ОЛИМПИАДА ШКОЛЬНИКОВ «ПОКОРИ ВОРОБЬЕВЫ ГОРЫ» по ФИЗИКЕ
ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЙ (ФИНАЛЬНЫЙ) ЭТАП 2020 года

БИЛЕТ № 04 (11 класс, Челябинск): возможные решения и критерии

Критерии оценивания:

Для вопросов:

Есть отдельные правильные соображения – **1 балл.**

Ответ в целом правилен, но содержит существенные неточности, или существенно неполон, или отсутствует обоснование (для вопросов, в которых необходимо обоснование) – **2 балла.**

Ответ правилен, но присутствуют мелкие неточности, или ответ недостаточно полон, или отсутствует достаточное обоснование (для вопросов, в которых необходимо обоснование) – **3 балла.**

Ответ полностью правильный, но недостаточно обоснованный (для вопросов, в которых необходимо обоснование) – **4 балла.**

Правильный, полный и обоснованный ответ – **5 баллов (максимальная оценка).**

Для задач:

Есть отдельные правильные соображения – **1-2 балла.**

Есть часть необходимых для решения соображений, решение не закончено или содержит серьезные ошибки – **3-4 балла.**

Присутствует большая часть необходимых для решения соображений, правильно записана часть необходимых соотношений, решение не закончено или содержит ошибки – **5-7 баллов.**

Присутствуют все необходимые для решения соображения, правильно записаны почти все необходимые для решения исходные уравнения, но решение не закончено или содержит ошибки – **8-10 баллов.**

Присутствуют все необходимые для решения соображения, правильно записаны все необходимые для решения исходные уравнения, решение выстроено правильно с физической и логической точки зрения, но содержит ошибки – **11-14 баллов.**

Присутствуют все необходимые для решения соображения, правильно записаны все необходимые для решения исходные уравнения, решение выстроено правильно с физической и логической точки зрения, но содержит одну-две мелкие неточности, не позволившие получить правильный ответ, или правильное решение с недостаточным обоснованием существенных использованных результатов – **15-17 баллов.**

Правильное обоснованное решение с верным аналитическим ответом, но мелкой неточностью при получении численного ответа, либо правильное решение с правильными ответами с недостаточным обоснованием одного из использованных результатов (из числа не ключевых для решения, но необходимых) – **18-19 баллов.**

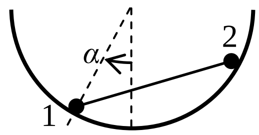
Полное, правильное, обоснованное решение с правильными ответами – **20 баллов (максимальная оценка).**

Задание 1:

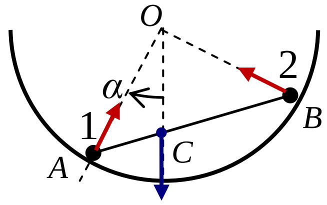
Вопрос: При выполнении каких условий твердое тело может находиться в состоянии покоя под действием трех сил, линии действия которых не параллельны?

Ответ: Условия равновесия твердого тела требуют равенства нулю векторной суммы всех приложенных к телу сил и суммы моментов этих сил: $\sum_i \vec{F}_i = 0$, $\sum_i M_i = 0$. Для случая трех непараллельных сил, линии действия которых лежат в одной плоскости, последнее требование можно сделать более наглядным: если выбрать для подсчета моментов ось, проходящую через точку пересечения линий действия двух сил, то моменты этой пары сил равны нулю, и поэтому должен быть равен нулю и момент третьей силы, и поэтому ее линия действия должна проходить через ту же точку! Итак, в этом случае линии действия всех трех сил должны пересекаться в одной точке.

Задача: «Гантель» из легкого жесткого стержня и двух массивных маленьких шариков одинакового радиуса положили в гладкую полусферическую «ямку». Длина стержня в $\sqrt{2}$ раз больше радиуса ямки. Оказалось, что гантель находится в равновесии, если радиус, проведенный к первому шарику, составляет угол $\alpha = 30°$ с вертикалью. Найти отношение масс шариков.



Решение: На стержень с шариками действуют силы нормальной реакции поверхности «ямки». Ясно, что линии их действия – радиусы сферы, и они пересекаются в центре сферической поверхности (точка O). В роли третьей силы здесь выступает равнодействующая сил тяжести шариков. Ее точка приложения – центр масс, а линия ее действия вертикальна и (как следует из ответа на вопрос) проходит через точку O. Таким образом, центр масс гантели – точка С. Значит, $\frac{m_1}{m_2} = \frac{|CB|}{|CA|}$. Кроме того, соотношение между длиной стержня и радиусом позволяет определить угол при вершине O в треугольнике OAB: это равнобедренный треугольник с основанием в $\sqrt{2}$ раз больше боковой стороны, и он является прямоугольным, а углы при основании равны $\frac{\pi}{4}$. Из теоремы синусов получим, что

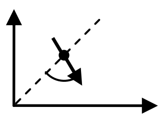


$|AC| = \sin(\alpha)\cdot\frac{|OC|}{\sin(\pi/4)}$ и $|BC| = \sin(\pi/2-\alpha)\cdot\frac{|OC|}{\sin(\pi/4)} = \cos(\alpha)\cdot\frac{|OC|}{\sin(\pi/4)}$, поэтому $\frac{m_1}{m_2} = ctg(\alpha) = \sqrt{3}$.

