

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

**ЗАДАЧИ ПО КУРСУ «СТРОЕНИЕ ВЕЩЕСТВА»**

**Часть 1. Атомистические представления о веществе,  
электричестве, излучении**

Учебно-методическое пособие

Составители:

В.Е. Терновская, Е.В. Руднев

Воронеж  
Издательский дом ВГУ  
2019

## Введение

Предлагаемый сборник содержит задачи, предлагавшиеся авторами на практических занятиях по учебной дисциплине Б1.В.ОД.14 «Строение вещества» для студентов 1 курса физического факультета Воронежского государственного университета, направление подготовки 11.03.04 Электроника и нанoeлектроника, бакалавриат. Сборник состоит из двух частей: часть I «Атомистические представления о веществе, электричестве, излучении» и часть II «Введение в физику атомов и атомных систем». Отдельным списком приведены основные физические константы, которые используются при решении задач. Каждая часть разбита на параграфы, в начале каждого из которых приведены некоторые полезные формулы и соотношения. Далее приводятся примеры решения задач по всем основным темам параграфа. Затем в конце каждого раздела даются задачи для самостоятельного решения с ответами и в ряде случаев с указаниями и примечаниями. Следует отметить, что наряду с некоторым набором оригинальных задач сборник содержит, в основном, материал, заимствованный из многочисленных учебных пособий, как недавно вышедших в свет, так и давно не переиздаваемых (их список приводится в конце каждой части).

Авторы искренне надеются, что их скромный вклад в процесс обучения студентов 1 курса физфака ВГУ направления подготовки 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника» сможет в изучении такой важной дисциплины, как «Строение вещества».

#### ***1.4. Задачи для самостоятельного решения к гл. 1 «Атомистические представления о веществе»***

1.3. Вычислите молярную теплоемкость при постоянном объеме газа, состоящего из жестких трехмерных молекул.

1.4. Вычислите а) среднеквадратичную скорость молекул кислорода при нормальных условиях и б) кинетическую энергию поступательного движения молекулы кислорода, двигающейся со средней скоростью максвелловского распределения.

1.5. При какой температуре среднеквадратичная скорость молекул кислорода будет в два раза превышать их среднеквадратичную скорость при  $27^0\text{ C}$ ?

1.6. При какой температуре среднеквадратичная скорость молекул азота будет равна среднеквадратичной скорости молекул кислорода находящегося при  $27^0\text{ C}$ ?

1.7. Найдите среднюю, среднеквадратичную и наиболее вероятную скорости молекул газообразного водорода при температуре  $20^0\text{ C}$  и давлении а) 1 атм., б) 100 атм.

1.8. а) При какой температуре средняя длина свободного пробега молекул идеального газа будет в два раза больше, чем при  $27^0\text{ C}$ , если давление поддерживается постоянным?

1.9. При каком давлении (в мм рт. ст.) средняя длина свободного пробега молекул идеального газа будет в 1000 раз больше чем при давлении в 1 атм., если температура поддерживается постоянной?

1.10. В одном из своих опытов с водной суспензией гуммигута при  $20^0\text{ C}$  Перрен наблюдал на одном уровне в среднем 49 частиц на единицу площади в очень тонком слое и 14 частиц на единицу площади в слое. Лежащем на 60 мкм выше. Плотность гуммигута равна  $1194\text{ кг/м}^3$ , а каждая частица представляет собой шарик радиусом 0,212 мкм. Определите: а) массу каждой частицы; б) число Авогадро; в) молекулярный вес частиц, предполагая,

что каждую из них можно рассматривать как одну гигантскую молекулу. Используйте ответы на вопросы а) и б) для расчета в).

## **Глава 2. Атомистические представления об электричестве**

### **2.1. Содержание главы дисциплины**

Электрические разряды. Движение заряженных частиц. Опыты Томсона по измерению  $e/m$ . Заряд электрона. Масса электрона. Число Авогадро. Положительные лучи. Изотопы. Масс-спектрометрия. Физические атомные веса. Атомная единица массы.

### **2.2. Некоторые формулы**

Сила, действующая на заряд  $q$  в электрическом поле с напряженностью  $\vec{E}$ , равна:

$$\vec{F} = q\vec{E} \quad (2.1)$$

Сила, действующая на заряд  $q$ , движущийся со скоростью  $\vec{v}$  в магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$ :

$$\vec{F} = q[\vec{v} \times \vec{B}] \quad (2.2)$$

Условие компенсации в опытах Томсона по измерению отношения  $e/m$ :

$$v_x = \frac{E}{B} \quad (2.3)$$

Закон Стокса - сила, действующая в опытах Милликена на каплю радиуса  $r$ , движущуюся со скоростью  $v$  в среде с вязкостью  $\eta$ :

$$F_{\text{сопр}} = 6\pi\eta r v \quad (2.4)$$

### **2.3. Примеры задач**

2.1. Определите, какую скорость приобретет электрон, если из состояния покоя его ускорить разностью потенциалов, равной 565 В. Пусть далее этот электрон движется в вертикальной плоскости с приобретенной им скоростью и попадает в область, в которой имеется однородное электрическое поле величиной 35 В/см, направленное вниз. Найдите координаты электро-

на через  $5 \cdot 10^{-8}$  с после влета его в поле, если вектор скорости составлял с горизонтальным направлением угол  $30^\circ$  и был наклонен вниз.

