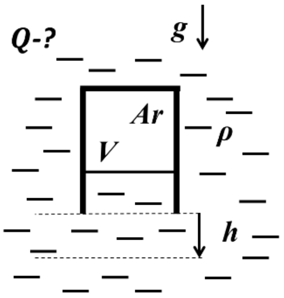
Заключительный этап Всесибирской Открытой Олимпиады Школьников по физике 12 марта 2023 г.
11 класс

Решения и критерии оценки



1. Перевернутый сосуд с газообразным аргоном удерживается на некоторой глубине в широком бассейне с горячей водой. Сосуд герметичен и закрыт снизу лёгким поршнем, который может без трения скользить вдоль его стенок. Температура воды и сосуда медленно повышалась, а сосуд медленно перемещался вниз, так что поршень всё время оставался неподвижным относительно стенок сосуда. Какое количество теплоты получил аргон при перемещении сосуда на расстояние $\boldsymbol{h}$? Объём аргона в сосуде $\boldsymbol{V}$. Плотность воды $\boldsymbol{\rho}$. Ускорение свободного падения $\boldsymbol{g}$.

Возможное решение

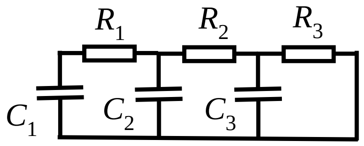
Поршень лёгкий и трения между поршнем и стенками сосуда нет, поэтому давление воды на уровне поршня равно давлению газа в сосуде <1 балл>. Гидростатическое давление повышается с глубиной: $p_2 - p_1 = \rho g h$, где p_1 и p_2 - соответственно, первоначальное и новое давление. <2 балла>

Поскольку при погружении сосуда объем газа не изменяется, то с увеличением температуры давление в газе будет увеличиваться <1 балл>. Повышение температуры обусловлено количеством ΔQ полученного газом тепла. По первому началу термодинамики при изохорическом процессе это количество равно увеличению внутренней энергии газа: $\Delta Q = \Delta U$ <2 балла>. Выражая последнюю величину через давление и объем, находим: $\Delta Q = \Delta U = \frac{3}{2}(p_2 - p_1)V = \left(\frac{3}{2}\right)\rho g h V$ <3 балла>

Ответ: $\Delta Q = (3/2)\rho g h V$. <1 балл>

Разбалловка по этапам

	Этапы решения	Соотношения	Балл
1	Указано, что давление воды под поршнем равно давлению газа над поршнем		1
2	Описана зависимость гидростатического давления от глубины	$p_2 - p_1 = \rho g h$	2
3	Указание на изохорический процесс		1
4	Формулировка I начала термодинамики	$\Delta Q = \Delta U$	2
5	Изменение внутренней энергии газа выражено через давление и объем	$\Delta Q = \Delta U = \frac{3}{2}(p_2 - p_1)V$	3
6	Получение ответа	$\Delta Q = (3/2)\rho g h V$	1



2. Из трех одинаковых конденсаторов и трех разных резисторов собрана изображенная на рисунке схема. Конденсаторы разряжаются, причем напряжение на конденсаторе C_1 всегда в 2 раза больше, чем на C_2, а на C_2 в 2 раза больше, чем на C_3. Определите сопротивление резисторов R_2 и R_3, если сопротивление резистора R_1 равно R.

Возможное решение

Для конденсатора емкости C в любой момент времени выполняется соотношение между приложенным напряжением V и зарядом q на пластинах: $q = CV$. При разрядке конденсатора через него идет ток разрядки $I_p = \Delta q/\Delta t$. Отсюда следует, что поскольку отношения напряжений на конденсаторах (4 : 2 : 1) поддерживаются фиксированными, то и отношения токов разрядки в любой момент времени будут такими же (4 : 2 : 1) <2 балла>. С учетом этих отношений можно применить первое правило Кирхгофа к 3 узлам на схеме и получить следующие соотношения для токов в резисторах:

$$I_1 = 4I,\quad I_2 = 6I,\quad I_3 = 7I,$$ <3 балла>

где через I обозначен ток разрядки через конденсатор C_3. С другой стороны, для напряжений на резисторах получаем из условия задачи соотношения

$$V_1 = 2V,\quad V_2 = V_3 = V,$$ <2 балла>

где через V обозначено напряжение на конденсаторе C_3. Применение закона Ома к каждому резистору дает