ОТВЕТ: $\frac{m_1}{m_2} = ctg(\alpha) = \sqrt{3}$.

Примечание: Можно решать эту задачу и «традиционным» способом – записав уравнение моментов для сил, действующих на шарики, но в этом случае тоже удобнее считать моменты относительно точки O.

Задание 2:



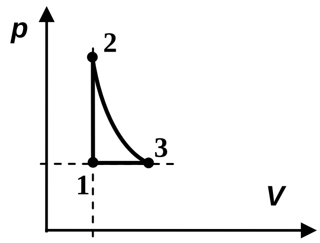
Вопрос: Диаграмма процесса с идеальным газом пересекает биссектрису координатного квадранта $p-V$ под углом $75°$ к этой биссектрисе, как показано на рисунке. Получает или отдает газ тепло в этом процессе в окрестности этой точки?

Ответ: Диаграмма процесса в данной точке наклонена к оси объемов под углом 180°-(75°+45)°=60°, поэтому на этой диаграмме связь малых приращений давления и объема $\frac{\delta p}{p_0} \approx -tg(60°)\frac{\delta V}{V_0} = -\sqrt{3}\frac{\delta V}{V_0}$. Количество теплоты для малого участка диаграммы процесса с одноатомным идеальным газом

$$\delta Q \approx p\delta V + \frac{3}{2}\delta(pV) = \frac{5}{2}p\delta V + \frac{3}{2}V\delta p = \frac{p_0\delta V}{2V_0}\left[5V_0 - 3\sqrt{3}V_0\right] = -\frac{3\sqrt{3}-5}{2}p_0\delta V < 0.$$

Итак, газ <u>отдает</u> тепло. Ясно, что для двухатомного и трехатомного газов δQ тем более будет отрицательным.

Задача: На рисунке представлена $p-V$-диаграмма процесса над идеальным одноатомным газом, некоторое количество которого является рабочим телом тепловой машины. В этом цикле расширение газа происходит адиабатически. Давление газа в точке 2 на $n\%$ больше его давления в точке 1, а объем в точке 3 – на $k\%$ больше объема в точке 1. Известно, что n и k



связаны соотношением: $n/k = 8/3$. Найти КПД цикла.

Решение: Нетрудно заметить, что газ получает тепло только в процессе 1-2, а отдает – только в процессе 3-1. Поэтому $Q_H = Q_{12} = \frac{3}{2}(p_2 - p_1)V_1 = \frac{3}{2}np_1V_1$, а $Q_X = -Q_{31} = \frac{5}{2}p_1(V_3 - V_1) = \frac{5}{2}kp_1V_1$. Следовательно, КПД цикла $\eta = 1 - \frac{Q_X}{Q_H} = 1 - \frac{5k}{3n} = \frac{3}{8}$.

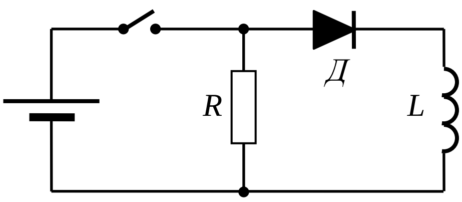
Ответ: $\eta = 1 - \frac{5k}{3n} = \frac{3}{8} = 37{,}5\%$.

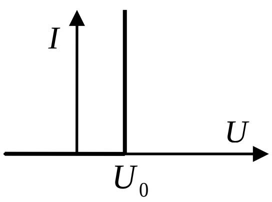
Задание 3:

Вопрос: Какие физические процессы способствуют тому, что проводимость полупроводникового диода существенно зависит от полярности приложенного напряжения?

Ответ: Типичный полупроводниковый диод состоит из двух слоев полупроводника с разным типом проводимости – у одного *n* (в роли свободных носителей заряда выступают отрицательно заряженные электроны), а у другого – *p* («дырочный»: у атомов его структуры есть незанятые электронные состояния – «вакансии» - так что электроны соседних атомов переходят в эти состояния под действием внешнего поля, и этот процесс рассматривают как движение положительно заряженной «дырки» в противоположную по отношению к направлению перемещений связанных электронов сторону). В зоне контакта материалов за счет диффузии электронов и дырок через границу нейтральных материалов возникают два слоя, содержащие отрицательный и положительный заряд (область *pn*-перехода). Поле этой системы зарядов останавливает диффузию. При появлении внешнего электрического поля его действие способствует диффузии (зона *pn*-перехода расширяется) или подавляет ее (сужается). Поэтому при разной полярности приложенного напряжения либо препятствует протеканию тока (причем этот режим поддерживается при увеличении внешнего поля вплоть до пробоя полупроводника, когда концентрация свободных носителей заряда резко увеличивается), либо помогает.