Решение: В соответствии с законом сохранения энергии, изменение кинетической энергии плюс изменение потенциальной энергии заряда при его переходе из точки 1 в точку 2 равно нулю, так как не совершается никакой работы внешними силами:

$$\frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} + (qV_2 - qV_1) = 0. \quad (2.5)$$

Так как по условию  $v_1 = 0$ ,

$$v_2 = \sqrt{\frac{-2q(V_2 - V_1)}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 565}{9,1 \cdot 10^{-31}}} = 1,41 \cdot 10^7 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

б) Однородное электрическое поле

2.2. Вектор напряженности однородного электрического поля направлен вниз, напряженность этого поля равна  $E = 1,3 \cdot 10^5 \text{ В/м}$ . В это поле помещена капелька масла массой  $m = 2 \cdot 10^{-9} \text{ г}$ . Капелька оказалась в равновесии. Найти заряд капельки и число избыточных электронов на ней. Ответ округлите до десятков.

Решение. Поскольку капелька содержит избыточные электроны, ее заряд отрицателен. Положительные заряды — источники электрического поля — расположены над капелькой и притягивают ее, а расположенные под ней отрицательные заряды отталкивают капельку, поэтому сила  $F$ , с которой поле действует на капельку, направлена вверх. Ей противодействует сила тяжести  $mg$ , направленная вниз. Капелька находится в равновесии, значит, эти силы уравновешивают друг друга и их модули одинаковы:

$$F = mg.$$

Из определения напряженности сила  $F$ , действующая на капельку, равна:

$$F = qE, \text{ поэтому } qE = mg,$$

следовательно,

$$q = \frac{mg}{E}.$$

Окончательно для числа избыточных электронов  $N$  получаем

$$N = \frac{q}{e} = \frac{mg}{eE} = \frac{2 \cdot 10^{-12} \cdot 9,8}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,3 \cdot 10^5} = 940.$$

2.3. Электрон, имеющий кинетическую энергию  $W_k = 91 \text{ эВ}$ , влетел в скрещенные электрическое и магнитное поля, в которых векторы напряженности и магнитной индукции взаимно перпендикулярны. Вектор скорости электрона перпендикулярен силовым линиям обоих полей. Чему равна индукция магнитного поля, если электрон в этих полях стал двигаться равномерно и прямолинейно при напряженности электрического поля  $E = 100 \text{ В/см}$ ?

Решение. Поскольку электрон стал двигаться равномерно и прямолинейно, значит, на него стали действовать уравнивающие друг друга электрическая сила  $F_{\text{эл}}$  и сила Лоренца  $F_{\text{л}}$ :  $F_{\text{эл}} = F_{\text{л}}$ , где  $F_{\text{эл}} = eE$ , и  $F_{\text{л}} = Bev \cdot \sin \alpha$ . Так как  $\alpha = 90^\circ$  и  $\sin \alpha = 1$ , то  $eE = Bev$ , откуда в полном соответствии с (2.3)

$$B = \frac{E}{v}$$

Выражая скорость электрона из формулы его кинетической энергии

$$W_{\text{кин}} = \frac{mv^2}{2}$$

и подставляя ее в формулу для вычисления индукции  $B$ , окончательно получим

$$B = E \sqrt{\frac{m_e}{2W_{\text{кин}}}} = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ Тл}.$$

2.4. Электрон влетел в поле конденсатора параллельно его обкладкам со скоростью  $v = 2 \cdot 10^7 \text{ м/с}$ . Длина конденсатора  $l = 0,05 \text{ м}$ , расстояние между его обкладками  $d = 0,02 \text{ м}$ , разность потенциалов между ними  $U = 200 \text{ В}$ . Отношение заряда электрона к его массе  $1,76 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$ . Определить смещение электрона к положительной обкладке за время пролета конденсатора.

Решение. За время, пока электрон будет лететь вдоль оси  $OX$  равномерно и прямолинейно, он спустится вдоль оси  $OY$  на расстояние  $y$ , двигаясь равноускоренно без начальной скорости. Поэтому уравнения движения электрона вдоль осей координат будут иметь вид:

$$x = v_x t \quad (2.6)$$

и

$$y = \frac{at^2}{2} \quad (2.7)$$

Исключая из (2.6) и (2.7) время  $t$ , получим

$$y = \frac{a}{2} \left( \frac{x}{v_x} \right)^2 \quad (2.8)$$

Ускорение электрона  $a$  найдем из второго закона Ньютона и из формулы  $F = eE$ :

$$a = \frac{eE}{m} \quad (2.9)$$

Напряженность однородного поля конденсатора связана с разностью потенциалов на его обкладках  $U$  формулой

$$E = \frac{U}{d}, \text{ поэтому}$$

$$a = \frac{eU}{md} \quad (2.10)$$

Нам осталось подставить (2.9) в (2.10) и учесть, что  $x = l$ :

$$y = \frac{eU}{2md} \left( \frac{l}{v_x} \right)^2 = 5,5 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

2.5. Электрон влетает в однородное магнитное поле индукцией  $B = 0,02 \text{ Тл}$  со скоростью  $v = 200 \text{ км/с}$  перпендикулярно магнитным линиям. Какой путь  $S$  пройдет электрон за время, в течение которого вектор его линейной скорости повернется на  $\varphi = 2^\circ$ ?