Физика для школьников

Физика

Категория участников: школьники 7-11 классов

Блок теоретических заданий по **физике для школьников 7-11 классов** включает задачи разной сложности. Для повышения вероятности прохождения на очный тур Вам желательно решить задачи не только по физике, но и по химии, математике, биологии, чтобы набрать больше баллов. Все прошедшие на очный тур обязательно решают задачи по всем четырем предметам.

Задания

1. Двойная нанопленка

Для улучшения оптических свойств материала часто используют специальные просветляющие покрытия. Студент МГУ Вася пошел обратным путем: вместо нанесения покрытий, он протравил кислотой часть кремниевого кристалла...

2. Покрытия для солнечных элементов

Для создания дешевых солнечных элементов используется технология осаждения из газовой фазы тонких (порядка сотен нм) плёнок аморфного кремния. Для получения пленок, легированных бором (B), используют осаждение из смеси газов моносилана SiH_4 и диборана B_2H_6...

3. Магнетронное напыление

Магнетронное напыление – способ нанесения тонких пленок. Метод заключается в бомбардировке мишени ионами инертных газов в скрещенных электрических и магнитных полях. Вынесенное вещество осаждается на подложке тонким слоем – от нескольких единиц нанометров и более...

4. Нагрев электронным пучком

При исследовании наночастиц методом просвечивающей электронной микоскопии высокого разрешения (ПЭМ ВР) замечено, что исследуемые образцы нагреваются и плавятся. Оцените энергию электронов в пучке просвечивающего микроскопа...

5. Наноспутники

Согласно принятой классификации малых космических аппаратов, наноспутником называется аппарат массой от 1 до 10 кг. С появлением и развитием концепции таких малых спутников появилось новое направление в современном ракетостроении – разработка микроракет...

6. Дифракция на нанокристаллах

Дифракция рентгеновских лучей на кристаллах была открыта в 1912 году немецкими учеными под руководством Макса Лауэ. Это открытие доказало волновую природу рентгеновских лучей, так как оказалось, что для объяснения этого явления можно рассматривать...

7. Фотоэлектронная спектроскопия наноматериалов

Одним из методов диагностики структуры материалов является рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС). Этот метод позволяет получать информацию о составе и характере взаимодействия атомов в тонком приповерхностном слое исследуемого образца...

8. Наносенсор на вирусы

Юный изобретатель Саша предложил схему наносенсора, чувствительного на вирусы. Сенсор представляет из себя двухслойную структуру: нижний слой – пористый кремний pSi (пористость P = 50%, размер пор – 5 нм) толщиной d_1 = 100 мкм...

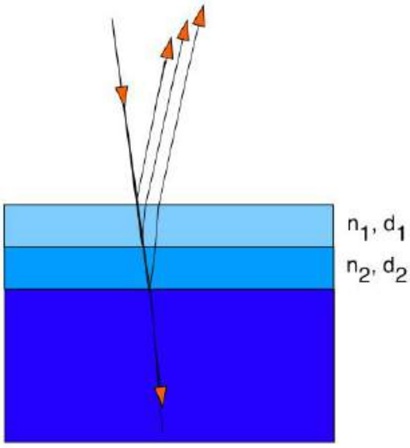
9. Из крайности в крайность

Известно, что механизм диффузии газов через пористые среды во многом обусловлен числом Кнудсена *Kn*, которое равно отношению длины свободного пробега молекул этого газа *l* к диаметру пор *d*. Так, при $Kn \ll 1$ реализуется вязкое течение газа в порах...

10. Автостопом на комете

В качестве альтернативы «обычным» ракетным двигателям инженеры NASA предложили использовать для разгона космических кораблей трос, сделанный из углеродных нанотрубок (УНТ). В предложенной схеме космический корабль «ловит» на кончик троса пролетающую мимо комету...

Физика для школьников 7 – 11 класса (заочный тур)
Задача 1. Двойная нанопленка



Для улучшения оптических свойств материала часто используют специальные просветляющие покрытия. Студент МГУ Вася пошел обратным путем: вместо нанесения покрытий, он протравил кислотой часть кремниевого кристалла, который хорошо пропускает свет в инфракрасном диапазоне. В результате получился нанопористый слой толщиной d_1 на поверхности с показателем преломления n_1, меньшим, чем у кремния. Размер пор составлял порядка 50 нм, поэтому слой получился оптически-однородным. Затем Вася протравил второй слой толщиной d_2, изменив параметры травления, и получил показатель преломления в нем $n_2 > n_1$.

1. Используя полученную структуру, Вася стал изучать интерференцию отраженных лучей, падающих по нормали к поверхности. Считая интенсивности всех трех отраженных лучей равными, сформулируйте критерии интерференционных минимумов. **(7 баллов)**

2. Приведите пример толщин d_1, d_2, при которых наблюдается минимум для длины волны l = 1200 нм, если n_1 = 1.6, а n_2 = 2. **(3 балла)**

Всего – 10 баллов

Физика для школьников 7 – 11 класса (заочный тур)
Решение задачи 1. Двойная нанопленка

Учитывая разность хода волн, зависимость напряженности электрического поля можно для каждого из трех лучей выразить как:

$$E_1 = E_0 cos(\omega t) \tag{1}$$

$$E_2 = E_0 cos(\omega t - \alpha) \tag{1}$$

$$E_3 = E_0 cos(\omega t - \alpha - \beta) \tag{2}$$

при этом:

$$\alpha = \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \tag{3}$$

$$\beta = \frac{2\pi n_2 d_2}{\lambda} \tag{4}$$

Таким образом, суммарная напряженность *E* будет равна:

$$E = E_0 cos(\omega t) + E_0 cos(\omega t - \alpha) + E_0 cos(\omega t - \alpha - \beta) \tag{5}$$

$$E = E_0\big(cos(\omega t) + cos(\omega t)cos\alpha + sin(\omega t)sin\alpha + cos(\omega t)cos(\alpha + \beta) + sin(\omega t)sin(\alpha + \beta)\big) \tag{6}$$

$$E = E_0\left(cos(\omega t)\big(1 + cos\alpha + cos(\alpha + \beta)\big) + sin(\omega t)\big(sin\alpha + sin(\alpha + \beta)\big)\right) \tag{7}$$

Для того, чтобы привести к формуле косинуса суммы, вычислим сумму квадратов коэффициентов при cos и sin ωt:

$$\Sigma = \big(1 + cos\alpha + cos(\alpha + \beta)\big)^2 + \big(sin\alpha + sin(\alpha + \beta)\big)^2 = 1 + cos^2\alpha + cos^2(\alpha + \beta) + 2cos\alpha + 2cos(\alpha + \beta) + 2cos\alpha cos(\alpha + \beta) + sin^2\alpha + sin^2(\alpha + \beta) + 2sin\alpha sin(\alpha + \beta) \tag{8}$$

Учитывая основное тригонометрическое тождество и формулу для косинуса разности, получаем

$$\Sigma = 3 + 2cos\alpha + 2cos(\alpha + \beta) + 2[cos\alpha cos(\alpha + \beta) + sin\alpha sin(\alpha + \beta)] = 3 + 2cos\alpha + 2cos(\alpha + \beta) + 2cos\beta \tag{9}$$

