



**Физика для школьников 7 – 11 класса (заключительный этап)**  
**Простые задачи. Решения**

**Решение задачи 1. Пробег электронов (10 баллов)**

1. Число молекул можно выразить через количество вещества:

$$N = \nu N_A = \frac{pV}{RT} N_A = \frac{132,3 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot 10^{-2} \text{ м}^3}{8,31 \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{моль}) \cdot 300 \text{ К}} 6,02 \cdot 10^{23} \approx 3,21 \cdot 10^{14}$$

2. Длина свободного пробега  $\lambda$  обратно пропорциональна концентрации молекул  $n$ .  
Таким образом:

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{p_1}{p_2},$$

поскольку

$$p = nkT\lambda_2 = \lambda_1 \frac{p_1}{p_2} = \frac{10^{-6} \text{ м}}{760} \approx 1,3 \text{ нм.}$$

**Решение задачи 2. Ионная имплантация (10 баллов)**

Кинетическая энергия подлетающих к пластине электронов, определяется ускоряющим напряжением  $eU = \frac{mV^2}{2}$ . Попадая в пластину, ионы испытывают многократное рассеяние, но можно рассмотреть действие эффективной силы торможения  $F$ , работа которой изменяет кинетическую энергию электронов до нуля.

$$0 - \frac{mV_1^2}{2} = -F_{\text{тор}} d_1$$

Поэтому, в случае 1:  $d_1 = \frac{mV_1^2}{2F_{\text{тор}}}$ , тогда  $\frac{d_2}{d_1} = \frac{V_2^2}{V_1^2} = 4d_2 = 200 \text{ нм.}$

В случае 2: сила торможения  $F = \alpha V$ , где  $\alpha$  — коэффициент пропорциональности.

$$d_1 = \frac{mV_1^2}{2\alpha V_1}, \text{ тогда } \frac{d_2}{d_1} = \frac{V_2}{V_1} = 2d_2 = 100 \text{ нм.}$$

**Решение задачи 3. Опасные наночастицы (10 баллов)**

Найдем массу наночастиц:

$$m = \rho V = \rho \frac{4}{3} \pi \frac{d^3}{8} \approx 5,8 \cdot 10^{-19} \text{ кг.}$$

Наночастицы при столкновении с мембраной будут тормозиться, в результате чего будет изменяться их импульс. Максимальное изменение импульса  $\Delta p_{\text{max}}$  будет достигаться при полной остановке наночастиц за время  $\Delta t$ . В таком случае изменение импульса наночастиц  $\Delta p_{\text{max}} = mv_{\text{max}}$  будет обеспечено за счет силы, действующей со стороны мембраны, равной:

$$F = \frac{\Delta p_{max}}{\Delta t} = \frac{mv_{max}}{\Delta t}$$

Согласно III закону Ньютона, такая же по модулю сила будет действовать и на мембрану, создавая давление (за площадь воздействия примем площадь поперечного сечения наночастицы):

$$p = \frac{F}{S} = \frac{F}{\pi d^2/4}$$

В предельном случае это давление следует приравнять к пределу прочности мембраны:

$$\frac{4mv_{max}}{\pi d^2 \Delta t} = \sigma_0$$

Откуда максимальная скорость наночастиц:

$$v_{max} = \frac{\pi d^2 \Delta t \sigma_0}{4m} = \frac{3 \Delta t \sigma_0}{2 \rho d} \approx 13.5 \text{ м/с}$$

#### Решение задачи 4. Неразрушающий метод (10 баллов)

1. Под действием монохроматического излучения вещество испускает фотоэлектроны, согласно закону фотоэффекта

$$\frac{hc}{\lambda} = A + \frac{mv^2}{2},$$

где  $h$  – постоянная Планка (Дж·с),  $c$  – скорость света (м/с),  $\lambda$  – длина волны (м),  $A$  – работа выхода электрона (Дж),  $m$  – масса электрона (кг),  $v$  – скорость электрона (м/с). Другими словами, ток наблюдается только в том случае, если энергия фотона больше работы выхода.

