

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

# УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ К ПРАКТИЧЕСКИМ РАБОТАМ ПО ФИЗИКЕ



Владимир 2019

УДК 53  
ББК 22.3  
У91

**Автор-составитель Л. В. Фуров**

Рецензенты:

Доктор физико-математических наук, профессор  
заслуженный деятель науки Российской Федерации,  
зав. учебно-научной лабораторией математического  
моделирования физических процессов  
Ярославского государственного университета им. П. Г. Демидова  
*А. И. Григорьев*

Доктор технических наук, доцент  
профессор кафедры физики и прикладной математики,  
директор Института прикладной математики, физики и информатики  
Владимирского государственного университета  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых  
*Н. Н. Давыдов*

Издается по решению редакционно-издательского совета ВлГУ

**Учебное** пособие к практическим работам по физике / авт.-сост.  
У91 Л. В. Фуров ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир :  
Изд-во ВлГУ, 2019. – 140 с.  
ISBN 978-5-9984-1030-7

Предназначено для проведения практических занятий и контроля знаний разделов курса физики: механики, молекулярной физики и термодинамики, электричества и магнетизма, колебаний и волн, оптики, элементов квантовой механики и атомной физики, физики твёрдого тела. Ориентировано на проверку у студентов знаний и компетенций в области общей физики. Приведённые типичные задачи и вопросы по курсу общей физики позволяют проконтролировать усвоение теоретического материала, необходимого для решения задач по данному разделу.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлениям технических специальностей всех форм обучения.

Рекомендовано для контроля профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС ВО.

Ил. 24. Табл. 1. Библиогр.: 29 назв.

УДК 53  
ББК 22.3

ISBN 978-5-9984-1030-7

© ВлГУ, 2019

## ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие к практическим работам по курсу общей физики предназначено для проведения практических занятий и контроля профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС. Вся программа по дисциплине «Физика» разбита на шесть работ – разделов: 1. Механика; 2. Молекулярная физика и термодинамика; 3. Электричество и магнетизм; 4. Колебания и волны; 5. Оптика; 6. Элементы квантовой механики и атомной физики. Физика твёрдого тела. Каждая работа состоит из 10 заданий, которые содержат теоретические вопросы по данной теме, и задач. Кроме того, каждый раздел содержит задачи для самостоятельного решения и таблицу вариантов задач, которые преподаватель может предложить студенту для оценки его знаний по данному разделу физики.

В конце учебного пособия приведен список примерных тем рефератов, которые по желанию может дать студенту преподаватель в качестве дополнительного закрепления изученного материала, а также некоторые табличные данные физических величин.

В результате изучения курса физики студент должен:

*знать:* физические основы механики, молекулярной физики, электричества и магнетизма, колебаний и волн, оптики, квантовой механики и ядерной физики, корректные постановки классических задач;

*уметь:* определять общие формы, закономерности, инструментальные средства физики, понять поставленную задачу, формировать результат и самостоятельно увидеть следствия сформулированного результата;

*владеть:* языком предметной области, результатом проведенных физико-математических и прикладных исследований в виде конкретных рекомендаций, выраженных в терминах предметной области изучаемого явления.

# Практическая работа № 1

## МЕХАНИКА

### 1.1. Кинематика

#### *Теоретический материал*

Механическое движение как простейшая форма движения материи. Материальная точка. Системы отсчёта. Инерциальные системы отсчёта. Радиус-вектор. Принцип относительности Галилея. Траектория. Радиус кривизны траектории. Скорость и ускорение. Тангенциальное и нормальное ускорения. Связь между линейными и угловыми кинематическими величинами. Поступательное движение твёрдого тела.

#### *Основные формулы и определения*

Положение материальной точки в пространстве задаётся радиус-вектором  $\vec{r}$ :  $\vec{r} = \vec{i}x + \vec{j}y + \vec{k}z$ , где  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  – единичные векторы направлений (орты);  $x, y, z$  – координаты точки. Кинематические уравнения движения в координатной форме:  $x = f_1(t)$ ;  $y = f_2(t)$ ;  $z = f_3(t)$ , где  $t$  – время.

- Средняя скорость  $\langle \vec{V} \rangle = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$ , где  $\Delta \vec{r}$  – перемещение материальной точки за интервал времени  $\Delta t$ .

Средняя путевая скорость  $\langle \vec{V} \rangle = \frac{\Delta S}{\Delta t}$ , где  $\Delta S$  – путь, пройденный точкой за интервал времени  $\Delta t$ . Мгновенная скорость  $\vec{V} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \vec{i}v_x + \vec{j}v_y + \vec{k}v_z$ , где  $v_x = \frac{dx}{dt}$ ;  $v_y = \frac{dy}{dt}$ ;  $v_z = \frac{dz}{dt}$  – проекции скорости  $\vec{V}$  на оси координат. Модуль скорости  $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$ .

- Ускорение  $\vec{a} = \frac{\Delta \vec{V}}{\Delta t} = \vec{i}a_x + \vec{j}a_y + \vec{k}a_z$ , где  $a_x = \frac{dV_x}{dt}$ ;  $a_y = \frac{dV_y}{dt}$ ;  $a_z = \frac{dV_z}{dt}$  – проекции ускорения  $\vec{a}$  на оси координат. Модуль ускорения  $a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$ .