Далее используем формулу для косинуса двойного угла (a + b) и формулу для суммы косинусов:

$$\begin{gathered}\Sigma = 3 + 2cos\alpha + 2cos\beta + 4cos^2\left(\frac{\alpha+\beta}{2}\right) - 2 = \\ 1 + 4cos^2\left(\frac{\alpha+\beta}{2}\right) + 4cos\left(\frac{\alpha+\beta}{2}\right)cos\left(\frac{\alpha-\beta}{2}\right) = \\ 1 + 4cos\left(\frac{\alpha+\beta}{2}\right)\left(cos\left(\frac{\alpha+\beta}{2}\right) + cos\left(\frac{\alpha-\beta}{2}\right)\right) = \\ 1 + 8cos\left(\frac{\alpha+\beta}{2}\right)cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)cos\left(\frac{\beta}{2}\right)\end{gathered} \qquad (10)$$

С учетом полученного тождества выражение для напряженности поля примет вид:

$$E = E_0\sqrt{\Sigma}cos(\omega t + \phi_0), \qquad (11)$$

где ϕ_0 – сдвиг фаз. Отсюда амплитуда интенсивности отраженного луча будет равна:

$$I = I_0\Sigma \qquad (12)$$

Очевидно, что критерием минимума является равенство нулю Σ:

$$cos\left(\frac{\alpha+\beta}{2}\right)cos\frac{\alpha}{2}cos\frac{\beta}{2} = -\frac{1}{8} \qquad (13)$$

Критерий выполняется, например, в случае:

$$\begin{gathered}\frac{\alpha}{2} = \frac{\beta}{2} = -\frac{\pi}{3} + 2\pi n, n \in Z \\ \alpha = \beta = -2\frac{\pi}{3} + 2\pi n, n \in Z\end{gathered} \qquad (14)$$

Подставляя значения для сдвигов по фазе:

$$2\pi n_1\frac{d_1}{\lambda} = 2\pi n_2\frac{d_2}{\lambda} = 4\frac{\pi}{3} \qquad (15)$$

$$n_1 d_1 = n_2 d_2 = 2\frac{\lambda}{3} = 800\ \text{нм} \qquad (16)$$

Отсюда d_1 = 500 нм, d_2 = 400 нм.

Физика для школьников 7 – 11 класса (заочный тур)
Задача 2. Покрытия для солнечных элементов

Для создания дешевых солнечных элементов используется технология осаждения из газовой фазы тонких (порядка сотен нм) плёнок аморфного кремния. Для получения пленок, легированных бором (B), используют осаждение из смеси газов моносилана SiH_4 и диборана B_2H_6 после термического разложения газов. Для получения контролируемой концентрации примеси, получают смесь газов в нужной пропорции. Для этого газы напускают в камеру, где происходит осаждение, из двух сосудов одинакового объема. В первом содержится силан при давлении $P_1 = 10^5$ Па и температуре $T_1 = 200°C$, а во втором диборан при некотором давлении P_2 и температуре $T_2 = 20°C$.

1. Каким должно быть давление P_2, чтобы концентрация примеси в пленке аморфного кремния составляла $n = 10^{19}$ см$^{-3}$? (**5 баллов**)

2. Какой объем газа силана потребуется пропустить через сосуд с $P_1 = 10^5$ Па и $T_1 = 200°C$ для того, чтобы выросла плёнка аморфного кремния, толщиной $d = 10$ нм и площадью $S = 10$ мм^2? (**5 баллов**)

Всего – 10 баллов

Физика для школьников 7 – 11 класса (заочный тур)
Решение задачи 2. Покрытия для солнечных элементов

1. В 1 см^3 аморфного кремния содержится $5{\cdot}10^{22}$ атомов. Атомов примеси – 10^{19}, т. е. в 5000 раз меньше. С учетом того, что при термическом разложении силана $SiH_4 \xrightarrow{600-700^oC} Si + 2H_2$ из одной молекулы газа образуется один атом кремния, а при термическом разложении диборана $B_2H_6 \xrightarrow{300-550^oC} 2B + 3H_2$ из одной молекулы диборана образуются два атома бора, следует, что молекул силана больше в 10^4 раз.

   Из уравнения идеального газа $P = nkT$ следует, что

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{P_1T_2}{P_2T_1} = 10^4, \quad P_2 = \frac{P_1T_2}{10^4T_1} = \frac{10^5\text{Па}(273+20)}{10^4(273+200)} \approx 6{,}2\ \text{Па}$$

2. Объем газа найдем из основного уравнения идеального газа $V = \frac{\nu RT_1}{P_1}$.
   Количество вещества будет тем же, что и в плёнке аморфного кремния:

$$\nu = \frac{N_{a-Si}}{N_A} = \frac{\rho V}{N_A m_0} = \frac{\rho Sd}{N_A m_0} = \frac{4{,}9\cdot 10^{22}\text{см}^{-3}\cdot 10^{-7}\text{см}^3}{6{,}0\cdot 10^{23}} \approx 8\cdot 10^{-9}\text{моль}$$

$$V = \frac{\nu RT_1}{P_1} = \frac{8\cdot 10^{-9}\text{моль}\cdot 8{,}3\frac{\text{Дж}}{\text{К}\cdot\text{моль}}\cdot 473\text{К}}{10^5\text{Па}} = 3\cdot 10^{-10}\ \text{м}^3 = 0{,}3\ \text{мм}^3 = 3\cdot 10^{-4}\ \text{см}^3$$

Физика для школьников 7 – 11 класса (заочный тур)
Задача 3. Магнетронное напыление

Магнетронное напыление – способ нанесения тонких пленок. Метод заключается в бомбардировке мишени ионами инертных газов в скрещенных электрических и магнитных полях. Вынесенное вещество осаждается на подложке тонким слоем – от нескольких единиц нанометров и более. Поверхность мишени, расположенная между местами входа и выхода силовых линий магнитного поля, интенсивно распыляется и имеет вид замкнутой дорожки, геометрия которой определяется формой полюсов магнитной системы.

При подаче постоянного напряжения между мишенью (отрицательный потенциал) и анодом (положительный или нулевой потенциал) возникает электрическое поле и возбуждается тлеющий разряд. Наличие замкнутого магнитного поля у распыляемой поверхности мишени позволяет локализовать плазму разряда непосредственно у мишени.

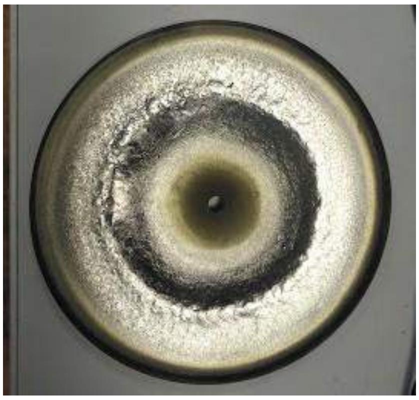


Рис. 1. Мишень после распыления. Вид сверху.

