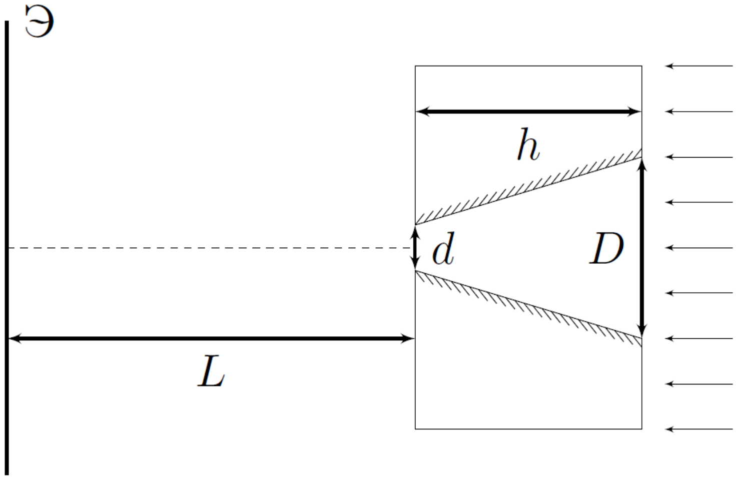
Всероссийская олимпиада школьников по физике

11 класс, заключительный этап, 2022/23 год

Задача 1. **Щель Кассини.** В непрозрачном плоском слое толщиной h просверлено отверстие, форма боковой поверхности которого представляет собой усечённый конус с диаметрами оснований d и D, ось которого перпендикулярна плоским поверхностям слоя. Боковая поверхность конуса посеребрена и идеально отражает падающий на неё свет. За слоем на расстоянии L от ближайшей к нему плоской поверхности слоя находится плоский экран.



Система освещается параллельным потоком света, направленным вдоль оси конуса.

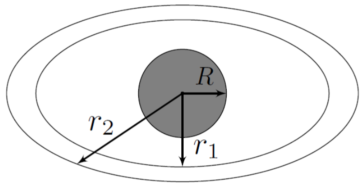
Геометрические параметры h, d, D и L связаны соотношениями: $D \ll h \ll L$, $D = 4d$.

1. Изобразите картину, наблюдаемую на экране. На рисунке укажите все характерные геометрические размеры.

2. Как изменится картина из пункта 1, если между слоем и экраном поместить тонкую собирающую линзу? Фокусное расстояние линзы $F = L/2$, главная оптическая ось линзы совпадает с осью конуса, экран расположен в фокальной плоскости линзы.

Примечание: все характерные геометрические размеры должны быть выражены через d, h и L.

Задача 2. **Похоже на Сатурн.** По поверхности тонкого плоского непроводящего кольца с внутренним и внешним радиусами r_1 и r_2 соответственно распределён положительный заряд с постоянной поверхностной плотностью σ. Центр непроводящего шара радиусом $R \ll r_1, r_2$ совпадает с центром кольца. Шар равномерно заряжен по объёму положительным зарядом Q.



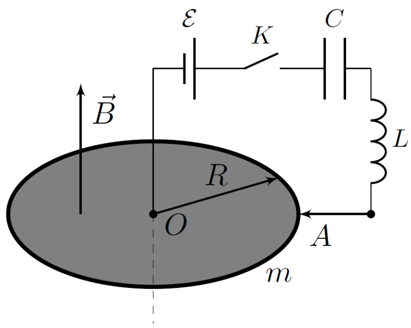
Примечание: Ответы на каждый из вопросов задачи должны быть упрощены с учётом приближения $R \ll r_1, r_2$.

1. В каких пределах изменяется модуль электрического поля на поверхности шара?

2. При каких значениях σ вектор напряжённости результирующего поля в точках на поверхности шара, удалённых от плоскости кольца на расстояние большее, чем 0,1R, можно считать направленным вдоль оси вращения системы? Заряд Q считайте известным.

1) $\left|\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 R^2} - \frac{\sigma R}{4\varepsilon_0}\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)\right| \leqslant E \leqslant \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 R^2} + \frac{\sigma R}{2\varepsilon_0}\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$; 2) $\sigma = \frac{Q r_1 r_2}{\pi R^3 (r_2 - r_1)}$

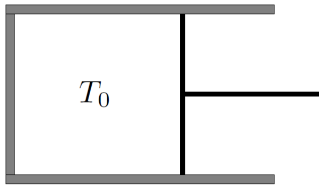
Задача 3. **Кружатся диски.** На рисунке показана схема электрической цепи, состоящей из источника с электродвижущей силой $\mathscr{E}$, конденсатора ёмкостью C, катушки индуктивностью L, ключа K и металлического диска радиусом R. Диск может вращаться вокруг своей оси без трения. Диск расположен в однородном магнитном поле с индукцией $\vec{B}$, направленном вдоль его оси так, как показано на рисунке. Практически вся масса m диска сосредоточена в его тонком ободе. Источник соединён с диском в его центре O, а катушка индуктивности соединена с диском с помощью неподвижного скользящего контакта A. Омическим сопротивлением контура, по которому течёт ток, и наличием у него индуктивности (дополнительно к L) можно пренебречь. Изначально ключ K разомкнут, диск неподвижен, ток в катушке отсутствует, а конденсатор не заряжен. Ключ K замыкают.