При криволинейном движении ускорение можно представить как сумму нормальной  $\vec{a}_n$  и тангенциальной  $\vec{a}_\tau$  составляющих:  $\vec{a} = \vec{a}_n + \vec{a}_\tau$ .

Модули этих ускорений  $a_n = \frac{v^2}{R}$ ;  $a_\tau = \frac{dv}{dt}$ ;  $a = \sqrt{a_n^2 + a_\tau^2}$ , где  $R$  – радиус кривизны в данной точке траектории.

### Вариант 1.1

**Задание 1.** Дайте определение материальной точке.

**Задание 2.** Какое движение называется поступательным?

**Задание 3.** Какие физические величины характеризуют поступательное и вращательное движения в кинематике?

**Задание 4.** Что такое мгновенная скорость? Как она определяется?

**Задание 5.** Запишите формулы, связывающие линейные и угловые характеристики движения.

**Задание 6.** Самоходная косилка имеет ширину захвата 10 м. При средней скорости косилки 0,1 м/с площадь скошенного за 10 мин работы участка равна

- 1) 100 м<sup>2</sup>; 2) 60 м<sup>2</sup>; 3) 600 м<sup>2</sup>; 4) 360 м<sup>2</sup>.

**Задание 7.** По двум параллельным железнодорожным путям равномерно движутся два поезда в противоположных направлениях: грузовой со скоростью 44 км/ч и пассажирский – со скоростью 100 км/ч. Какова величина относительной скорости поездов?

- 1) 20 м/с; 2) 40 м/с; 3) 56 км/ч; 4) 30 м/с.

**Задание 8.** Механическая система состоит из трёх частиц, массы которых  $m_1 = 0,6$  г,  $m_2 = 0,4$  г,  $m_3 = 0,2$  г. Первая частица находится в точке с координатами (3, 2, 0), вторая – в точке (0, 3, 2), третья – в точке (3, 0, 2) (координаты даны в сантиметрах). Тогда  $Y_C$  – координата центра масс равна

- 1) 1,2 см; 2) 2,0 см; 3) 1,0 см; 4) 2,4 см.

**Задание 9.** Автобус, двигаясь прямолинейно и равнозамедленно, уменьшил свою скорость с  $v_1 = 18$  м/с до  $v_2 = 4$  м/с за время  $t = 7$  с. Модуль ускорения автобуса равен

- 1) 2 м/с<sup>2</sup>; 2) 2 м/с<sup>2</sup>; 3) 3 м/с<sup>2</sup>; 4) 7 м/с<sup>2</sup>.

**Задание 10.** Тело движется прямолинейно по оси ординат. На графике рис. 1.1 представлена зависимость проекции скорости тела на ось ординат от времени. За первые 12 с движения тело проходит путь, равный

- 1) 0 м; 2) 30 м; 3) 60 м; 4) 90 м.

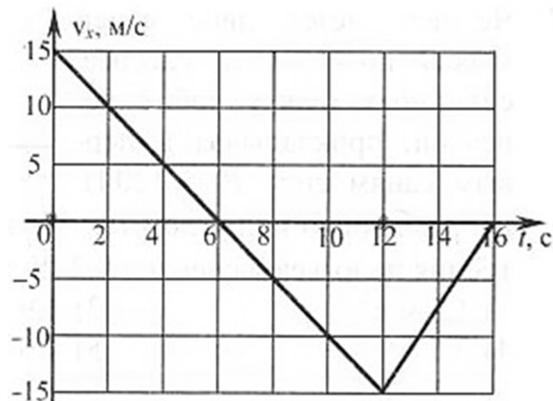


Рис. 1.1

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Какие единицы в системе СИ являются основными?
2. Что такое радиус-вектор?
3. В чём заключается принцип Галилея? Что устанавливают преобразования Галилея?
4. Что такое скорость? Как найти модуль скорости?
5. Как определяются векторы тангенциального и нормального ускорений?
6. Дайте определение вектора и скаляра. Приведите примеры векторных и скалярных величин.
7. Что такое система отсчёта?

## **1.2. Динамика поступательного движения**

### **Теоретический материал**

Динамика как раздел механики. Первый закон Ньютона и понятие инерциальной системы отсчета. Второй закон Ньютона и понятие силы, массы и импульса. Уравнение движения. Третий закон Ньютона и предел его применимости. Неинерциальные системы отсчета. Абсолютные и относительные скорость и ускорение. Силы инерции. Система материальных точек. Центр инерции (центр масс). Теорема о движении центра инерции.

### **Основные формулы и определения**

Уравнение движения материальной точки (второй закон Ньютона): в векторной форме

$$\frac{d\vec{P}}{\Delta t} = \sum_{i=1}^N \vec{F}_i, \text{ или } m\vec{a} = \sum_{i=1}^N \vec{F}_i, \text{ где } \sum_{i=1}^N \vec{F}_i - \text{геометрическая сумма сил,}$$

действующих на материальную точку;  $m$  – масса;  $\vec{a}$  – ускорение;  $\vec{P} = m\vec{V}$  – импульс;  $N$  – число сил, действующих на точку;

в координатной форме (скалярной)

$$ma_x = \sum_{i=1}^N F_{xi}, \quad ma_y = \sum_{i=1}^N F_{yi}, \quad ma_z = \sum_{i=1}^N F_{zi}, \text{ где под знаком суммы}$$

стоят проекции сил  $\vec{F}_i$  на соответствующие оси координат.