1. Полагая электрическое поле однородным и перпендикулярным поверхности, а магнитное – направленным по радиусу (см. рис. 2), оценить высоту слоя, в котором будут локализованы электроны, движущиеся в скрещенных полях. Считать, что электрон имеет нулевую начальную скорость и находится у поверхности. $\boldsymbol{E}$ = 100 В, $\boldsymbol{B}$ = 0.001 Тл. **(5 баллов)**

2. Какова будет траектория электрона? **(4 балла)**

3. В какой области будут локализованы ионы аргона? **(1 балл)**

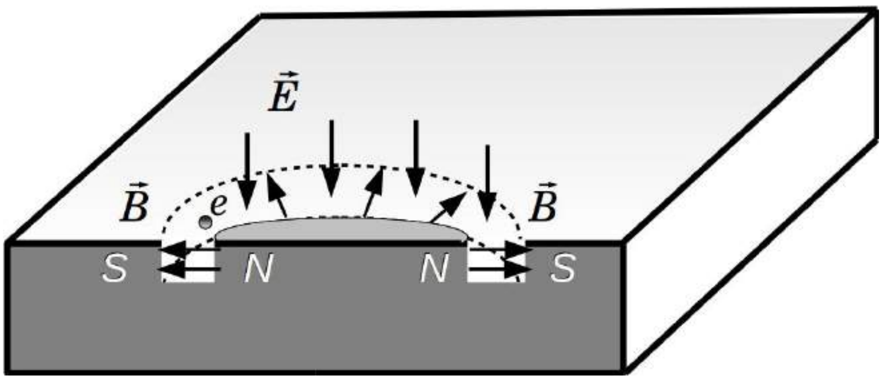
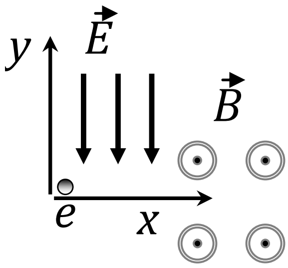


Рис. 2.

Всего – 10 баллов

Физика для школьников 7 – 11 класса (заочный тур)
Решение задачи 3. Магнетронное напыление

1. Чтобы найти траекторию движения, запишем 2-й закон Ньютона в проекции на оси X Y. (Ось Z сонаправлена магнитному полю, Y перпендикулярна мишени и противонаправлена электрическому полю).



Ниже учтено, что электрон имеет отрицательный заряд.

$$m\dot{v_x} = ev_yB_z$$
$$m\dot{v_y} = -ev_xB_z + eE$$

откуда приходим к уравнению колебаний для v_y с начальными условиями:

$$\ddot{v_y} = \frac{-e^2B_z^2}{m^2}v_y$$
$$v_y(0) = 0$$
$$\dot{v_y}(0) = \frac{eE}{m}$$
$$v_x(0) = 0$$
$$\dot{v_x}(0) = 0$$

Откуда получим:

$$\begin{matrix} v_x = v_0\big(1 - cos(\omega_0 t)\big) \\ v_y = v_0\big(sin(\omega_0 t)\big) \end{matrix}, \text{ где } \omega_0 = \frac{eB}{m}, v_0 = \frac{E}{B} \qquad \begin{matrix} x(t) = v_0t - \frac{v_o}{\omega_0}sin(\omega_0 t) + x_0 \\ y(t) = \frac{-v_0}{\omega_0}cos(\omega_0 t) + y_0 \end{matrix},$$

учитывая $\begin{matrix} x(0) = 0, y(0) = 0 \\ x_0 = 0,\ y_0 = \frac{v_0}{\omega_0} \end{matrix}$

2. Движение заряженной частицы в скрещенных полях будет происходить по циклоиде. Плоскость траектории перпендикулярна магнитному полю. Толщина слоя, в котором локализованы электроны, – это наивысшая точка циклоиды:

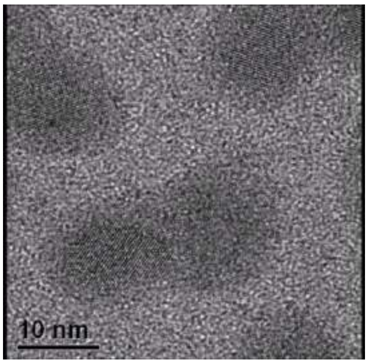
$$\Delta y = y(T/2) = \frac{v_0}{\omega_0}\left(1 - cos\left(\frac{\omega_0\pi}{\omega_0}\right)\right) = \frac{2v_0}{\omega_0} \approx 1 \text{ мм}$$

3. Масса ионов аргона на несколько порядков больше, поэтому в масштабах магнетронной установки они не будут локализованы, а полетят к мишени.

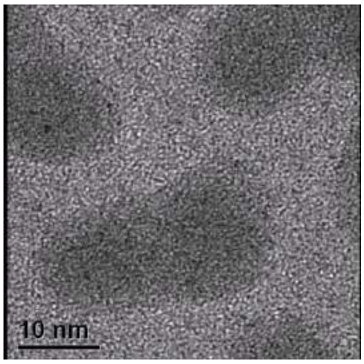
Физика для школьников 7 – 11 класса (заочный тур)

Задача 4. Нагрев электронным пучком

При исследовании наночастиц методом просвечивающей электронной микоскопии высокого разрешения (ПЭМ ВР) замечено, что исследуемые образцы нагреваются и плавятся (см.рис.).



Исходный снимок ПЭМ наночастиц.



Снимок ПЭМ тех же наночастиц, сделанный позже.

1. Оцените энергию электронов в пучке просвечивающего микроскопа, необходимую для разрешения атомов в кристаллической решетке? Ответ приведите в электронвольтах. Каким условием определяется эта энергия? **(3 балла)**

2. Часть электронов из пучка в микроскопе высокого разрешения, пройдя сквозь частицу индия диаметром 20 нм, рассеивается, теряя энергию. Чему равна минимальная энергия одного электрона, прошедшего через частицу индия, если в момент прохождения приемник рентгеновского излучения зарегистрировал квант характеристического излучения индия $K_{\alpha 1}$ E_1 = 24.2 кэВ, а частица расплавилась? Известно, что при прохождении через частицу электрон потерял половину своей энергии. Вторичные электроны не зарегистрированы. Первоначальная температура частицы 20 ^{o}C. При расчетах использовать справочные данные для макроскопического индия. **(7 баллов)**

Всего – 10 баллов

Физика для школьников 7 – 11 класса (заочный тур)
Решение задачи 4. Нагрев электронным пучком

1. Для того, чтобы разрешать отдельные атомы, необходимо, чтобы длина волны де Бройля была меньше межатомного расстояния. Межатомное расстояние имеет порядок единиц ангстрем. Поэтому λ ≤ 0,1 Å.

