



80-я Московская олимпиада школьников по физике
2019 год
11 класс, второй тур



Условия задач, ответы, критерии оценивания

1. Шарик на ниточке (10 баллов), Крюков П. А., Ромашка М. Ю.

Человек раскручивает в вертикальной плоскости полиуретановый шарик, закреплённый на одном конце тонкой, но прочной, нерастяжимой нитки, держась за петельку на другом её конце. Когда скорость шарика становится достаточно большой и почти перестаёт изменяться, точка, в которой человек держит петлю, движется по окружности радиусом r . Определите минимально возможное значение r , если длина нитки между петлёй и шариком равна $L = 1$ м, а радиус шарика равен 1 см. Плотность полиуретана равна $\rho = 1200$ кг/м³. Сила сопротивления воздуха даётся соотношением $F_D = \frac{\rho_0 v^2}{4} S$, где ρ_0 — плотность воздуха, S — площадь поперечного сечения шара, v — его скорость. Молярная масса воздуха равна $\mu = 29$ г/моль. Воздух находится при нормальных условиях. Можно считать, что $v \gg \sqrt{gL}$. Ускорение свободного падения равно $g = 10$ м/с².

2. Плазменная частота (12 баллов), Лэнгмюр И.

Частоту колебаний пространственного заряда в плазме (ионизованном газе) можно определить на основании следующих модельных представлений. Имеется слой плазмы в виде прямоугольного параллелепипеда. Концентрация ионов с зарядом $+e$ равна n и равна концентрации электронов. Ионы и электроны в слое распределены однородно. Можно считать, что слой электронов накладывается на слой ионов. Толщина слоя d много меньше других его линейных размеров. При малом смещении x ($x \ll d$) слоя электронов в направлении нормали к слою (рис. 1) возникают малые колебания. Определите угловую частоту ω этих колебаний. Считайте, что однородность распределения зарядов не нарушается, концентрация не меняется, ионы (поскольку они тяжёлые) — неподвижны. Масса электрона равна m_e , его заряд равен e .

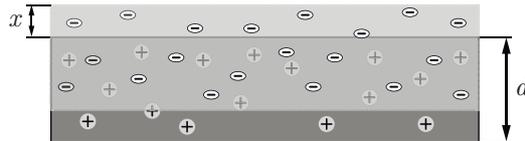


Рис. 1

3. Цепь с неизвестными (14 баллов), Крюков П. А.

В цепи, изображённой на рис. 2, сопротивление каждого из резисторов равно R . Выводы A и B цепи на время t_0 подключают к идеальному источнику с ЭДС \mathcal{E} . Индуктивность катушки и ёмкость конденсатора подобраны таким образом, что при подключенном источнике в любой момент времени разность потенциалов точек E и F равна нулю. Определите заряд, протекающий через источник за время t_0 . Если за время подключения источника в резисторах суммарно выделяется количество теплоты Q , то какое количество теплоты выделится в одном резисторе после отключения источника?

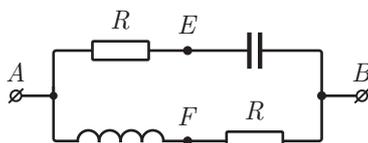


Рис. 2

4. Фотография пластины (18 баллов)

Бычков А. И., Крюков П. А.

Диск толщиной около 1,5 см, сделанный из прозрачного материала, разрезали вдоль одного из диаметров. Получившуюся пластину, имеющую форму половины цилиндра, поставили на «миллиметровку», так что поверхность, вдоль которой разрезали диск, оказалась обращена вниз, а выпуклая поверхность полуцилиндра — вверх. Затем эту пластину фотографируют сверху, стараясь ориентировать оптическую ось объектива фотоаппарата вертикально (рис. 3), так чтобы она проходила через середину пластины. Фотография приведена ниже.

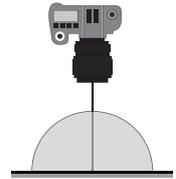


Рис. 3

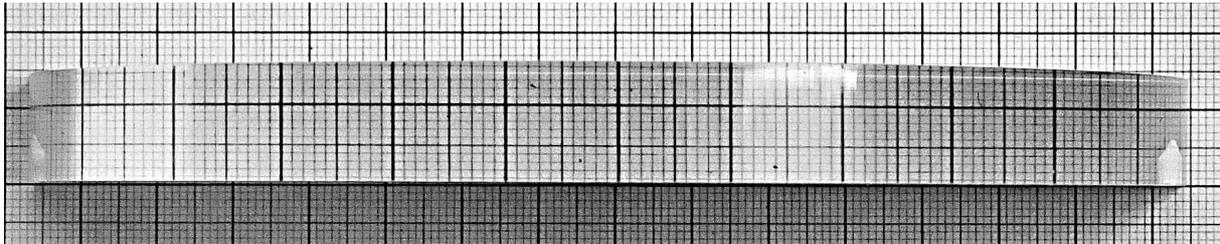


Рис. 4

- 1) Определите показатель преломления материала пластины. (9 баллов)
- 2) На фотографии внутри пластины видны изображения полос сетки. Какое максимальное количество изображений полос, перпендикулярных пластине, может увидеть наблюдатель, располагающийся на расстоянии $h = 15$ см над центром пластины? (6 баллов)
- 3) Оцените расстояние H от «миллиметровки» до главной плоскости объектива фотоаппарата при фотографировании пластины. (3 балла)

