\lambda_{\text{кр}}}$ .

где  $c$  — скорость света,  $\lambda_{\text{кр}}$  — длина волны, соответствующая красной границе фотоэффекта (то есть максимальная длина волны, при которой происходит вырывание электрона),  $\nu_{\min}$  — минимальная частота фотона (обратите внимание, что частота минимальна, а длина волны — максимальна),  $h$  — постоянная Планка.

У большинства металлов работа выхода  $A$  составляет несколько электрон-вольт ( $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж). В квантовой физике часто используется электрон-вольт в качестве энергетической единицы измерения. Многочисленными экспериментаторами были установлены следующие **основные закономерности фотоэффекта**:

1. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с увеличением частоты света  $\nu$  и не зависит от его интенсивности.
2. Для каждого вещества существует так называемая **красная граница фотоэффекта**, то есть наименьшая частота  $\nu_{\min}$ , при которой еще возможен внешний фотоэффект.
3. Число фотоэлектронов, вырываемых светом из катода за 1 с, прямо пропорционально интенсивности света (количеству фотонов, падающих на вещество, в единицу времени).
4. Фотоэффект практически безинерционен, фототок возникает мгновенно после начала освещения катода при условии, что частота света  $\nu > \nu_{\min}$ .

Решение задач на фотоэффект сводится к решению уравнения Эйнштейна для фотоэффекта

$$h\nu = A + \left( \frac{mv^2}{2} \right)_{\max}$$

То есть **энергия падающего фотона расходуется на работу выхода электрона из металла и на сообщение вырванному электрону кинетической энергии**. Законы фотоэффекта свидетельствуют, что свет при испускании и поглощении ведет себя подобно потоку частиц, получивших название **фотонов** или **световых квантов**.

Возвращаемся к задаче. Запишем уравнения Эйнштейна для фотоэффекта для двух случаев.

$$h\nu_1 = A + \frac{mv_{\max 1}^2}{2} \text{ и } h\nu_2 = A + \frac{mv_{\max 2}^2}{2}$$

С учетом того, что  $3\nu_{\max 1} = \nu_{\max 2}$  получаем:  $h\nu_1 - A = \frac{mv_{\max 1}^2}{2}$  и  $h\nu_2 = A + 9 \cdot \frac{mv_{\max 1}^2}{2}$

А теперь надо решить систему. Выражаем  $\frac{mv_{\max}^2}{2}$  из первого уравнения и подставляем во второе

$$h\nu_1 = A + 9(h\nu_2 - A) \Rightarrow A = \frac{h(9\nu_1 - \nu_2)}{8}$$

Так как работы выходы равна  $A = \frac{hc}{\lambda}$ , то  $\frac{hc}{\lambda} = \frac{h(9\nu_1 - \nu_2)}{8} \Rightarrow \lambda = \frac{8c}{9\nu_1 - \nu_2}$

**Ответ:** 562.

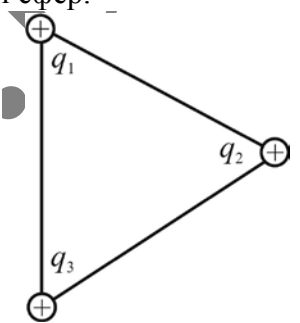
**В9.** Электрические заряды взаимодействуют друг с другом и с электрическим полем. Любое взаимодействие описывается потенциальной энергией. Потенциальная энергия взаимодействия **двух** точечных электрических зарядов рассчитывается по формуле:  $W = k \frac{q_1 q_2}{r}$ . **Обратите внимание на отсутствие**

**модулей у зарядов!!!** Для разноименных зарядов энергия взаимодействия имеет отрицательное значение. Такая же формула справедлива и для энергии взаимодействия равномерно заряженных сфер и шаров. Как обычно, в этом случае расстояние  $r$  измеряется между центрами шаров или сфер.