   Длина волны
$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2m_e E}}$$

   Энергия
$$E = \frac{h^2}{2m_e\lambda^2} = \frac{6^2 \cdot 10^{-68}\text{Дж}^2\text{с}^2}{2 \cdot 9 \cdot 10^{-31}\text{кг} \cdot 10^{-22}\text{м}^2} = 2 \cdot 10^{-15}\text{Дж} \approx 10\ \text{кэВ}$$

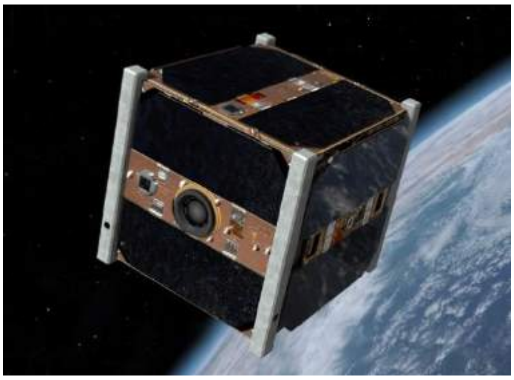
   На практике энергия в ПЭМ достигает 100 кэВ.

2. Энергия, которую электрон потратил, пошла на возбуждение атома с последующим испусканием рентгеновского кванта. Избыточная энергия выбитого электрона (т. к. вторичных электронов не было зарегистрировано, то он остался в нанокристалле) была передана кристаллической решетке, и пошла на нагрев с плавлением.

$$Q = E_{K\alpha 1} + c\nu\Delta t + \lambda\nu =$$
$$= 24{,}2\text{кэВ} + \left(26{,}7\frac{\text{Дж}}{\text{Кмоль}} \cdot 136K + 3{,}24\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}\right)\frac{7{,}3\frac{\text{г}}{\text{см}^3}\frac{4\pi}{3}10^{-18}\text{см}^3}{114\frac{\text{г}}{\text{моль}}} = 35{,}7\text{кэВ}$$

   Энергия одного электрона в 2 раза больше Q и равна 71,4 кэВ.

Физика для школьников 7 – 11 класса (заочный тур)
Задача 5. Наноспутники



Согласно принятой классификации малых космических аппаратов, наноспутником называется аппарат массой от 1 до 10 кг. С появлением и развитием концепции таких малых спутников появилось новое направление в современном ракетостроении – разработка микроракет, предназначенных для вывода на низкую околоземную орбиту (НОО) относительно небольшой полезной нагрузки (десятки и сотни килограммов).

Пусть микроракета «Заря» была спроектирована на выведение максимальной полезной нагрузки в 180 кг на круговую НОО с высотой над поверхностью Земли равной 1/20 от ее среднего радиуса. Оцените, какое максимальное количество наноспутников массой 8 кг каждый сможет вывести такая микроракета на круговую НОО с вдвое большей высотой орбиты? При расчетах ракету считать одноступенчатой с собственной массой 1320 кг (без топлива), а расход топлива при выходе на заданную орбиту – полным.

Всего – 10 баллов

Физика для школьников 7 – 11 класса (заочный тур)
Решение задачи 5. Наноспутники

Воспользуемся законом сохранения энергии. Микроракета совершает полезную работу, используя внутреннюю энергию топлива. Эта полезная работа преобразуется в выигрыш в полной механической (кинетической и потенциальной) энергии самой ракеты и выводимого ей на орбиту груза по сравнению со значением этой энергии у поверхности Земли. В системе отсчета, связанной с Землей, примем за ноль потенциальной энергии $E_{\text{пот}}$ точку, расположенную на бесконечном удалении от Земли, т.е. для тела массы m справедливо: $E_{\text{пот}}(r) = -\frac{mgR^2}{r}$, где R – средний радиус Земли. Тогда, учитывая отсутствие начальной кинетической энергии у груза массы m и ракеты массы M с запасом топлива ΔM, прирост их совокупной механической энергии при выходе на орбиту с радиусом r (он отсчитывается от центра Земли) составит:

$$\Delta E = E_{\text{кон}}(r) - E_{\text{нач}}(R) = \frac{(m+M)v^2}{2} - \frac{(m+M)gR^2}{r} + (m+M+\Delta M)gR$$

где учтено, что начальная энергия системы груз+ракета+топливо у поверхности Земли (r = R) равна:

$$-(m+M+\Delta M)gR$$

Поскольку орбита является круговой, конечная скорость груза и ракеты v будет определяться только радиусом орбиты: $v^2 = \frac{gR^2}{r}$. Тогда:

$$\Delta E = -\frac{(m+M)gR^2}{2r} + (m+M+\Delta M)gR$$

Приравнивая этот выигрыш для двух грузов различной массы $m_1 = 180$ кг и m_2 (суммарная масса наноспутников), выводимых на орбиты с радиусами r_1 и r_2, соответственно, получаем:

$$-\frac{(m_1+M)gR^2}{2r_1} + (m_1+M+\Delta M)gR = -\frac{(m_2+M)gR^2}{2r_2} + (m_2+M+\Delta M)gR$$

Подставляя $r_1 = R + \frac{R}{20}$ и $r_2 = R + \frac{R}{10}$ и упрощая, получаем:

$$\frac{11}{21}m_1 = \frac{6}{11}m_2 + \frac{5}{231}M$$

Откуда, подставляя $m_1 = 180$ кг и $M = 1320$ кг, получаем $m_2 \approx 120$ кг. Таким образом, микроракета может вывести на орбиту с радиусом r_2 максимум 15 наноспутников массой по 8 кг.

Физика для школьников 7 – 11 класса (заочный тур)
Задача 6. Дифракция на нанокристаллах

Дифракция рентгеновских лучей на кристаллах была открыта в 1912 году немецкими учеными под руководством Макса Лауэ. Это открытие доказало волновую природу рентгеновских лучей, так как оказалось, что для объяснения этого явления можно рассматривать кристалл как трехмерную дифракционную решетку. На рисунке 1 показана фотопластинка с рентгенограммой (темные области – рефлексы – соответствуют зонам концентрации рентгеновского излучения), полученной от тонкого образца монокристалла некоторого вещества (сориентированного нужным образом) при его облучении узким пучком рентгеновских лучей. Известно, что расстояние от образца до фотопластинки, расположенной перпендикулярно направлению распространения пучка (см. рис. 2), составляло L = 10 см, расстояние от центра рентгенограммы (ось пучка) до каждого из точечных рефлексов равно h = 7.4 см, а длина волны рентгеновских лучей λ = 0.154 нм.