5. Электрокалорический генератор (18 баллов)

В электродинамике при описании диэлектриков вводится в рассмотрение вектор электрической индукции \mathbf{D} . Вектор \mathbf{D} количественно характеризует поле только (!) свободных зарядов, вектор \mathbf{E} — поле свободных зарядов и поляризационных зарядов, возникающих в диэлектриках. Обычно вектор \mathbf{D} пропорционален вектору \mathbf{E} . Однако, существуют материалы (*сегнетоэлектрики*) с нелинейной зависимостью \mathbf{D} от \mathbf{E} . В этой задаче векторы \mathbf{D} и \mathbf{E} сонаправлены. Схематично вид зависимости $D(E)$ для типичного сегнетоэлектрика при постоянной температуре показан на рис. 5 чёрной линией. Зависимость $D(E)$ для того же сегнетоэлектрика при более высокой температуре схематично показана серой линией. Обе зависимости обладают ярко выраженным гистерезисом, иначе говоря, значение D для данного E зависит от характера изменения поля E (увеличивается или уменьшается). Впрочем, в данной задаче это несущественно.

Вид зависимости $D(E)$ в некоторых сегнетоэлектриках весьма сильно меняется с температурой, что позволяет их использовать для преобразования тепловой энергии в электрическую. Присоединим конденсатор с сегнетоэлектриком к идеальному источнику постоянного напряжения. Периодически изменяя температуру сегнетоэлектрика, можно получить периодически изменяющийся ток в цепи. При этом работа источника напряжения за цикл будет равна нулю. Получится преобразователь тепловой энергии в работу тока. Можно считать, что сегнетоэлектрик — это своеобразное рабочее тело тепловой машины, которое характеризуется параметрами: D , E , T .

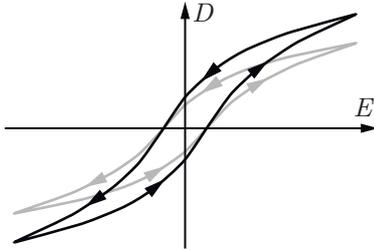


Рис. 5

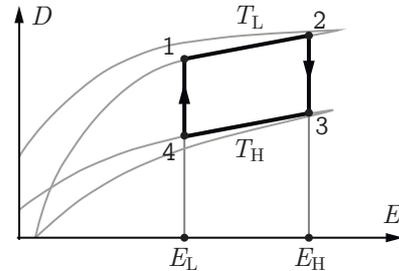


Рис. 6

Рассмотрим модельный цикл, показанный на рис. 6. Процессы 1–2 и 3–4 — зарядка и разрядка конденсатора с сегнетоэлектриком при постоянной температуре. 2–3 и 4–1 — нагревание и охлаждение при постоянном электрическом поле. Цикл имеет форму параллелограмма.

Термодинамика сегнетоэлектрика описывается соотношениями, справедливыми для малых (!) изменений параметров ΔE , ΔD , ΔT :

$$\Delta D = \varepsilon_0 \varepsilon \Delta E + p \Delta T, \quad \frac{\Delta Q}{V} = c \Delta T + p T \Delta E, \quad \frac{\Delta A}{V} = D \Delta E,$$

где ε , p и c ($\varepsilon > 0$, $p < 0$, $c > 0$) — известные постоянные коэффициенты. Объём V считается постоянным. ΔQ и ΔA — количество теплоты и работа при малых изменениях параметров. Для решения задачи этих соотношений достаточно.

1) Определите КПД цикла 1234. Величины E_L , E_H и T_L , T_H считайте известными ($T_L < T_H$). Если предположить, что E_L и E_H могут изменяться неограниченно, то чему равен максимальный КПД этого цикла? (7 баллов)

2) Изобразите качественно на диаграмме D – E термодинамический цикл $12'34'$, в котором на участках 1–2' и 3–4' зарядка и разрядка конденсатора с сегнетоэлектриком происходят адиабатически. Температуры в точках 1 и 3 равны T_L и T_H . (5 баллов)

3) Определите КПД цикла из п. 2), считая E_L , E_H и T_L , T_H известными, а изменения параметров D , E и T в пределах цикла малыми. У какого цикла при одинаковых E_L , E_H , $T_1 = T_L$ и $T_3 = T_H$ больше КПД — у 1234 или у $12'34'$? (6 баллов)