▪ Сила упругости  $F_{\text{упр}} = -kx$ , где  $k$  – коэффициент упругости (жёсткость в случае пружины);  $x$  – абсолютная деформация.

▪ Сила трения скольжения  $F_{\text{тр}} = fN$ , где  $f$  – коэффициент трения скольжения;  $N$  – сила нормального давления.

▪ Координаты центра масс системы материальных точек

$$x_c = \frac{\sum m_i x_i}{\sum m_i}, y_c = \frac{\sum m_i y_i}{\sum m_i}, z_c = \frac{\sum m_i z_i}{\sum m_i}, \text{ где } m_i \text{ – масса } i\text{-й материальной точки; } x_i, y_i, z_i \text{ – её координаты.}$$

### **Вариант 1.2**

**Задание 1.** Сформулируйте 1-й закон Ньютона.

**Задание 2.** Сформулируйте 2-й закон Ньютона. Приведите примеры его использования?

**Задание 3.** Сформулируйте 3-й закон Ньютона. Каковы границы его применимости?

**Задание 4.** Дайте определение силы и массы. Назовите их единицы измерения.

**Задание 5.** Чему равна сила упругости? Укажите направление этой силы.

**Задание 6.** Чему равен модуль ускорения автомобиля массой 1 т при торможении по горизонтальной поверхности, если коэффициент трения об асфальт равен 0,4? Сопротивлением воздуха пренебречь.

1) 100 м/с<sup>2</sup>; 2) 10 м/с<sup>2</sup>; 3) 400 м/с<sup>2</sup>; 4) 4 м/с<sup>2</sup>.

**Задание 7.** Когда к пружине длиной 13 см подвесили груз массой в 1 кг, длина пружины стала равной 15 см. Каков коэффициент жёсткости пружины?

1) 200 Н/м; 2) 300 Н/м; 3) 400 Н/м; 4) 500 Н/м.

**Задание 8.** Импульс материальной точки изменяется по закону  $\vec{P} = 5t\vec{e}_x + 3t^2\vec{e}_y$ , кг·м/с. Модуль силы (в ньютонах), действующий на точку в момент времени  $t = 4$  с, равен

1) 34 Н; 2) 26 Н; 3) 40 Н; 4) 13 Н.

**Задание 9.** Тело массой  $m = 2$  кг движется по плоскости таким образом, что зависимость его координат от времени имеет вид  $x(t) = 4t^2 + 5t - 2$ ,  $y(t) = 3t^2 + 4t + 14$  (в системе СИ). При этом модуль равнодействующей приложенных к телу сил равен

1) 10 Н; 2) 18 Н; 3) 20 Н; 4) 24 Н.

**Задание 10.** На горизонтальной плоскости покоится тележка массой  $m = 20$  кг, на которой стоит человек массой  $M = 60$  кг. Если человек движется относительно тележки со скоростью  $v = 2$  м/с, то тележка относительно Земли движется со скоростью (трением между тележкой и плоскостью пренебречь), равной

- 1) 1,5 м/с; 2) 3,0 м/с; 3) 4,5 м/с; 4) 6 м/с.

### ***Вопросы для самоконтроля***

1. Силы трения. В чём физический смысл сил трения?
2. От каких величин зависит величина сил трения?
3. Дайте определения импульса тела и импульса системы тел.
4. Какую систему называют инерциальной? Приведите примеры.
5. Какую роль играют силы трения в жизни и технике?
6. Изменяется ли величина  $g$  при удалении тела от Земли?

## **1.3. Вращательное движение твёрдого тела**

### ***Теоретический материал***

Понятие абсолютно твёрдого тела. Момент силы. Момент импульса. Момент инерции. Теорема Штейнера. Основной закон динамики вращательного движения. Уравнение вращательного движения твёрдого тела относительно неподвижной оси (уравнение моментов). Кинетическая энергия вращающегося твёрдого тела. Гироскопический эффект. Свободные оси.

### ***Основные формулы и определения***

Момент силы  $\vec{F}$  относительно точки  $O$  называется векторным произведением радиуса-вектора  $\vec{r}$  на силу  $\vec{F}$ :  $\vec{M}_O = [\vec{r} \times \vec{F}]$ . В скалярной форме  $M_O = rF \cdot \sin\alpha = lF$ , где  $l = r \cdot \sin\alpha$  – плечо силы (длина перпендикуляра, опущенного из точки  $O$  на линию действия силы).

▪ Момент импульса материальной точки относительно точки  $O$  называется векторным произведением радиус-вектора  $\vec{r}$  на вектор импульса  $\vec{P} = m\vec{V}$ :  $\vec{L}_O = [\vec{r} \times \vec{P}]$ . Направление  $\vec{L}_O$  перпендикулярно плоскости, в которой лежат векторы  $\vec{r}$  и  $\vec{P}$ , в соответствии с правилом правого винта, например, момент импульса электрона, движущегося по круговой орбите в боровской модели атома.