1. Определить межплоскостное расстояние в кристалле d, соответствующее наблюдаемым точечным рефлексам. **(5 баллов)**

2. Как изменится рентгенограмма, если на пути пучка установить не монокристалл, а тонкую пленку, содержащую разупорядоченные нанокристаллы из того же материала? **(5 баллов)**

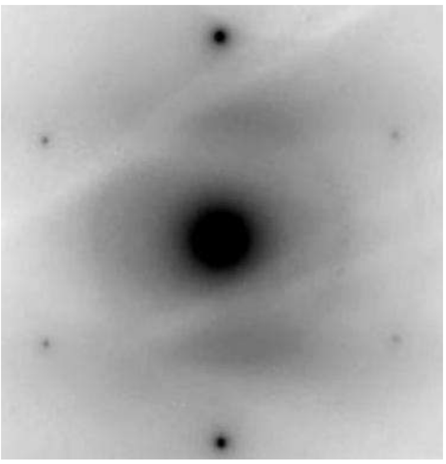


Рис. 1

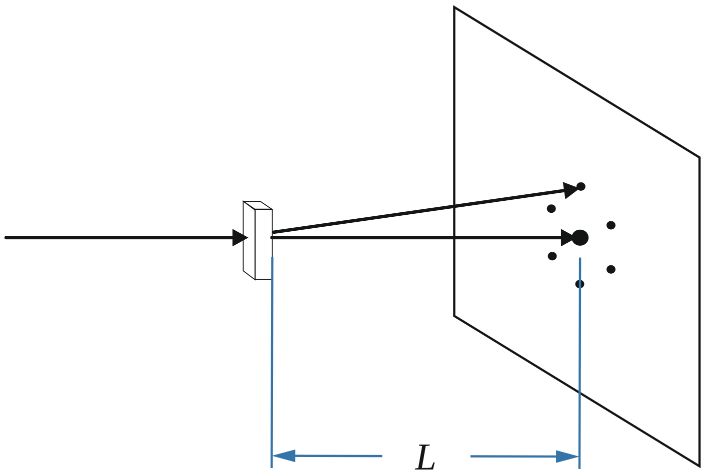


Рис. 2

Всего – 10 баллов

Физика для школьников 7 – 11 класса (заочный тур)
Решение задачи 6. Дифракция на нанокристаллах

1. Сложность в том, как правильно определить угол дифракции. Угол между двумя векторами на рисунке 2 – это удвоенный угол дифракции 2θ, в то время как в условие Вульфа-Брэггов входит именно угол дифракции θ:

$$2d\sin\theta = n\lambda$$

Полагая порядок дифракции $n = 1$ (т.к. ближе к оси пучка других рефлексов нет), получаем для межплоскостного расстояния:

$$d = \frac{\lambda}{2\sin\theta} = \frac{\lambda}{2\sin\left(\frac{1}{2}\operatorname{arctg}\frac{h}{L}\right)} \approx 0.25 \text{ нм}$$

2. Так как нанокристаллы в пленке разупорядочены, т.е. не имеют определенной ориентации, то вместо точечных рефлексов будут наблюдаться темные дифракционные кольца радиуса h.

Физика для школьников 7 – 11 класса (заочный тур)
Задача 7. Фотоэлектронная спектроскопия наноматериалов

Одним из методов диагностики структуры материалов является рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС). Этот метод позволяет получать информацию о составе и характере взаимодействия атомов в тонком приповерхностном слое исследуемого образца. Анализируемая глубина составляет обычно не более 5 нм, что позволяет эффективно применять РФЭС для исследования наноструктурированных материалов. Под действием рентгеновского излучения атомы вещества эмитируют фотоэлектроны, распределение которых по их кинетическим энергиям представляет собой фотоэлектронный спектр. Из полученных спектров можно определить энергию связи внутренних (остовных) электронов, зависящую как от заряда ядра атомов (порядкового номера элемента), так и от их степени окисления, что позволяет определять не только элементный состав образца, но и характер химических связей между атомами. Дополнительно для изучения распределения атомов по глубине образца может применяться ионное травление, которое позволяет, в том числе, избавиться от возможных загрязнений исследуемой поверхности или присутствующих на ней чужеродных пленок.

1. В эксперименте методом РФЭС исследовалась тонкая пленка, содержащая распределенные в слое диоксида кремния нанокристаллы кремния, покрытая сверху дополнительным защитным слоем стехиометрического диоксида кремния. Пользуясь полученными при исследовании поверхностного слоя SiO_2 спектрами РФЭС (см. рис. 1), оценить энергию связи электронов Si 2p-уровней, если известно, что энергия связи электронов O 1s-уровней составляет ~ 533 эВ. **(5 баллов)**

2. После стравливания поверхностного слоя SiO_2 ионным пучком и измерения спектра РФЭС исследуемой пленки с нанокристаллами кремния в области энергий Si 2p фотоэлектронов было замечено, что в спектре появился дополнительный пик с энергией около 1387 эВ (см. рис. 2). Объяснить наблюдаемое качественное изменение спектра. **(5 баллов)**

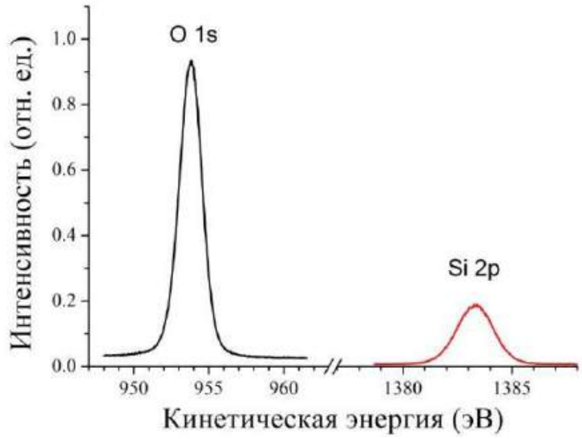


Рис. 1

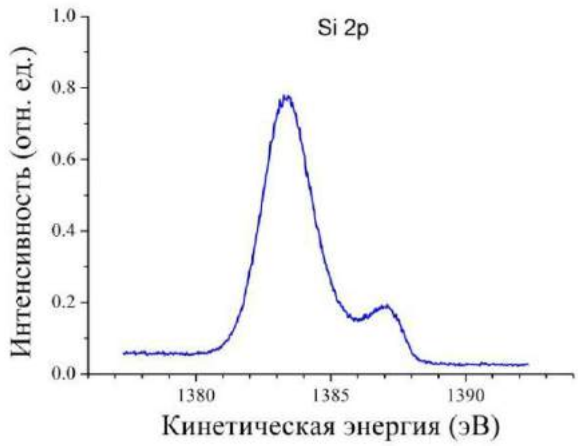


Рис. 2

Всего – 10 баллов

Физика для школьников 7 – 11 класса (заочный тур)
Решение задачи 7. Фотоэлектронная спектроскопия наноматериалов

1. Принцип, лежащий в основе метода РФЭС, – явление фотоэффекта, т.е. выбивание электронов из поверхностного слоя вещества под действием падающих квантов электромагнитного излучения. Энергию связи эмитированных фотоэлектронов определяют из уравнения Эйнштейна для фотоэффекта:

$$h\nu = E_{\text{связи}} + E_{\text{кин}}$$

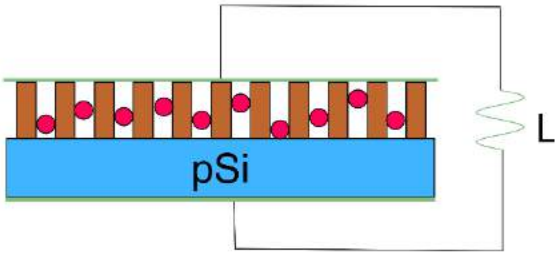
На рис. 1 имеем два пика с энергиями около 954 эВ ($E_{\text{кин}}^{\text{O1s}}$) и 1383.5 эВ ($E_{\text{кин}}^{\text{Si2p}}$). Исходя из того, что оба пика получены в одном эксперименте, т.е. при одной и той же энергии квантов $h\nu$, получаем выражение для энергии связи электронов Si 2p-уровней:

$$E_{\text{связи}}^{\text{Si2p}} = E_{\text{связи}}^{\text{O1s}} + E_{\text{кин}}^{\text{O1s}} - E_{\text{кин}}^{\text{Si2p}} \approx 533 + 954 - 1383.5 = 103.5 \text{ эВ}$$

Таким образом, наблюдаемые в РФЭС спектрах на рис. 1 пики соответствуют атомам Si и O, связанным между собой ковалентной полярной связью в диоксиде кремния.