Если же зарядов не два, а больше, то энергию их взаимодействия следует считать так: надо разбить систему зарядов на все возможные пары, рассчитать энергию взаимодействия **каждой пары** и просуммировать все энергии для всех пар.

Например, необходимо найти энергию взаимодействия трех зарядов, находящихся в вершинах равностороннего треугольника со стороной  $a$  (см. рисунок). В нашем случае мы имеем три пары зарядов –  $q_1 q_2$ ,  $q_1 q_3$  и  $q_2 q_3$ . Следовательно, и энергий взаимодействия тоже будет три. Итого имеем

$$W = k \frac{q_1 q_2}{a} + k \frac{q_1 q_3}{a} + k \frac{q_2 q_3}{a}.$$

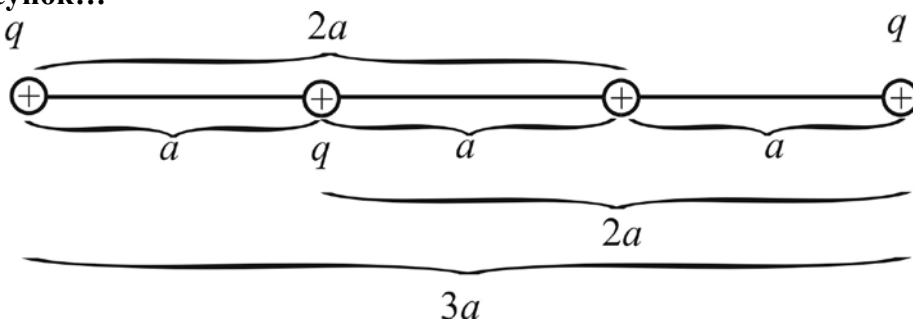


Большинство задач по данной теме решаются так же, как и задачи на закон сохранения механической энергии: сначала находится **начальная** энергия взаимодействия системы, потом **конечная**. Если в задаче просят найти работу по перемещению зарядов, то она будет равна **разнице** между начальной и конечной суммарной энергией взаимодействия зарядов. Энергия взаимодействия так же может переходить в кинетическую энергию.

Если тела в начальный момент времени находятся на очень большом расстоянии, то энергия их взаимодействия будет равна 0.

**ПРИМЕР.** Чему равна энергия (в мДж) взаимодействия системы четырех зарядов 2 мкКл каждый, расположенных вдоль прямой линии так, что расстояние между соседними зарядами равно 30 см.

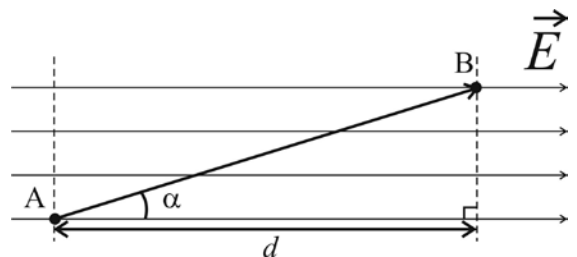
**Всегда делаем рисунок!!!**



Из рисунка видно, что у нас будет три одинаковых энергии (так как три **ПАРЫ** зарядов расположены на одинаковом расстоянии  $a$  друг от друга [пары зарядов 1–2, 2–3, 3–4]). Так же две пары зарядов расположены друг от друга на расстоянии  $2a$  (пары зарядов 1–3, 2–4). Ну и будет одна пара с расстоянием  $3a$  (пара зарядов 1–4). Таким образом, энергия взаимодействия системы точечных зарядов будет равна сумме энергий взаимодействия между всеми парами зарядов

$$W = 3k \frac{q^2}{a} + 2k \frac{q^2}{2a} + k \frac{q^2}{3a} = \frac{13}{3} k \frac{q^2}{a} = 520 \text{ мДж.}$$

Задачу решите самостоятельно. **Ответ:** 21.