▪ Момент инерции относительно оси вращения:

а) материальной точки  $J = mr^2$ , где  $m$  – масса точки;  $r$  – расстояние от оси вращения;

б) дискретного твёрдого тела  $J = \sum_{i=1}^n \Delta m_i r_i^2$ , где  $\Delta m_i$  – масса  $i$ -го элемента тела;  $r_i$  – расстояние этого элемента от оси вращения;  $n$  – число элементов тела;

в) сплошного твёрдого тела  $J = \int r^2 dm$ . Если тело однородно, т. е. его плотность  $\rho$  одинакова по всему объёму, то  $dm = \rho dV$  и  $J = \rho \int r^2 dV$ , где  $V$  – объём тела.

▪ Теорема Штейнера. Момент инерции тела относительно произвольной оси  $J = J_0 + ma^2$ , где  $J_0$  – момент инерции этого тела относительно оси, проходящей через центр тяжести тела параллельно заданной оси;  $a$  – расстояние между осями;  $m$  – масса тела.

▪ Уравнение вращательного движения твёрдого тела относительно неподвижной оси (уравнение моментов). Оно связывает момент импульса с моментом силы  $\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}$ . Производная по времени момента

импульса  $\vec{L}$  материальной точки относительно точки  $O$  равна моменту действующей силы относительно точки  $O$ .

▪ Основное уравнение динамики вращательного движения твёрдого тела относительно неподвижной оси  $\vec{M} dt = d(J\vec{\omega})$ , где  $\vec{M}$  – момент силы, действующей на тело в течение времени  $dt$ ;  $J$  – момент инерции тела;  $\vec{\omega}$  – угловая скорость;  $J\vec{\omega}$  – момент импульса.

▪ Если момент силы и момент инерции постоянны, то это уравнение записывается в виде  $\vec{M} \Delta t = J \Delta \vec{\omega}$ .

▪ В случае постоянного момента инерции основное уравнение динамики вращательного движения принимает вид  $\vec{M} = J \vec{\varepsilon}$ , где  $\vec{\varepsilon}$  – угловое ускорение.

### **Вариант 1.3**

**Задание 1.** Сформулируйте понятие абсолютно твёрдого тела, центра масс (центра инерции).

**Задание 2.** Какое движение называется вращательным? Каковы характеристики вращательного движения?

**Задание 3.** Дайте определение момента инерции абсолютно твёрдого тела.

**Задание 4.** Сформулируйте теорему Штейнера.

**Задание 5.** Дайте определение момента силы и момента импульса материальной точки относительно некоторой оси.

**Задание 6.** К валу приложен вращающий момент 100 Н·м. На вал насажено колесо диаметром 0,5 м. Какую минимальную касательную тормозящую силу следует приложить к ободу колеса, чтобы колесо не вращалось?

- 1) 400 Н; 2) 200 Н; 3) 800 Н; 4) 100 Н.

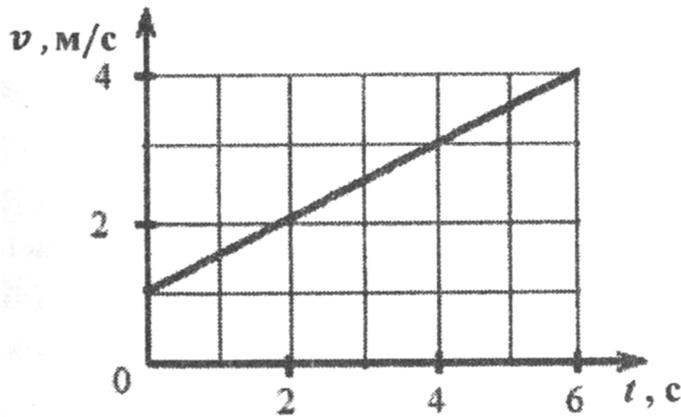


Рис. 1.2

**Задание 7.** Тело вращается вокруг неподвижной оси. Скорость точки, находящейся на расстоянии 5 см от оси, изменяется со временем в соответствии с графиком, представленным на рис. 1.2.

Зависимость угловой скорости тела от времени (в единицах СИ) задаётся уравнением:

- 1)  $\omega = 20 + 10t$ ; 2)  $\omega = 0,1(1 + 0,5t)$ ; 3)  $\omega = 10 + 7,5t$ ; 4)  $\omega = 0,1(1 + 7,5t)$ .

**Задание 8.** Материальная точка массой  $m = 1,5$  кг движется по окружности с постоянной по модулю скоростью  $v = 10$  м/с. За время  $t = T/6$ , где  $T$  – период обращения точки по окружности, модуль изменения импульса тела равен

- 1) 2,5 кг·м/с; 2) 5,0 кг·м/с; 3) 7,5 кг·м/с; 4) 15 кг·м/с.

**Задание 9.** Стержень длиной  $l$  и массой  $m$  вращается относительно оси, проходящей через конец стержня. Определите момент инерции стержня относительно этой оси.

- 1)  $ml^2/2$ ; 2)  $ml^2/3$ ; 3)  $ml^2$ ; 4)  $ml^2/12$ .

**Задание 10.** Момент импульса вращающегося тела изменяется по закону  $L = \alpha t^2$ , где  $\alpha$  – некоторая положительная константа. Зависимость от времени момента сил, действующих на тело, определяется графиком, изображенным на рис. 1.3.