2. Появление дополнительного пика в РФЭС спектре исследуемой пленки с нанокристаллами кремния в области энергий Si 2p-уровней (около 1387 эВ, см. рис. 2) можно объяснить вкладом электронов, вырванных из внутренних оболочек атомов Si, входящих в состав нанокристаллов кремния, т.е. образующих ковалентную неполярную Si-Si связь. Различный характер Si–O и Si–Si связей и обуславливает наблюдаемый относительный сдвиг соответствующих максимумов в фотоэлектронных спектрах. При этом основной пик в спектре на рис. 2 соответствует атомам кремния, входящим в окружающий нанокристаллы слой SiO_2, что следует из совпадения энергии его максимума с максимумом Si 2p пика РФЭС спектра на рис. 1 (~ 1383.5 эВ).

Физика для школьников 7 – 11 класса (заочный тур)
Задача 8. Наносенсор на вирусы



Юный изобретатель Саша предложил схему наносенсора, чувствительного на вирусы. Сенсор представляет из себя двухслойную структуру: нижний слой – пористый кремний pSi (пористость P = 50%, размер пор – 5 нм) толщиной d_1 = 100 мкм, верхний – слой пористых нанонитей диаметром 200 нм и толщиной d_2 = 500 нм (эффективная пористость для всего слоя – 25%), который и является чувствительным.

1. Почему чувствительным является только верхний слой? **(1 балл)** Каким образом можно обеспечить селективность такого сенсора? **(2 балла)**

Сверху и снизу на сенсор напылены сеточные металлические контакты и подсоединены к катушке с индуктивностью L = 0.5 мкГн.

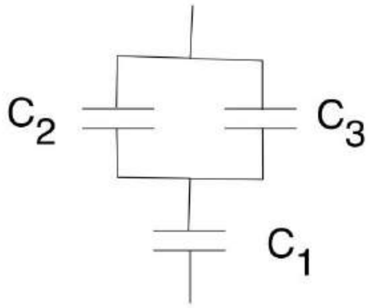
2. Насколько изменится частота колебаний контура после того, как на поверхности элемента высушить 100 мкл вирусной суспензии с концентрацией вирусных частиц 10^6 мл$^{-1}$? **(7 баллов)** Площадь сенсора S = 1 см^2, радиус вируса r = 50 нм, его диэлектрическая проницаемость, ε_v = 75.

Всего – 10 баллов

Физика для школьников 7 – 11 класса (заочный тур)
Решение задачи 8. Наносенсор на вирусы

1. Чувствительным является только верхний слой, причем его крупные поры, т.к. только туда могут попасть вирусные частицы. Малые поры диаметром 5 нм не позволяют вирусам проникать внутрь нижнего слоя, поэтому он нечувствительный. Для того, чтобы сделать сенсор селективным к определенным видам вирусов, можно, например, иммобилизовать (присоединить к поверхности) специальные антитела – биологические молекулы которые будут связываться с рецепторами определенных вирусов.

2. Рассмотрим сенсорный элемент как три конденсатора: параллельно соединенные, которые соответствуют кремниевому (C_2) и воздушному (C_3) верхним слоям, в свою очередь последовательно соединенные с нижним слоем (C_1).



При адсорбции вирусов изменяется только C_3. Диэлектрическую проницаемость для C_1 и C_2 примем равной (12 + 1) / 2 = 6.5, учитывая, что для кристаллического кремния данная величина равна 12. Теперь рассчитаем общую емкость всего сенсорного элемента:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2 + C_3}. \quad (1)$$

Емкости каждого конденсатора определяются по формуле для плоского конденсатора:

$$C_{1,2,3} = \epsilon_{1,2,3}\epsilon_0 \frac{S}{d_{1,2,3}}. \quad (2)$$

После адсорбции вирусов емкость C_3 изменится на C'_3, соответственно и общая емкость будет C' вместо C. Найдем отношение:

$$\frac{C}{C'} = \frac{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2 + C_3}}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2 + C'_3}} = \frac{(C_2 + C_3)(C_2 + C'_3) + C_1(C_2 + C'_3)}{(C_2 + C_3)(C_2 + C'_3) + C_1(C_2 + C_3)} \quad (3)$$

$$\frac{C}{C'} = \frac{(C_2 + C_3)(C_2 + C_3') + C_1(C_2 + C_3' + C_3 - C_3)}{(C_2 + C_3)(C_2 + C_3') + C_1(C_2 + C_3)} = \\ = 1 + \frac{C_1(C_3' - C_3)}{(C_2 + C_3)(C_2 + C_3') + C_1(C_2 + C_3)} \tag{4}$$

Допустим, что C_3' близко к C_3 (позже увидим, что это действительно так), а также, что $C_1 << C_2$, C_3. Тогда выражение упростится:

$$\frac{C}{C'} = 1 + \frac{C_1(C_3' - C_3)}{(C_2 + C_3)^2} = 1 + \frac{C_1 \Delta C_3}{(C_2 + C_3)^2}, \tag{5}$$

где ΔC_3 – разница C_3 до и после адсорбции вирусов. Отсюда относительное изменение общей емкости δC (безразмерная величина):

$$\delta C = \frac{C_1 \Delta C_3}{(C_2 + C_3)^2}. \tag{6}$$

Для того, чтобы рассчитать ΔC_3, найдем суммарный объем вирусов в капле:

$$V = V_{drop} \cdot C \frac{4}{3}\pi r^3 = 0.1 \cdot 10^6 \cdot 4.2 \cdot (5 \cdot 10^{-8})^3 = 5.2 \cdot 10^{-17} \text{м}^3 \tag{7}$$

Объем пор (крупных, доступных для вирусов) составляет:

$$V_0 = d_2 SP = 0.5 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-4} \cdot 0.5 = 2.5 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3 \tag{8}$$

Таким образом, домножая фактор заполнения (отношение объемов) на диэлектрическую проницаемость самих вирусов, получим:

$$\Delta C_3 = \epsilon_0 \frac{S}{d_2} \frac{V}{V_0} \epsilon_v = \epsilon_0 S \frac{2 \cdot 10^{-8} \cdot 75}{0.5 \cdot 10^{-6}} = \epsilon_0 S \cdot 3 \tag{9}$$