Запирающим напряжением называется минимальная разность потенциалов, при которой прекращается фототок, поскольку кинетической энергии электронов оказывается недостаточно для преодоления потенциального барьера:

$$\begin{aligned} E_k &= E_p \\ \frac{mv^2}{2} &= eU \end{aligned}$$

где  $E_k$  – кинетическая энергия (Дж),  $E_p$  – потенциальная энергия (Дж),  $e$  – элементарный заряд (Кл),  $U$  – запирающее напряжение (В).

Следовательно, запирающее напряжение равно

$$\begin{aligned} \frac{hc}{\lambda} &= A + eU \\ U &= \frac{hc - \lambda A}{\lambda e} \end{aligned}$$

Для образца **A**:

$$U_A = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{М}}{\text{с}} - 250,0 \cdot 10^{-9} \text{ м} \cdot (4,7 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19}) \text{ Дж}}{250,0 \cdot 10^{-9} \text{ м} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}} = 0,26 \text{ В}$$

Для образца **B**:

$$U_B = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{М}}{\text{с}} - 250,0 \cdot 10^{-9} \text{ м} \cdot (4,8 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19}) \text{ Дж}}{250,0 \cdot 10^{-9} \text{ м} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}} = 0,16 \text{ В}$$

2. Красная граница фотоэффекта – это максимальная длина волны излучения, при которой наблюдается фотоэффект. Следовательно, её можно рассчитать по формуле

$$\frac{hc}{\lambda} = A$$

$$\lambda = \frac{hc}{A}$$

Таким образом, разность значений для образцов **A** и **B** равна

$$\Delta\lambda = \lambda_A - \lambda_B = \frac{hc}{A_A} - \frac{hc}{A_B}$$

$$\Delta\lambda = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{М}}{\text{с}}}{4,7 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}} - \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{М}}{\text{с}}}{4,8 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}} =$$

$$= 5,5 \cdot 10^{-9} \text{ м} = 5,5 \text{ нм.}$$

### Решение задачи 5. Механическая активация наночастиц (10 баллов)

1. Количество необходимых столкновений будет наименьшим, если уменьшение кинетической энергии будет связано только с нагревом наночастиц. В таком случае, согласно закону сохранения энергии для одного столкновения имеем

$$E_1 + E_2 = E'_1 + E'_2 + Q,$$

где  $E_1$  – кинетическая энергия первой наночастицы до столкновения,  $E_2$  – кинетическая энергия второй наночастицы до столкновения,  $E'_1$  – кинетическая энергия первой наночастицы после столкновения,  $E'_2$  – кинетическая энергия второй наночастицы после столкновения,  $Q$  – тепловая энергия.

Так как наночастицы одинаковые, то

$$E_1 = E_2 = \frac{mv^2}{2}$$

$$E'_1 = E'_2 = \frac{m \cdot ((1 - 0,3)v)^2}{2} = \frac{m \cdot (0,7v)^2}{2} = \frac{0,49mv^2}{2},$$

где  $m$  – масса наночастицы,  $v$  – её скорость.

Значит, тепловая энергия, выделяющаяся в результате одного удара, равна

$$Q = E_1 + E_2 - E'_1 - E'_2$$

$$Q = \frac{mv^2}{2} + \frac{mv^2}{2} - \frac{0,49mv^2}{2} - \frac{0,49mv^2}{2} = mv^2 - 0,49mv^2 = 0,51mv^2$$

Так как  $Q = c \frac{2m}{M} \Delta T$  (масса удвоена, поскольку в результате столкновения нагреваются обе наночастицы), то

$$c \frac{2m}{M} \Delta T = 0,51mv^2,$$

где  $M$  – атомная масса никеля,  $c$  – теплоёмкость никеля.

Поэтому для  $N$  таких столкновений имеем

$$c \frac{2m}{M} \Delta T = 0,51Nmv^2$$

$$N = \frac{2c \cdot \Delta T}{0,51Mv^2}$$

$$N = \frac{2 \cdot 26,1 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot 100\text{К}}{0,51 \cdot 0,0587 \frac{\text{кг}}{\text{моль}} \cdot \left(10 \frac{\text{м}}{\text{с}}\right)^2} \approx 1744$$

2. Кроме нагрева наночастиц будут возникать их упругие и пластические деформации, в том числе образование дефектов кристаллической структуры. В определённых условиях возможны также растрескивание и разрушение частиц, а также эмиссия электронов и ионов.