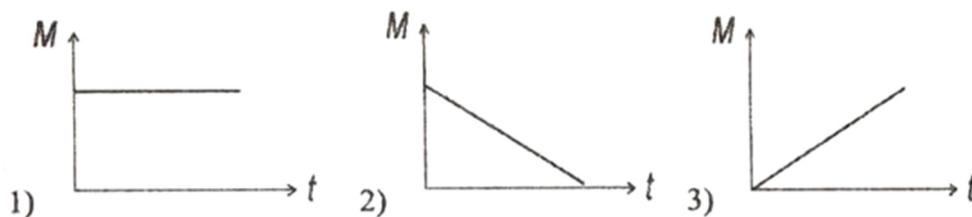


Рис. 1.3

### ***Вопросы для самоконтроля***

1. Что такое силы инерции?
2. Когда возникает центробежная сила инерции? Как её рассчитывают?
3. При каких условиях возникает сила Кориолиса? Как она определяется?
4. Какую роль может играть сила Кориолиса в технике?
5. Сформулируйте основной закон динамики для неинерциальной системы отсчёта.
6. Как связаны момент импульса тела относительно оси и угловая скорость его вращения?
7. Как определяются моменты инерции однородного шара, диска, стержня относительно осей, проходящих через центр тяжести этих тел?
8. Чему равны единицы измерения в системе СИ момента инерции, момента силы, момента импульса?

## **1.4. Законы сохранения**

### ***Теоретический материал***

Значение и содержание законов сохранения в механике. Закон сохранения импульса. Однородность пространства. Реактивное движение. Закон сохранения момента импульса. Изотропия пространства. Работа, энергия, мощность. Связь между потенциальной энергией и силой. Понятие силового поля. Связь между кинетическими энергиями в различных системах отсчета. Консервативные и неконсервативные силы. Закон сохранения энергии в механике. Однородность времени. Консервативная и диссипативная системы.

### ***Основные формулы и определения***

- Закон сохранения импульса. Импульс изолированной системы не изменяется при любых процессах, протекающих внутри системы  $\vec{P} = \text{const}$ .
- Закон сохранения момента импульса: момент импульса замкнутой системы частиц остаётся постоянным  $\vec{L} = \text{const}$ .
- Закон сохранения механической энергии: полная механическая энергия замкнутой системы частиц, на которую действуют только

консервативные силы, остаётся постоянной в процессе движения системы  $T + U = \text{const}$ .

▪ Работа, совершаемая силой при движении, равна изменению (приращению) величины  $T = \frac{mV^2}{2}$ , которая называется кинетической энергией  $dA = dT$ .

▪ Кинетическая энергия вращающегося тела равна  $T = \frac{J\omega^2}{2}$ .

▪ Работа сил потенциального поля не зависит от формы пути, а только от положения точки  $P$  относительно точки  $O$ :  $A_{po} = \int_{P \rightarrow O} \vec{F} d\vec{r} = U(\vec{r})$ . Функцию  $U(\vec{r})$  называют потенциальной энергией частицы в данном поле. Работа сил поля на пути 1 – 2 равна убыли потенциальной энергии частицы в данном поле. Для элементарного перемещения  $dA = -dU$ .

### **Вариант 1.4**

**Задание 1.** Сформулируйте закон сохранения импульса и закон сохранения момента импульса.

**Задание 2.** Что называется механической мощностью? Чему равна средняя и мгновенная мощности при неравномерном движении?

**Задание 3.** Дайте определение потенциальной энергии. Приведите примеры.

**Задание 4.** Как определяется кинетическая энергия катящегося тела?

**Задание 5.** В каких единицах измеряется импульс и момент импульса в системе СИ?

**Задание 6.** Сплошной цилиндр радиусом  $R = 10$  см и массой  $m = 2$  кг катится по наклонной плоскости со скоростью  $v = 0,5$  м/с. Определите кинетическую энергию цилиндра.

1) 1,5 Дж; 2) 0,275 Дж; 3) 0,5 Дж; 4) 0,1 Дж.

**Задание 7.** Постоянная сила 5 Н, приложенная по касательной к твёрдому шару радиусом 1 см, заставляет шар совершать один полный оборот вокруг своей оси. Работа этой силы равна

1) 3,14 Дж; 2) 0,628 Дж; 3) 0,314 Дж; 4) 0,1 Дж.

**Задание 8.** Шар движется со скоростью  $V$  (относительно Земли) и сталкивается с точно таким же шаром. Если второй шар перед

столкновением двигался навстречу с такой же по модулю скоростью (относительно Земли), что и первый, то после неупругого столкновения скорость их совместного движения будет равна

- 1) 0; 2) 0,50  $V$ ; 3) 0,65  $V$ ; 4) 0,70  $V$ .

**Задание 9.** Частица совершила перемещение по некоторой траектории из точки 1 с радиус-вектором  $\vec{r}_1 = 2\vec{e}_x - 3\vec{e}_y$  в точку 2 с радиус-вектором  $\vec{r}_2 = 3\vec{e}_x + 2\vec{e}_y$ . При этом на неё действовала сила  $\vec{F} = 3\vec{e}_x + 4\vec{e}_y$  (радиус-векторы  $\vec{r}_1$ ,  $\vec{r}_2$  и сила  $\vec{F}$  заданы в единицах СИ). Работа, совершённая силой  $\vec{F}$ , равна

- 1) 26 Дж; 2) 23 Дж; 3) 11 Дж; 4) 32 Дж.

**Задание 10.** При подъёме груза со скоростью 0,5 м/с угловая скорость барабана лебёдки диаметром 0,1 м составит

- 1) 25 рад/с; 2) 20 рад/с; 3) 10 рад/с; 4) 30 рад/с.