**B10.** При перемещении заряда  $q$  в электрическом поле из точки А в точку В электрические силы совершают работу. Эта работа при перемещении на  $\Delta l = AB$  равна:

$$A = F \cdot \Delta l \cdot \cos \alpha = qE \cdot \Delta l \cdot \cos \alpha.$$

Учитывая, что  $AB \cos \alpha = d$  получаем  $A = qEd$ . То есть нам важно насколько заряд переместился **ВДОЛЬ** линий поля!!! Если заряд перемещается **перпендикулярно линиям поля**, то работа электростатических сил при таком движении будет равна нулю. Электростатическое поле обладает важным свойством:

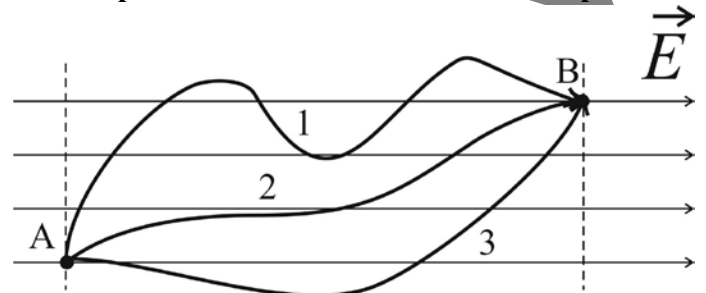
**Работа сил электростатического поля при перемещении заряда из одной точки поля в другую НЕ ЗАВИСИТ ОТ ФОРМЫ ТРАЕКТОРИИ, а определяется только положением начальной и конечной точек и величиной заряда.**

Аналогичным свойством обладает и гравитационное поле, и в этом нет ничего удивительного, так как гравитационные и кулоновские силы описываются похожими соотношениями.

Следствием независимости работы от формы траектории является следующее утверждение:

**Работа сил электростатического поля при перемещении заряда по любой ЗАМКНУТОЙ траектории равна нулю.**

На рисунке изображены силовые линии кулоновского поля и три различные траектории перемещения заряда  $q$  из начальной точки А в конечную точку В. На всех траекториях изображенных на рисунке, работы кулоновских сил одинаковы!!! Если на одной из траекторий изменить направление перемещения заряда  $q$  на противоположное, то и работа изменит знак. Отсюда следует, что на замкнутой траектории работа кулоновских сил равна нулю.



Свойство потенциальности (независимости работы от формы траектории) электростатического поля позволяет ввести понятие **потенциальной энергии** заряда в электрическом поле. Для этого в пространстве выбирается некоторая точка (0), и потенциальная энергия заряда  $q$ , помещенного в эту точку, принимается равной нулю (см. рисунок).

**Потенциальная энергия заряда  $q$ , помещенного в любую точку (1) пространства, относительно фиксированной точки (0) равна работе  $A_{10}$ , которую совершит электростатическое поле при перемещении заряда  $q$  из точки (1) в точку (0):  $W_{p1} = A_{10}$ .**

В ЭЛЕКТРОСТАТИКЕ ЭНЕРГИЮ ПРИНЯТО ОБОЗНАЧАТЬ БУКВОЙ  $W$ , ТАК КАК БУКВОЙ  $E$  ОБОЗНАЧАЮТ НАПРЯЖЕННОСТЬ ПОЛЯ.

Так же, как и в механике (вспомните про выбор нулевого уровня при отсчете потенциальной энергии тела), потенциальная энергия зависит от выбора опорной точки (0). Такая неоднозначность в определении потенциальной энергии не приводит к каким-либо недоразумениям, так как физический смысл имеет не сама потенциальная энергия, а **РАЗНОСТЬ ЕЕ ЗНАЧЕНИЙ В ДВУХ ТОЧКАХ ПРОСТРАНСТВА.**

Работа, совершаемая электрическим полем при перемещении точечного заряда  $q$  из точки (1) в точку (2) (см. рисунок), равна разности значений потенциальной энергии в этих точках и не зависит от пути перемещения заряда и от выбора точки (0).