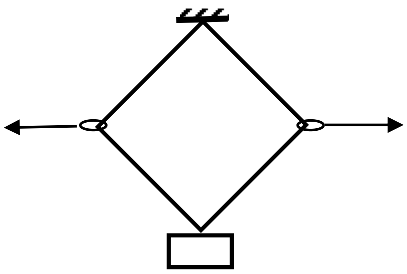
$$2R = V/I,\quad 6R_2 = V/I,\quad 7R_3 = V/I.$$ <2 балла>

Отсюда получаем

Ответ: $R_2 = R/3,\quad R_3 = 2/7\,R.$ <1 балл>

Разбалловка по этапам

	Этапы решения	Соотношения	Балл
1	Отношения токов разрядки	(4 : 2 : 1)	2
2	Соотношения для токов в резисторах	$I_1 = 4I,\quad I_2 = 6I,\quad I_3 = 7I,$	3
3	Напряжения на резисторах	$V_1 = 2V,\quad V_2 = V_3 = V$	2
4	Применение закона Ома к резисторам	$2R = V/I,\quad 6R_2 = V/I,\quad 7R_3 = V/I.$	2
5	Получение ответа	$R_2 = R/3,\quad R_3 = 2/7\,R$	1



3. Когда груз подвесили на две одинаковых резинки с недеформированной длиной l, он их растянул почти в два раза и пришел в равновесие на некоторой высоте. На резинки через надетые на них легкие колечки подействовали двумя одинаковыми горизонтальными силами, в результате чего в новом равновесном положении резинки приняли форму квадрата. На какую высоту поднялся груз в новом положении равновесия относительно прежнего? Трения нет, резинки невесомые.

Возможное решение

Предположим, что длина резинок в первом равновесии l_1, их жесткость k, вес груза mg.

Условие первоначального равновесия $2k(l_1 - l) = mg$. <1 балл>

Если после растяжки резинок груз поднимется на высоту x, то длина резинок будет $l_2 = (l_1 - x)\sqrt{2}$,<3 балла>

они будут натянуты силой $T = k(l_2 - l) = k((l_1 - x)\sqrt{2} - l)$. <2 балла>

Условие нового равновесия $T\sqrt{2} = 2k(l_1 - x) - kl\sqrt{2}) = mg$. <2 балла>

Подставив в последнее равенство значение mg из условия первого равновесия, получаем ответ.

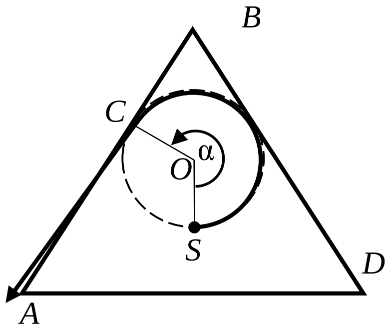
Ответ: $x = l\dfrac{\sqrt{2}-1}{\sqrt{2}}$ <2 балла>

Разбалловка по этапам

	Этапы решения	Соотношения	Балл
1	Формулировка условия первоначального равновесия	$2k(l_1 - l) = mg$	1
2	Определение длины резинок после придания им формы квадрата	$l_2 = (l_1 - x)\sqrt{2}$	3
3	Определение новой силы натяжения	$T = k((l_1 - x)\sqrt{2} - l)$,	2
4	Формулировка условия нового равновесия	$T\sqrt{2} = 2k(l_1 - x) - kl\sqrt{2}) = mg$	2
5	Получение ответа	$x = l\dfrac{\sqrt{2}-1}{\sqrt{2}}$	2

4. Внутри прямой правильной треугольной призмы создано однородное магнитное поле индукции B, направленное вдоль оси призмы. С оси призмы вылетела частица массы m, имеющая заряд q. Какое предельно большое время частица могла находиться внутри призмы с момента старта с оси, если она вышла за пределы призмы?

Возможное решение



В плоскости, перпендикулярной магнитному полю, частица движется по окружности радиуса $R = mv/(qB)$, где v - перпендикулярная магнитному полю компонента ее скорости <2 балла>.

Длина дуги окружности $l = \alpha R = \alpha mv/(qB)$, где α – центральный угол. Время движения по дуге $t = \alpha m/(qB)$ <2 балла>. В перпендикулярной полю плоскости граница призмы является правильным треугольником.