### ***Вопросы для самоконтроля***

1. Дайте определение консервативных и неконсервативных сил.
2. В чём суть закона сохранения энергии?
3. Как связана потенциальная энергия частицы с силой поля, действующего на частицу, в данной точке? Дайте определение градиента скалярной функции координат. Как направлен градиент?
4. В чём отличие кинетической и потенциальной энергий?
5. Приведите примеры определения потенциальной энергии.
6. Что такое полная механическая энергия?
7. Зависит ли полная механическая энергия от выбора системы отсчёта?

## **1.5. Элементы механики жидкостей и газов**

### ***Теоретический материал***

Жидкости и газы. Уравнение Эйлера. Уравнение неразрывности. Уравнение Бернулли. Системы уравнений газодинамики. Ламинарный и турбулентный режимы течения. Циркуляция скорости. Потенциальное и вихревое движения. Движение тел в жидкостях и газах. Теорема Жуковского.

## **Основные формулы и определения**

▪ Уравнение неразрывности (сплошности) для несжимаемой жидкости:  $V S = \text{const}$ ; для сжимаемой жидкости –  $\rho V S = \text{const}$ , где  $\rho$  – плотность жидкости;  $V$  – скорость потока;  $S$  – сечение трубки тока.

▪ Уравнение движения жидкости для единичной массы в форме Эйлера  $\frac{dV}{dt} = f - \frac{1}{\rho} \frac{dP}{dx}$ , где  $f$  – сумма всех внешних сил, действующих на единичную массу жидкости в интересующей нас точке пространства.

▪ Уравнение Бернулли для идеальной несжимаемой жидкости в общем случае  $P + \rho gh + \frac{\rho V^2}{2} = \text{const}$ , где  $P$  – статическое давление;  $\rho gh$  – гидростатическое давление и  $\frac{\rho V^2}{2}$  – динамическое давление.

▪ Теорема Н. Е. Жуковского. Согласно теореме Жуковского возникает подъёмная сила на единицу длины крыла  $F_y = \Gamma \rho V$ , где  $\Gamma = \oint_l \vec{v} d\vec{l}$  – циркуляция вектора скорости по контуру  $L$ ;  $\rho$  и  $V$  – соответственно плотность потока и скорость невозмущённого потока воздуха.

## **Вариант 1.5**

**Задание 1.** Что называют линией тока, трубкой тока?

**Задание 2.** Сформулируйте уравнение течения в форме Эйлера.

**Задание 3.** Запишите уравнение неразрывности. К каким средам оно применимо?

**Задание 4.** Запишите уравнение Бернулли для частных случаев:

а) жидкость неподвижна;

б) трубка расположена горизонтально.

**Задание 5.** Сформулируйте теорему Жуковского.

**Задание 6.** Канал шириной 10 м и глубиной 5 м наполнен водой и перегороден плотиной. С какой силой вода давит на плотину? Плотность воды принять равной  $1000 \text{ кг/м}^3$ .

1)  $2,5 \cdot 10^6 \text{ Н}$ ; 2)  $1,25 \cdot 10^6 \text{ Н}$ ; 3)  $0,5 \cdot 10^6 \text{ Н}$ ; 4)  $5,0 \cdot 10^4 \text{ Н}$ .

**Задание 7.** Сосуд квадратного сечения (сторона квадрата  $a = 20 \text{ см}$ ) заполнен водой до высоты  $h = 40 \text{ см}$ . Сила давления на боковую стенку сосуда составит

1)  $1,6 \text{ Н}$ ; 2)  $3,2 \text{ Н}$ ; 3)  $160 \text{ Н}$ ; 4)  $320 \text{ Н}$ .

**Задание 8.** При переходе из моря в реку с корабля сняли груз, при этом осадка судна не изменилась. Масса корабля с оставшимся грузом составляет 4000 т, плотность морской воды равна  $1030 \text{ кг/м}^3$ , речной –  $1000 \text{ кг/м}^3$ . Чему равна масса снятого груза?

1) 120 т; 2) 240 т; 3) 360 т; 4) 480 т.

**Задание 9.** В подводной части речного судна ниже уровня воды на глубине 2 м образовалась пробоина, площадь которой составляет  $40 \text{ см}^2$ . Чтобы удержать заплату, закрывающую отверстие с внутренней стороны корабля, к ней следует приложить силу, минимальная величина которой равна

1) 20 Н; 2) 80 Н; 3) 120 Н; 4) 160 Н.

**Задание 10.** Определите лобовое сопротивление самолёта, имеющего крылья площадью  $20 \text{ м}^2$ , если давление воздуха под крылом  $9,8 \text{ Н/см}^2$ , над крылом  $9,7 \text{ Н/см}^2$ . Лобовое сопротивление в 20 раз меньше подъёмной силы.

1) 2000 Н; 2) 200 Н; 3) 900 Н; 4) 1000 Н.

### ***Вопросы для самоконтроля***

1. Что называется давлением? Чему равна единица давления в системе СИ?

2. Чем отличаются упругие свойства жидкостей и газов от упругих свойств твёрдого тела?

3. Какие режимы течения вы знаете?

4. Понятие циркуляции. Применение понятия циркуляции в теореме Жуковского.

5. Применение теоремы Жуковского в технике.