Найдем также выражения для C_1, C_2 и C_3.

$$C_1 = \epsilon_0 S \frac{6.5}{10^{-4}} = \epsilon_0 S \cdot 6.5 \cdot 10^4. \tag{10}$$

$$C_2 = \epsilon_0 \frac{S}{2} \frac{6.5}{5 \cdot 10^{-7}} = \epsilon_0 S \cdot 6.5 \cdot 10^6. \tag{11}$$

$$C_3 = \epsilon_0 \frac{S}{2} \frac{1}{5 \cdot 10^{-7}} = \epsilon_0 S \cdot 10^6. \tag{12}$$

Отсюда δC:

$$\delta C = \frac{6.5 \cdot 10^4 \cdot 3}{(7.5 \cdot 10^6)^2} = 3.5 \cdot 10^{-9} \tag{13}$$

Частота колебательного контура будет определяться наименьшей емкостью из последовательно включенных, т.е. C_1. Таким образом:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_1}} = \frac{1}{6.3\sqrt{0.5 \cdot 10^{-6} \cdot 6.5 \cdot 10^4 \cdot 8.82 \cdot 10^{-12} \cdot 10^{-4}}} = \\ = \frac{1}{6.3 \cdot 5.3 \cdot 10^{-9}} = 3 \cdot 10^7 = 30 \text{ МГц} \tag{14}$$

Измерение частоты будет связано с изменением δC, которое в силу малости и извлечения корня будет умножаться на 0.5:

$$\sqrt{1+x} \approx 1 + \frac{x}{2}, \quad x \ll 1 \tag{15}$$

Отсюда искомое изменение частоты:

$$\delta f = f\frac{\delta C}{2} = 5.25 \cdot 10^{-2} \text{ Гц}. \tag{16}$$

физика

Физика для школьников 7 – 11 класса (заочный тур)
Задача 9. Из крайности в крайность

диффузия Кнудсена   вязкое течение

Известно, что механизм диффузии газов через пористые среды во многом обусловлен числом Кнудсена *Kn*, которое равно отношению длины свободного пробега молекул этого газа λ к диаметру пор *d*. Так, при $Kn << 1$ реализуется вязкое течение газа в порах, а при $Kn >> 1$ – кнудсеновская диффузия. Принципиальное отличие этих двух механизмов состоит в том, что вязкий поток газа представляет собой движение сжимаемой сплошной среды, а в случае кнудсеновской диффузии молекулы проникают через пористую среду как изолированные частицы. Вязкий поток газа задаётся выражением:

$$J_P = \frac{\pi d^4}{128\eta} \cdot \frac{\Delta P}{L} \cdot \frac{P_1 + P_2}{2P_2},$$

где η – динамическая вязкость газа, P_1 – давление на входе в пору, P_2 – давление на выходе из поры, *L* – длина пор. Кнудсеновский поток газа через единицу площади мембраны можно рассчитать по формуле:

$$J_{Kn} = \frac{2dV_m}{3L} \cdot \sqrt{\frac{2}{\pi MRT}} \cdot \Delta P,$$

где V_m – молярный объём, *M* – молярная масса газа, *R* – универсальная газовая постоянная, *T* – температура.

1. На основе представленных данных оцените наибольший диаметр пор, для которых ещё может наблюдаться ощутимый вклад Кнудсеновской диффузии при пропускании азота под давлением 1 атм и при температуре 27 ^{o}C. Диаметр молекулы азота равен 0.37 нм. **(4 балла)**

2. Представьте, что для экспериментов доступны мембраны трёх видов со средним диаметром пор 10 нм, 50 нм и 100 нм. Какую из них следует выбрать для более эффективного разделения смеси N_2 (*d* = 0.37 нм, η = 1778 Па·с) и He (*d* = 0.256 нм, η = 1968 Па·с), взятых в мольном соотношении 1:1 при давлении 1 атм? Ответ обоснуйте. Каким при этом в идеале будет мольное соотношение газов в смеси, прошедшей через мембрану? **(6 баллов)**

Всего – 10 баллов

физика

Физика для школьников 7 – 11 класса (заочный тур)
Решение задачи 9. Из крайности в крайность

1. Длина свободного пробега молекул газа определяется по формуле

$$\lambda = \frac{1}{4\sqrt{2}\pi r^2 n},$$

где n – концентрация молекул газа, r – их радиус. Концентрацию молекул газа можно рассчитать согласно молекулярно-кинетической теории: $P = nkT$, где P – давление, n – концентрация, k – постоянная Больцмана, T – температура. Отсюда получаем, что при заданных условиях

$$n = \frac{101325\ \text{Па}}{1.6\cdot 10^{-23}\,\frac{\text{Дж}}{\text{К}}\cdot 300\text{К}} = 2.11\cdot 10^{25}\,\frac{1}{\text{м}^3}.$$

Теперь можно определить длину свободного пробега молекул азота:

$$\lambda = \frac{1}{4\sqrt{2}\pi\cdot(0.17\cdot 10^{-9}\ \text{м})^2\cdot 2.11\cdot 10^{25}\,\frac{1}{\text{м}^3}} = 9.2\cdot 10^{-8}\ \text{м} = 92\ \text{нм}.$$

Из условия следует, что с ростом числа Кнудсена увеличивается доля кнудсеновской диффузии, поэтому её вклад будет ощутимым, если *Kn* по меньшей мере больше 1. Следовательно, $d < \lambda$, или $d < 92$ нм. Таким образом, диаметр пор должен быть меньше 100 нм.

2. Диаметры молекул азота и гелия намного меньше среднего диаметра пор всех предложенных мембран, поэтому разделение газовой смеси, основанное на различиях в размерах молекул, невозможно ни для одного из описанных образцов. Однако разделение можно осуществить, подобрав необходимый механизм диффузии. Вязкий поток селективностью не обладает, так как вязкости N_2 и He довольно близки ($\eta(\text{He}) / \eta(\text{N}_2) = 1.11$). Зато кнудсеновский поток зависит от молекулярной массы газа, поэтому для разделения смеси её необходимо пропускать через мембрану в режиме кнудсеновской диффузии, то есть при больших *Kn*. Так как число Кнудсена обратно пропорционально размеру поры, то следует выбрать мембраны со средним диаметром пор 10 нм.