Потенциальная энергия заряда  $q$ , помещенного в электрическое поле, пропорциональна величине этого заряда. Физическую величину, равную отношению потенциальной энергии электрического заряда в электростатическом поле к величине этого заряда, называют **потенциалом**  $\varphi$  электрического поля:

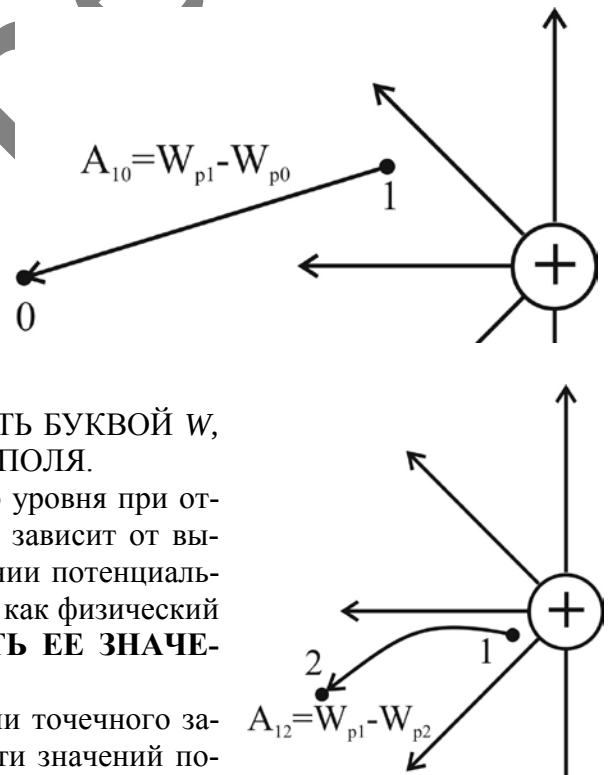
$$\varphi = \frac{W_p}{q}.$$

Потенциал  $\varphi$  является **ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ** электростатического поля.

Работа  $A_{12}$  по перемещению электрического заряда  $q$  из начальной точки (1) в конечную точку (2) равна произведению заряда на **РАЗНОСТЬ ПОТЕНЦИАЛОВ** ( $\varphi_1 - \varphi_2$ ) начальной и конечной точек:

$$A_{12} = W_{p1} - W_{p2} = q\varphi_1 - q\varphi_2 = q(\varphi_1 - \varphi_2).$$

В Международной системе единиц (СИ) единицей потенциала является вольт (В).





$$1 \text{ В} = 1 \text{ Дж} / 1 \text{ Кл}.$$

Во многих задачах электростатики при вычислении потенциалов за опорную точку (0) удобно принять **БЕСКОНЕЧНО УДАЛЕННУЮ ТОЧКУ**. В этом случае понятие потенциала может быть определено следующим образом:

Потенциал поля в данной точке пространства равен работе, которую совершают электрические силы при удалении единичного положительного заряда из данной точки в бесконечность:  $\varphi_{\infty} = \frac{A_{\infty}}{q}$ .

Потенциал  $\varphi$  поля точечного заряда  $Q$  на расстоянии  $r$  от него относительно бесконечно удаленной точки вычисляется следующим образом:  $\varphi = k \frac{Q}{r}$  или  $\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r}$ .

Эта же формула выражает потенциал поля **однородно заряженного шара** (или сферы) при  $r \geq R$ , где  $R$  – радиус шара. Внутри сферы потенциал будет равен потенциалу на поверхности. Если же в задаче просят найти потенциал на поверхности шара, то считайте его по формуле:  $\varphi = k \frac{Q}{R}$ .

Для наглядного представления электрического поля наряду с силовыми линиями используют **эквипотенциальные поверхности**. Поверхность, во всех точках которой потенциал электрического поля имеет одинаковые значения, называется эквипотенциальной поверхностью или поверхностью равного потенциала. В случае точечного заряда эквипотенциальной поверхностью будут сферы одинакового радиуса с центром в точке нахождения заряда.