## **1.6. Элементы специальной теории относительности**

### ***Теоретический материал***

Принцип относительности Эйнштейна. Роль скорости света. Постулат постоянства скорости света. Преобразования Лоренца. Пространство и время в специальной теории относительности. Инварианты преобразования. Лоренцово сокращение длины и замедление времени. Релятивистский импульс. Взаимосвязь массы и энергии. Столкновение и распад частиц. Дефект масс. Энергия связи. Соотношение

между полной энергией и импульсом частицы. Понятие об общей теории относительности. Границы применимости классической механики. Философское толкование пространственно-временных отношений.

### **Основные формулы и определения**

▪ Преобразования Лоренца дают связь координат  $x'$ ,  $y'$  и момента времени события  $t'$  в системе  $K'$  с координатами  $x$ ,  $y$  и моментом времени  $t$  в системе  $K$  (прямые преобразования) и наоборот (обратные преобразования).

▪ Прямые преобразования  $x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \beta^2}}$ ;  $y' = y$ ;  $t' = \frac{t - x(v/c^2)}{\sqrt{1 - \beta^2}}$ .

▪ Обратные преобразования  $x = \frac{x' + vt}{\sqrt{1 - \beta^2}}$ ;  $y = y'$ ;  $t = \frac{t' + x'(v/c^2)}{\sqrt{1 - \beta^2}}$ .

Здесь  $\beta = \frac{v}{c}$ , где  $c$  – скорость света в вакууме.

Лоренцево сокращение длины  $l = l_0 \sqrt{1 - \beta^2}$  стержня. Длина стержня, измеренная в системе, относительно которой он движется  $l$ , оказывается меньше длины  $l_0$ , измеренной в системе, относительно которой стержень покоится. Это явление называется лоренцевым сокращением длины.

▪ Релятивистское замедление хода часов  $\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}$ . Время, от-

считанное по часам, относительно которых система движется, всегда больше собственного времени (замедление времени).

▪ Релятивистская масса  $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}$ , где  $m_0$  – масса покоя.

▪ Релятивистский импульс  $p = mv = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \beta^2}}$ .

▪ Закон взаимосвязи массы и энергии  $\Delta E = c^2 \cdot \Delta m$ .

▪ Мерой энергии связи атомного ядра является дефект массы. Дефектом массы  $\Delta m$  называется разность между суммарной массой всех нуклонов ядра в свободном состоянии и массой ядра  $M_{\text{я}}$ ,  $\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - M_{\text{я}}$ , где  $Z$  – число протонов в ядре,  $m_p$  – масса протона,  $(A - Z)$  – число нейтронов в ядре,  $m_n$  – масса нейтрона.

▪ Энергия связи ядра, выделяющаяся при его преобразовании, равна  $\Delta E_{\text{св}} = [Zm_p + (A - Z)m_n - M_{\text{я}}]c^2$ . Энергия покоящегося ядра меньше суммарной энергии невзаимодействующих покоящихся нуклонов на величину  $\Delta E_{\text{св}}$ . Эта величина и есть энергия связи нуклонов в ядре. Она равна той работе, которую нужно совершить, чтобы разделить образующие ядро нуклоны и удалить их друг от друга на такие расстояния, при которых они практически не взаимодействуют друг с другом.

### **Вариант 1.6**

**Задание 1.** Сформулируйте принцип относительности Эйнштейна?

**Задание 2.** Сформулируйте принцип постоянства скорости света.

**Задание 3.** Запишите преобразования Лоренца.

**Задание 4.** В чём заключается дефект масс?

**Задание 5.** Как определяется энергия связи?

**Задание 6.** Тело начало двигаться со скоростью, при которой его масса возросла на 20 %. При этом длина тела в направлении движения:

- 1) уменьшилась в 1,2 раза; 2) увеличилась в 1,2 раза;
- 3) уменьшилась на 20 %; 4) увеличилась на 20%.

**Задание 7.** Во сколько раз замедляется ход времени при скорости движения часов 240 000 км/с?

- 1) в 1,7 раза; 2) в 1,5 раза; 3) в 2,7 раза; 4) не изменится.

**Задание 8.** Ракета летит от Земли со скоростью  $3 \cdot 10^4$  км/ч к ближайшей звезде, находящейся на расстоянии 4,3 световых года. Достигнув звезды, ракета возвращается обратно. На сколько отстанут от земных часы, установленные на ракете, за время полёта?

- 1) 0,3 ч; 2) 0,6 ч; 3) 1,05 ч; 4) 1,5 ч.

**Задание 9.** Каким импульсом обладает электрон, движущийся со скоростью, равной  $4/5$  скорости света?

- 1)  $3,64 \cdot 10^{-20}$  кг·м/с; 2)  $3,00 \cdot 10^{-22}$  кг·м/с; 3)  $2,50 \cdot 10^{-22}$  кг·м/с;
- 4)  $3,64 \cdot 10^{-22}$  кг·м/с.

**Задание 10.** Куб (ребро  $l = 1$  м) движется по отношению к земному наблюдателю со скоростью  $0,75c$ , где  $c$  – скорость света. Вектор скорости перпендикулярен двум противоположащим граням куба. Объём куба относительно земного наблюдателя равен

- 1)  $0,29 \text{ м}^3$ ; 2)  $0,44 \text{ м}^3$ ; 3)  $0,66 \text{ м}^3$ ; 4)  $0,75 \text{ м}^3$ .