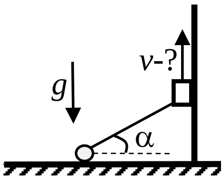
Условие вылета частицы из призмы означает, что окружность, по которой движется частица с максимально возможным временем нахождения внутри призмы, касается одной из граней призмы $OC \perp AB$ <2 балла>. В общем случае траектория, проходящая через точку S, может касаться только одной грани призмы. Вылет происходит в точке касания C. Из точки S движение до точки C может происходить либо по часовой стрелки, либо против часовой стрелки. При этом меньший из углов SOC изменяется в диапазоне от $2\pi/3$ до π. Наибольшая продолжительность движения внутри призмы отвечает наибольшему (α) центральному углу SOC между точкой старта S и точкой вылета C <1 балл>.

На рисунке изображен предельный случай, когда траектория касается двух граней призмы. Наибольший угол $\alpha = 4\pi/3$ достигается, если центр траектории частицы (точка O) чуть смещается влево на рисунке <1 балл>. В этом случае траектории уже не будет касаться грани BD, и вылет частицы из призмы происходит в точке C. Время движения в этом случае $t = 4\pi m/(3qB)$.

Ответ: $t = \dfrac{4\pi m}{3qB}$ <2 балла>.

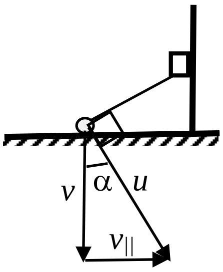
Разбалловка по этапам

1	Указано, что в плоскости, перпендикулярной магнитному полю частица движется по окружности, указан радиус окружности	$R = mv/(qB)$	2
2	Определено время движения по дуге окружности	$t = \alpha m/(qB)$	2
3	Утверждение: при максимуме времени траектория касается границы призмы	$OC \perp AB$	2
4	Максимум времени связан с максимумом центрального угла		1
5	Определен максимальный центральный угол	$\alpha = 4\pi/3$	1
6	Получение ответа	$t = 4\pi m/(3qB)$	2



5. Шарик нитью длины l привязан к кабине лифта. Кабина поднимается с некоторой неизвестной скоростью, а шарик скользит по горизонтальной поверхности. При угле α нити к горизонтали шарик отрывается от плоскости. Определите скорость лифта. Нить невесомая и нерастяжимая, трения нет, ускорение свободного падения g.

Возможное решение



В лабораторной системе отсчета в момент отрыва шарик двигался горизонтально, а кабина лифта двигалась с неизвестной скоростью v.

В системе отсчета, связанной с кабиной, шарик движется по окружности радиуса l. <1 балл> Его скорость u перпендикулярна нити, и, пока шарик скользит, вертикальная составляющая этой скорости равна v. В момент отрыва эта скорость $u = v / \cos\alpha$. <2 балла>

Шарик в этот момент имеет центростремительное ускорение $a_{цс} = \dfrac{v^2}{\cos^2\alpha \cdot l}$ <1 балл>, и на него действует сила натяжения нити T и сила тяжести.

II закон Ньютона в направлении нити $\dfrac{mv^2}{\cos^2\alpha \cdot l} = T - mg \cdot \sin\alpha$, где m – масса шарика.

<2 балла>

Поскольку непосредственно перед точкой отрыва шарик двигался горизонтально и действующие на него силы не меняются мгновенно, его вертикальное ускорение равно нулю. II закон Ньютона в вертикальном направлении $T \cdot \sin\alpha - mg = 0$. <2 балла>

Решаем совместно полученные уравнения и находим ответ.

Ответ: $v = \cos^2(\alpha) \cdot \sqrt{\dfrac{l \cdot g}{\sin\alpha}}$.

Разбалловка по этапам

	Этапы решения	Соотношения	Балл
1	В системе отсчета лифта шарик движется по окружности		1
2	Определение скорости шарика в этой системе	$u = v / \cos\alpha$	2
3	Определение центростремительного ускорения шарика	$a_{цс} = \dfrac{v^2}{\cos^2\alpha \cdot l}$	1
4	Формулировка II закона Ньютона в направлении нити	$\dfrac{mv^2}{\cos^2\alpha \cdot l} = T - mg \cdot \sin\alpha$	2
5	Формулировка II закона Ньютона в вертикальном направлении	$T \cdot \sin\alpha - mg = 0$	2
6	Получение ответа	$v = \cos^2(\alpha) \cdot \sqrt{\dfrac{l \cdot g}{\sin\alpha}}$	2