Если пробный заряд  $q$  совершил **малое перемещение  $d$  вдоль силовой линии** из точки (1) в точку (2), то можно записать:  $\Delta A_{12} = qEd = q(\varphi_1 - \varphi_2) = -q\Delta\varphi$ , где  $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$  – изменение потенциала. Отсюда следует  $E = \frac{\Delta\varphi}{d} = \frac{U}{d}$ , где  $U$  – разность потенциалов (напряжение). Это соотношение выражает связь

между напряженностью поля и потенциалом. Поэтому напряженность электростатического поля часто выражают в 1 В/м. Соответственно работу поля можно считать как  $A = qEd = qU$ , где  $U$  – разность потенциалов, которую прошла заряженная частица.

Не заморачивайтесь по поводу знаков в формулах для работы поля. Запоминайте формулы без знаков. При решении задач на работу поля просто правильно рассуждайте и проблем со знаками не будет.

**Работа поля будет положительной, если положительно заряженная частица движется вдоль силовых линий, отрицательна – если против силовых линий. Для отрицательного заряда правило обратное.** То есть если поле помогает движению частицы – его работа будет положительной. Если поле мешает движению частицы (в таких задачах обычно внешняя сила перемещает заряд, так как поле мешает движению), то работа поля будет отрицательной.

Из принципа суперпозиции напряженностей полей, создаваемых электрическими зарядами, следует **принцип суперпозиции для потенциалов** (при этом знак потенциала поля зависит от знака заряда, создавшего поле):  $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \dots$ .

То есть когда у нас стоит задача найти потенциал поля созданного системой зарядов в некоторой точке пространства, то мы находим потенциал поля каждого заряда (с учетом его знака естественно) и просто складываем эти потенциалы. **НИКАКИХ ВЕКТОРОВ И НИКАКИХ МОДУЛЕЙ!!!**

Электростатическое поле может остановить заряд, который движется с некоторой скоростью  $v$  вдоль линий поля, то есть оно может «забрать» у него кинетическую энергию:  $\frac{mv^2}{2} = qEd$ ,

где  $d$  – расстояние, пройденное электроном до остановки. Если известно, какую разность потенциалов прошел заряд, то  $\frac{mv^2}{2} = qU$ .

Эти же соотношения можно применять и для расчета конечной скорости заряда, при разгоне его полем из состояния покоя.

Поле может не только останавливать и разгонять, но и просто **изменять** (увеличивать или уменьшать) кинетическую энергию заряда. При этом применяется теорема о кинетической энергии

$$\frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = qEd \quad \text{или} \quad \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = qU.$$

Если в задаче спрашивается «**Какую работу надо совершить...**» или идет речь о «**Работе внешних сил**», то эту работу следует считать так же, как и работу поля, но с противоположным знаком.

Возвращаемся к задаче. Так как частица отлетела в противоположную сторону с такой же скоростью, которая была до удара, то изменение ее импульса будет равно двойному значению импульса  $\Delta p = 2mv$ , откуда мы найдем скорость частицы (она будет равна скорости частицы после ускорения ее полем). Так как частица была ускорена полем, то

$$\frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2} = qU \Rightarrow \frac{mv_0^2}{2} = \frac{mv^2}{2} - qU \Rightarrow v_0 = \sqrt{\frac{2}{m} \left( \frac{mv^2}{2} - qU \right)}$$

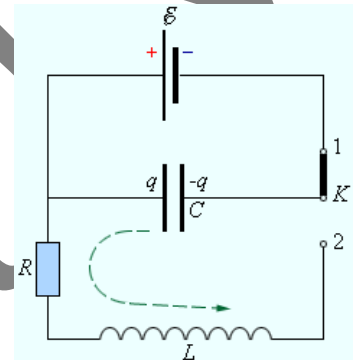
Расчеты сделайте самостоятельно. И не забудьте перевести скорость в дм/с.