Определите максимальную угловую скорость диска $\omega_{\max}$ после замыкания ключа, а также время τ после замыкания ключа, через которое угловая скорость диска впервые достигает значения $\omega_{\max}$.

1) $\omega_{\max} = \frac{4BC\mathscr{E}}{4m + B^2R^2C}$; 2) $\tau = \frac{\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} + \frac{B^2R^2}{4mL}}}$

Задача 4. **Адиабатическая анизотропия.** В горизонтальный цилиндрический сосуд герметично вставлен поршень, перемещающийся с помощью прикреплённой к нему рукоятки. В сосуде находится насыщенный пар воды при температуре $T_0 = 333$ К. Жидкой фазы воды в сосуде нет.



Водяной пар можно считать идеальным многоатомным газом. Удельная теплота парообразования воды при температуре T_0 равна $L = 2{,}36$ МДж/кг и в рамках задачи может считаться не зависящей от температуры. Универсальная газовая постоянная равна $R = 8{,}31$ Дж/(моль $\cdot$ К). Молярная масса воды равна $\mu = 18{,}0$ г/моль.

Считайте известным, что малые относительные изменения давления насыщенного пара и его абсолютной температуры вблизи значений $p_0(T_0)$ и T_0 соответственно связаны соотношением $\varepsilon_p = \Delta p/p_0 = \alpha\varepsilon_T = \alpha\Delta T/T_0$, где $\alpha = 15{,}3$.

1. Температуру в сосуде начинают медленно изменять. Объём сосуда изменяется таким образом, что всё вещество в сосуде всё время остаётся в газообразном состоянии, при этом водяной пар всё время является насыщенным.

   Чему равна молярная теплоёмкость водяного пара в данном процессе?

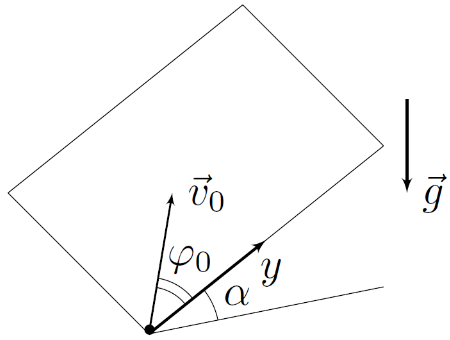
Рассмотрим адиабатически изолированный сосуд.

2. Найдите изменение температуры ΔT_1 в сосуде при медленном относительном уменьшении его объёма на величину $\beta = 5\%$.

3. Найдите изменение температуры ΔT_2 в сосуде при медленном относительном увеличении его объёма на величину $\beta = 5\%$.

1) $C_{\text{нас}} = R(4-\alpha) = -93{,}9$ Дж/(моль $\cdot$ К); 2) $\Delta T = \frac{\beta T_0}{3} \approx 5{,}6$ К; 3) $\Delta T = -T_0 \cdot \frac{\beta}{\alpha - 1 + \frac{(4-\alpha)RT_0}{\mu\lambda}} \approx -1{,}2$ К

Задача 5. **Туда-сюда.** На плоской доске, образующей с горизонтом угол $\alpha = 30{,}0^\circ$, находится маленькая шайба. Коэффициент трения между шайбой и доской равен $\mu = \operatorname{tg}\alpha$. Вблизи основания доски шайбе сообщают скорость $v_0 = 8{,}00$ м/с, и она движется по доске, пока снова не достигнет основания. Основание доски горизонтально. Известно, что в моменты старта и повторного достижения основания доски вектор скорости шайбы образовывал углы $\varphi_0 = 60{,}0^\circ$ и $\varphi_1 = 159{,}3^\circ$ соответственно с положительным направлением оси y, направленной вверх по доске (см. рис.). Ускорение свободного падения $g = 9{,}80$ м/с^2. Шайба не вращается.



Примечание: Ответ на каждый из вопросов задачи должен быть как рассчитан, так и выражен аналитически через заданные в условии величины!

1. Определите ускорения шайбы a_0 и a_1 в момент старта и прямо перед повторным достижением основания доски соответственно.

2. Определите скорости шайбы u и v_1 в верхней точке траектории и прямо перед повторным достижением основания доски соответственно.

3. Определите время t, через которое шайба повторно достигает основания доски.

3) $t = \frac{v_0(1-\cos\varphi_0)}{2g\sin\alpha}\left(\frac{1}{1-\cos\varphi_0} - \frac{1}{1-\cos\varphi_1} + \ln\left(\frac{\operatorname{tg}(\varphi_1/2)}{\operatorname{tg}(\varphi_0/2)}\right)\right) \approx 1{,}52$ с

2) $u = v_0(1-\cos\varphi_0) \approx 4{,}00$ м/с, $v_1 = \frac{v_0(1-\cos\varphi_0)}{1-\cos\varphi_1} \approx 2{,}07$ м/с;

1) $a_0 = 2g\sin\alpha\cos(\varphi_0/2) \approx 8{,}49$ м/с^2, $a_1 = 2g\sin\alpha\cos(\varphi_1/2) \approx 1{,}76$ м/с^2;