Задача: В схеме, показанной на рисунке слева, диод *Д* не является идеальным – его вольтамперная характеристика показана на рисунке справа. В некоторый момент времени, когда ток в катушке был равен нулю, ключ замкнули. Найти силу тока, который будет течь через резистор спустя достаточно большой промежуток времени. ЭДС и внутреннее сопротивление источника равны соответственно $\mathcal{E}$ и r, омическое сопротивление катушки равно по величине внутреннему сопротивлению источника, сопротивление резистора R и пороговое напряжение диода U_0 считать известными.





Решение: В этой схеме спустя достаточно большой промежуток времени токи станут постоянными, и ЭДС самоиндукции в катушке станет равна нулю. Таким образом, катушка будет в установившемся режиме вести себя как резистор с сопротивлением, равным внутреннему сопротивлению источника. Если диод в этом режиме будет находиться в открытом состоянии, то ток будет течь и через резистор, и через ветвь с диодом и катушкой. Пусть I – сила тока в ветви с источником, а I_R и I_D – силы тока в ветвях с резистором и диодом соответственно. Тогда, по закону Ома $\mathcal{E} - Ir = I_R R = U_0 + I_D r$, откуда $I_R = \frac{\mathcal{E} - Ir}{R}$ и $I_D = \frac{\mathcal{E} - U_0 - Ir}{r}$. Подставим эти выражения в уравнение непрерывности тока $I = I_R + I_D$, и найдем, что $I=\dfrac{\mathcal{E}(R+r)-RU_0}{r(2R+r)}$. Значит, $I_R=\dfrac{\mathcal{E}+U_0}{2R+r}$. Однако этот ответ справедлив только тогда, когда выполняется предположение о том, что диод открыт, то есть если эти уравнения приводят к $I_D=\dfrac{\mathcal{E}R-(R+r)U_0}{r(2R+r)}>0$, то есть при $\mathcal{E}>\dfrac{R+r}{R}U_0$. При $\mathcal{E}\le\dfrac{R+r}{R}U_0$ диод заперт, и тогда очевидно, что $I_R=\dfrac{\mathcal{E}}{R+r}$.

ОТВЕТ: $I_R=\begin{cases}\dfrac{\mathcal{E}+U_0}{2R+r}, & \mathcal{E}>\dfrac{R+r}{R}U_0\\ \dfrac{\mathcal{E}}{R+r}, & \mathcal{E}\le\dfrac{R+r}{R}U_0\end{cases}$.

Задание 4:

Вопрос: Чему может быть равно увеличение (отношение размера изображения к размеру предмета), даваемое тонкой собирающей линзой?

Ответ: Из построения хода лучей для линзы ясно, что поперечное увеличение предмета равно отношению расстояний от линзы до изображения b и от линзы до источника a: $\Gamma_\perp=-\dfrac{b}{a}$ (увеличение принимают отрицательным, когда изображение перевернуто.). Из формулы линзы $\dfrac{1}{a}+\dfrac{1}{b}=\dfrac{1}{F}\Rightarrow b=\dfrac{aF}{a-F}\Rightarrow\Gamma_\perp=\dfrac{F}{F-a}$. Для разных действительных источников $a>0$ мы можем получить $\Gamma_\perp\ge1$ (при $0\le a<F$), $\Gamma_\perp<0,|\Gamma_\perp|\ge1$ (при $F<a\le2F$) и $\Gamma_\perp<0,|\Gamma_\perp|<1$ (при $a>2F$). В случае $a=F$ изображения нет – каждая точка объект преобразуется в пучок параллельных лучей.

***Примчание*:** Допустим ответ про модуль поперечного увеличения.

Задача: Тонкая линза, используемая в качестве лупы, дает на поверхности стола четкое изображение нити лампы, висящей под высоким потолком комнаты, если линза находится на расстоянии $l=6$ см от поверхности стола. С каким примерно увеличением будет наблюдаться текст на лежащей на столе странице, если глаз наблюдателя будет находиться на расстоянии $L=30$см от рассматриваемого изображения?

Решение задачи: Прежде всего заметим, что при использовании тонкой собирающей линзы в качестве лупы (то есть для рассматривания прямых увеличенных изображений) мы должны наблюдать мнимое изображение с заметным увеличением, для чего предмет должен находится чуть ближе к линзе, чем ее фокальная плоскость. Поскольку расстояние до нити лампы очень велико, то ее изображение в первом опыте должно наблюдаться в фокальной плоскости линзы. Значит, фокусное расстояние линзы $F\approx l$. Во втором опыте расстояние от глаза до изображения заметно больше фокусного расстояния линзы, и глаз должен находиться достаточно близко к линзе, поэтому можно считать, что расстояние от линзы до изображения примерно равно L. Теперь, воспользовавшись формулой линзы, найдем соответствующее расстояние от линзы до рассматриваемых фрагментов текста a: $\dfrac{1}{a}-\dfrac{1}{L}\approx\dfrac{1}{l}\Rightarrow a\approx\dfrac{Ll}{L+l}$ (как обычно, расстояние до мнимого изображения считается в этой формуле отрицательно). Значит,

$$|\Gamma_\perp|\approx\frac{L}{a}\approx\frac{L}{l}+1=6.$$

ОТВЕТ: $|\Gamma_\perp|\approx\dfrac{L}{l}+1=6$.