**Ответ:** 80.

**В11.** В электрических цепях, так же как и в механических системах, могут возникать **свободные колебания**. Простейшей электрической системой, в которой могут возникать свободные колебания, является последовательный RLC-контур.

Когда ключ  $K$  находится в положении 1, конденсатор заряжается до напряжения  $U = \varepsilon$ . После переключения ключа в положение 2 начинается процесс разрядки конденсатора через резистор  $R$  и катушку индуктивности  $L$ . При определенных условиях этот процесс может иметь колебательный характер.

При этом весь колебательный процесс можно разбить на следующие этапы (на рисунке приведены графики изменения заряда  $q(t)$  конденсатора и смещения  $x(t)$  груза от положения равновесия (на верхнем графике), а также графики тока  $I(t)$  и скорости груза  $v(t)$  за один период колебаний (на нижнем графике)):



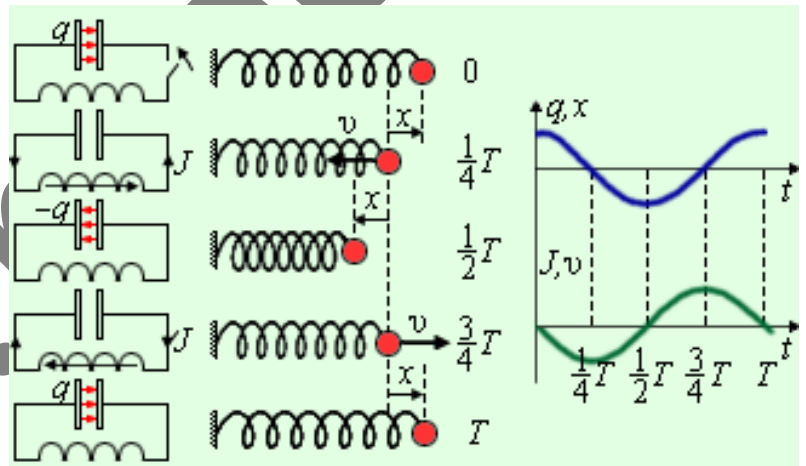
#### 1. Заряд конденсатора от батареи.

При этом вся энергия контура запасена в конденсаторе. Энергия магнитного поля катушки равна нулю (цепь 1 на рисунке)

$$W_C = \frac{CU_{\max}^2}{2} = \frac{q_{\max}^2}{2C}, \quad W_L = 0.$$

**2. Конденсатор начинает разряжаться на катушку.** При этом в цепи возникает электрический ток. Энергия электрического поля конденсатора постепенно переходит в энергию магнитного поля катушки. Общая энергия системы будет равна:

$$W = \frac{LI^2}{2} + \frac{CU^2}{2}.$$



При этом напряжение на конденсаторе постепенно уменьшается до нуля, а ток возрастает до максимального значения.

**3. Конденсатор полностью разрядился.** Вся энергия контура запасена в магнитном поле катушки. Ток в цепи достиг максимального значения (цепь 2 на рисунке):  $W_L = \frac{LI_{\max}^2}{2}$ ,  $W_C = 0$ .

**4. Ток по инерции «идет дальше» и заряжает конденсатор наоборот,** то есть ЗАРЯДЫ ОБКЛАДОК СТАНОВЯТСЯ ПРОТИВОПОЛОЖНЫМИ ПО ЗНАКУ:  $W = \frac{LI^2}{2} + \frac{CU^2}{2}$ .

**5. Энергия магнитного поля катушки полностью перешла в энергию конденсатора (цепь 3)**

$$W_C = \frac{CU_{\max}^2}{2}, \quad W_L = 0.$$

После этого весь процесс повторяется в обратном направлении (цепи 4 и 5 на рисунке).