   В идеальном случае мольное соотношение газов определяется отношением потоков в режиме диффузии Кнудсена. Поэтому оно будет равно

$$\frac{\nu_{\text{He}}}{\nu_{\text{N}_2}} = \frac{J_{Kn,\ \text{He}}}{J_{Kn,\ \text{N}_2}} = \frac{\frac{2dV_m}{3L}\cdot\sqrt{\frac{2}{\pi M_{\text{He}}RT}}\cdot\Delta P}{\frac{2dV_m}{3L}\cdot\sqrt{\frac{2}{\pi M_{\text{N}_2}RT}}\cdot\Delta P} = \sqrt{\frac{M_{\text{N}_2}}{M_{\text{He}}}} = \sqrt{\frac{0.028\ \frac{кг}{моль}}{0.004\ \frac{кг}{моль}}} = \sqrt{7}$$

Физика для школьников 7 – 11 класса (заочный тур)
Задача 10. Автостопом на комете

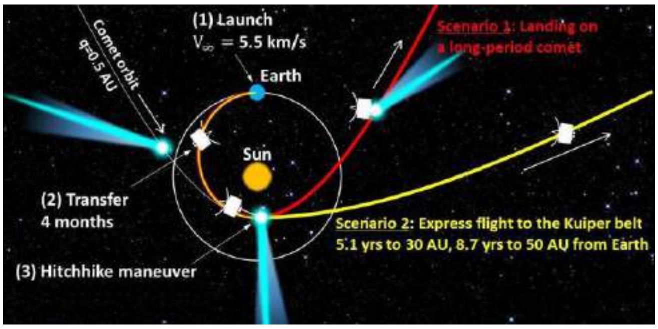


Рис. а

Рис. б

В качестве альтернативы «обычным» ракетным двигателям инженеры NASA предложили использовать для разгона космических кораблей трос, сделанный из углеродных нанотрубок (УНТ). В предложенной схеме космический корабль «ловит» на кончик троса пролетающую мимо с большой скоростью комету, и, разматывая натянутый трос, постепенно увеличивает свою скорость. В нужный момент времени трос отделяется, и разогнавшийся корабль продолжает свое путешествие на окраины Солнечной системы (рис. а).

Оценим эффективность предложенной схемы на простом примере (рис. б).

1. Найдите массу m_{nt}, длину l и толщину d УНТ троса, если
   – масса космического корабля с тросом составляет m =1000 кг;
   – максимальное ускорение, которое может выдержать корабль, составляет 10g (в десять раз больше ускорения свободного падения на Земле);
   – кораблю необходимо разогнаться при помощи троса до скорости кометы; ее скорость изначально больше скорости корабля на Δv = 7 км/с. **(5 баллов)**

2. Сравните, во сколько раз приращение скорости корабля при разгоне УНТ тросом будет отличаться от приращения скорости с использованием реактивного топлива, если массы троса и топлива равны. Для расчета использовать формулу Циолковского*, удельный импульс ракетного двигателя на корабле считать равным 5000 м/с. **(1 балл)**

3. Оцените, какое *предельное* значение Δv возможно при разгоне корабля с использованием троса из УНТ (т.е. безотносительно суммарной массы корабля и его максимально возможного ускорения). **(4 балла)**

Считать, что:
– трос из УНТ можно для удобства расчетов представить как «рулон» из листа графена той же массы, длины, диаметра и прочности; плотность графена равна 2260 кг/м^3, прочность на разрыв – 1,3·10^{11} Н/м^2;
– комета движется параллельно курсу корабля и имеет несоизмеримо большую массу;
– ускорение корабля, «поймавшего» комету, постоянно и равно максимальному;
– растяжением троса можно пренебречь.

*Формула Циолковского определяет скорость, которую развивает летательный аппарат под воздействием тяги ракетного двигателя: $\Delta v = I \cdot \ln(m/m_2)$, где Δv – изменение скорости корабля, I – удельный импульс ракетного двигателя, m – начальная масса корабля с топливом, m_2 – масса корабля, выработавшего топливо.

Всего – 10 баллов

Физика для школьников 7 – 11 класса (заочный тур)
Решение задачи 10. Автостопом на комете

1.

1) За время $t = \Delta v/a$ от момента «загарпунивания» корабль достигает скорости Δv и проходит расстояние $L_1 = at^2/2 = \Delta v^2/2a$. За это же время комета проходит расстояние $L_2 = \Delta vt = \Delta v^2/a$.

Разность пройденных путей равна длине троса:

$$L = L_1 - L_2 = \Delta v^2/a - \Delta v^2/2a = \Delta v^2/2a.$$

$$L = \Delta v^2/2a = 7000^2/(2\cdot 10\cdot 9,8) = 250000 = 2,5\cdot 10^5 \text{ м} = \mathbf{\underline{250\ км}}$$

2) Поскольку ускорение корабля постоянно, то сила, ускоряющая корабль, составляет $F = ma$. Необходимо, чтобы трос в момент прикрепления к комете выдерживал эту силу, т.е. $F = \sigma s$. Следовательно, $ma = \sigma s$.

Стоит отметить, что трос имеет две особых точки – точку соприкосновения с кораблем и точку крепления к комете. Силы, действующие на трос в этих точках, при выбранной схеме ускорения со временем станут меньше F (следовательно, не повлияют на выбор толщины троса). В первой точке – из-за разматывания троса и уменьшения массы корабля (т.к. ускорение корабля постоянно); во второй точке – из-за меньшего ускорения точки центра масс системы трос-корабль (т.к. точка центра масс удаляется от движущегося с постоянным ускорением корабля).

$$s = \frac{ma}{\sigma} = \frac{1000\cdot 10\cdot 9,8}{1,3\cdot 10^{11}} = 7,54\cdot 10^{-7} \text{ м}^2$$

$$s = \frac{\pi d^2}{4},\ d = \sqrt{\frac{4s}{\pi}} = \sqrt{\frac{4\cdot 7,54\cdot 10^{-7}}{3,14}} = 9,8\cdot 10^{-4} \text{ м} \approx \mathbf{\underline{1\ мм}}$$

$$m_{nt} = sL\rho = \frac{F}{\sigma}L\rho = \frac{ma}{\sigma}L\rho = \frac{1000\cdot 10\cdot 9,8\cdot 2,5\cdot 10^5\cdot 2260}{1,3\cdot 10^{11}} = \mathbf{\underline{426\ кг}}$$

2. По формуле Циолковского

$$\Delta v = I\ln\left(\frac{m}{m_2}\right) = I\ln\left(\frac{m}{m - m_{nt}}\right) = 5000\cdot\ln\left(\frac{1000}{1000-426}\right) = 2,78 \text{ км/с}$$

прирост скорости для такой же массы реактивного топлива в 7/2,78 = **<u>2,5 раза меньше</u>**. Трос из нанотрубок заметно превосходит лучшие из ракетных топлив.

3. Из $L = \Delta v^2/2a$ находим

$$\Delta v = \sqrt{2aL} = \sqrt{2L\frac{F}{m+m_{nt}}} = \sqrt{2L\frac{s\sigma}{m+m_{nt}}} = \sqrt{\frac{2m_{nt}\sigma}{\rho(m+m_{nt})}}$$

$$\lim_{\frac{m_{nt}}{m+m_{nt}}\to 1} \Delta v = \sqrt{\frac{2\sigma}{\rho}} = \sqrt{\frac{2\cdot 1{,}3\cdot 10^{11}}{2260}} = 10725 \text{ м/с} \approx \underline{\mathbf{11\ км/с}}$$

Стоит отметить, что использовавшаяся в задаче упрощенная схема ускорения корабля и нагрузки троса не оптимальна (трос только в первый момент времени испытывает натяжение близкое к максимальному). Например, рациональнее было бы использовать трос с уменьшающимся сечением, однако это заметно усложнит расчеты, приводя к качественно близкому решению.