**Если потерь в контуре нет (то есть сопротивление  $R = 0$ ), то энергия сохраняется и в любой момент времени она равна:**  $W = \frac{CU^2}{2} + \frac{LI^2}{2} = \frac{CU_{\max}^2}{2} = \frac{LI_{\max}^2}{2}$ , где  $U$  и  $I$  – промежуточные значения напряжения и силы тока.

Так как процесс повторяется, то он должен характеризоваться периодом. Период данных колебаний находится по формуле Томпсона:  $T = 2\pi\sqrt{LC} \Rightarrow \omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ .

Сейчас получим одно соотношение, которым очень удобно пользоваться при решении задач. По закону сохранения энергии максимальная энергия катушки будет равна максимальной энергии конденсатора

$$\frac{q_{\max}^2}{2C} = \frac{LI_{\max}^2}{2} \Rightarrow q_{\max}^2 = LC \cdot I_{\max}^2 \Rightarrow \sqrt{q_{\max}^2} = \sqrt{LC \cdot I_{\max}^2} \Rightarrow q_{\max} = I_{\max} \sqrt{LC}.$$

Так как  $\sqrt{LC} = \frac{T}{2\pi}$ , то имеем  $q_{\max} = I_{\max} \frac{T}{2\pi}$  или  $q_{\max} = I_{\max} \frac{1}{2\pi\nu}$  или  $q_{\max} = I_{\max} \frac{1}{\omega}$

Из уравнения зависимости силы тока от времени найдем  $\omega = 2,5 \cdot 10^3$  рад/с и  $I_{\max} = 0,2$  А. Так как  $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ , то  $L = \frac{1}{\omega^2 C}$ . Энергия, запасенная в контуре, будет равна:  $W = \frac{LI_{\max}^2}{2} = \frac{1}{\omega^2 C} \cdot \frac{I_{\max}^2}{2}$ .

**Ответ:** 640.

**В12.** При протекании тока по однородному участку цепи электрическое поле совершает работу. За время  $\Delta t$  по цепи протекает заряд  $\Delta q = I\Delta t$ . Электрическое поле на выделенном участке совершает работу

$$A = (\varphi_1 - \varphi_2)\Delta q = \Delta\varphi_{12}I\Delta t = UI\Delta t,$$

где  $U = \Delta\varphi_{12}$  – напряжение на участке цепи. Эту работу называют **работой электрического тока**.

$$A = UI\Delta t.$$

Используя закон Ома для участка цепи, получаем:

$$A = IU\Delta t = \frac{U}{R}U\Delta t = \frac{U^2}{R}\Delta t \text{ или } A = IU\Delta t = I \cdot IR \cdot \Delta t = I^2 R\Delta t.$$

Таким образом, мы получили три формулы для работы тока на участке цепи

$$A = IU\Delta t \quad A = \frac{U^2}{R}\Delta t \quad A = I^2 R\Delta t$$

**Работа  $A$  электрического тока  $I$ , протекающего по неподвижному проводнику с сопротивлением  $R$ , преобразуется в тепло  $Q$ , выделяющееся на проводнике:  $Q = A = I^2 R\Delta t$ .**

Закон преобразования работы тока в тепло был экспериментально установлен независимо друг от друга Дж. Джоулем и Э. Ленцем и носит название **закона Джоуля–Ленца**.

**КАКУЮ ФОРМУЛУ ВЫБРАТЬ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ?** Если в задаче несколько потребителей подключены к одному источнику параллельно или к одному источнику по очереди подключают разные потребители (это может быть один и тот же потребитель с которым что-либо сделали, например, укоротили спираль), то выбираем формулу с напряжением и сопротивлением:  $A = \frac{U^2}{R} \Delta t$ .

**ФОРМУЛА С НАПРЯЖЕНИЕМ ПРИМЕНЯЕТСЯ ГОРАЗДО ЧАЩЕ, ЧЕМ ОСТАЛЬНЫЕ!!!**

Если два потребителя соединены последовательно, то используем формулу с током и сопротивлением

$$A = I^2 R\Delta t.$$

**Мощность** электрического тока равна отношению работы тока  $A$ , совершенной током, к интервалу времени  $\Delta t$ , за которое эта работа была совершена:  $P = \frac{A}{\Delta t} = IU = \frac{U^2}{R} = I^2 R$ .

И опять у нас три формулы:  $P = IU$   $P = \frac{U^2}{R}$   $P = I^2 R$ .

И опять у нас три формулы:  $P = IU$   $P = \frac{U^2}{R}$   $P = I^2 R$ .

**И ОПЯТЬ ФОРМУЛА С НАПРЯЖЕНИЕМ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ БУДЕТ ПРИМЕНЯЕТСЯ ГОРАЗДО ЧАЩЕ, ЧЕМ ОСТАЛЬНЫЕ!!!**

Работа электрического тока в СИ выражается в **джоулях** (Дж), мощность – в **ваттах** (Вт).

Работа электрического тока так же может выражаться через мощность, то есть  $A = Pt$ . Таким образом работу тока можно выразить через 1 кВт·ч = 1 000 Вт х 3600 с = 3 600 000 Дж. Эту единицу работы тока используют в быту (посмотрите в счета, которые Ваши родители платят за электроэнергию).

При этом если на лампочке написано 100 Вт, 220 В, то это означает, что лампочка **рассчитана** на 220 В и при включении в сеть с 220 В будет вырабатывать мощность 100 Вт. Следовательно, **номинальная** (то есть та, на которую рассчитана лампочка), сила тока, на которую рассчитана лампочка, находится из

соотношения:  $P = IU \Rightarrow I = \frac{P}{U} = \frac{100 \text{ Вт}}{220 \text{ В}} = 0,45 \text{ А}$ . При помощи закона Ома для участка цепи найдем со-

противление лампочки:  $I = \frac{U}{R} \Rightarrow R = \frac{U}{I} = \frac{220 \text{ В}}{0,45 \text{ А}} \approx 490 \text{ Ом}$ .

Однако это совершенно не значит, что если лампочка будет включена в сеть с напряжением меньшим номинального, то она не будет работать. Она будет работать, только вырабатываемая мощность будет **отличаться от номинальной**. При включении в сеть с большим, чем номинальное напряжением лампочка может перегореть (а может и не перегореть).

Возвращаемся к задаче. При разомкнутом ключе резисторы будут соединены последовательно и через резисторы будет идти одинаковый ток. Это значит, что удобнее будет выбрать формулу мощности через силу тока. Запишем мощность для первого и второго резистора  $P_1 = I^2 R_1$ ,  $P_2 = I^2 R_2$ . Разделив первое уравнение на второе, мы сможем узнать во сколько раз отличаются сопротивления резисторов

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{I^2 R_1}{I^2 R_2} \Rightarrow R_1 = 2R_2$$

Пусть сопротивление второго резистора  $R$ . Тогда сопротивление первого резистора равно  $2R$ . При разомкнутом ключе сила тока в цепи была равна  $I = \frac{U}{R_1 + R_2} = \frac{U}{R + 2R} = \frac{U}{3R}$ . При этом мощность, которая выделялась на втором резисторе при разомкнутом ключе, равна

$$P_2 = I^2 R_2 = \left( \frac{U}{3R} \right)^2 R = \frac{U^2}{9R} \Rightarrow \frac{U^2}{R} = 9P_2$$

При замыкании ключа ток через первый резистор не пойдет. Это значит, что единственным потребителем тока будет второй резистор (поэтому мы выберем формулу мощности через напряжение) и мощность, потребляемая им, будет равна

$$P'_2 = \frac{U^2}{R_2} = \frac{U^2}{R} = 9P_2$$

**Ответ: 18.**