### Вопросы для самоконтроля

1. В чём физический смысл постоянства скорости света?
2. При каких скоростях движения тел справедлива ньютоновская механика?
3. Что такое инварианты преобразования?

### Задачи для самостоятельного решения

1.1. Выразите тангенциальную  $W_\tau$  и нормальную  $W_n$  составляющие ускорения через скорость  $\vec{v}$  частицы и её полное ускорение  $W$ .

1.2. Точка движется по окружности радиусом  $R = 4$  м. Закон её движения выражается уравнением  $S = A + Bt^2$ , где  $A = 8$  м,  $B = -2$  м / с<sup>2</sup>. Определите момент времени  $t$ , когда нормальное ускорение  $W_n$  точки равно 9 м / с<sup>2</sup>. Найдите скорость  $v$ , тангенциальное  $W_\tau$  и полное  $W$  ускорения точки в тот же момент времени  $t$ .

1.3. Две материальные точки движутся согласно уравнениям  $x_1 = A_1t + B_1t^2 + C_1t^3$  и  $x_2 = A_2t + B_2t^2 + C_2t^3$ , где  $A_1 = 4$  м/с,  $B_1 = 8$  м/с<sup>2</sup>,  $C_1 = -16$  м/с<sup>3</sup>,  $A_2 = 2$  м/с,  $B_2 = -4$  м/с<sup>2</sup>,  $C_2 = 1$  м/с<sup>3</sup>. В какой момент времени  $t$  ускорения этих точек будут одинаковы? Найдите скорости  $v_1$  и  $v_2$  точек в этот момент.

1.4. Шар массой  $m_1 = 10$  кг сталкивается с шаром массой  $m_2 = 4$  кг. Скорость первого шара  $v_1 = 4$  м/с, второго –  $v_2 = 12$  м/с. Найдите общую скорость  $u$  шаров после удара в двух случаях: 1) малый шар нагоняет большой шар, движущийся в том же направлении; 2) шары движутся навстречу друг другу. Считать удар прямым, центральным, неупругим.

1.5. В лодке массой  $M = 240$  кг стоит человек массой  $m = 60$  кг. Лодка плывёт со скоростью  $v = 2$  м/с. Человек прыгает с лодки в горизонтальном направлении со скоростью  $u = 4$  м/с (относительно лодки). Найдите скорость лодки после прыжка человека: 1) вперёд по движению лодки; 2) в сторону, противоположную движению лодки.

1.6. Человек, стоящий в лодке, сделал шесть шагов вдоль неё и остановился. На сколько шагов передвинулась лодка, если масса лодки в два раза больше (меньше) массы человека?

1.7. Из пружинного пистолета выстрелили пулькой, масса которой  $m = 5$  г. Жёсткость пружины  $k = 1,25$  кН/м. Пружина была сжата на  $\Delta l = 8$  см. Определите скорость пульки при вылете её из пистолета.

1.8. Шар массой  $m_1 = 200$  г, движущийся со скоростью  $v_1 = 10$  м/с, сталкивается с неподвижным шаром массой  $m_2 = 800$  г. Удар прямой, центральный, абсолютно упругий. Определите скорости шаров после столкновения.

1.9. Шар, двигавшийся горизонтально, столкнулся с неподвижным шаром и передал ему 64 % своей кинетической энергии. Шары абсолютно упругие, удар прямой, центральный. Во сколько раз масса второго шара больше массы первого?

1.10. Прыгун в воду совершает с вышки сложный прыжок, состоящий из вращений и поворотов. Как при этом движется его центр масс?

1.11. Цилиндр, расположенный горизонтально, может вращаться вокруг оси, совпадающей с осью цилиндра. Масса цилиндра  $m_1 = 12$  кг. На цилиндр намотали шнур, к которому привязали гирию массой  $m_2 = 1$  кг. С каким ускорением будет опускаться гирия? Какова сила натяжения шнура во время движения гири?

1.12. Через блок, выполненный в виде колеса, перекинута нить, к концам которой привязаны грузы массами  $m_1 = 100$  г и  $m_2 = 300$  г. Массу обода колеса  $M = 200$  г считать равномерно распределённой по ободу, массой спиц пренебречь. Определите ускорение, с которым будут двигаться грузы, и силы натяжения нити по обе стороны блока.

1.13. Двум одинаковым маховикам, находящимся в покое, сообщили одинаковую угловую скорость  $\omega = 63$  рад/с и предоставили их самим себе. Под действием сил трения маховик остановился через одну минуту, а второй сделал до полной остановки  $N = 360$  оборотов. У какого маховика тормозящий момент был больше и во сколько раз?

1.14. Шар скатывается с наклонной плоскости высотой  $h = 90$  см. Какую линейную скорость будет иметь центр шара в тот момент, когда шар скатится с наклонной плоскости?

1.15. Тело брошено под углом к горизонту. Сохраняются ли: а) импульс тела; б) проекция импульса на какое-либо направление? Сопротивлением воздуха пренебречь.

1.16. На верхней поверхности горизонтального диска, который может вращаться вокруг вертикальной оси, проложены по окружности радиусом  $r = 50$  см рельсы игрушечной железной дороги. Масса диска  $M = 10$  кг, его радиус  $R = 60$  см. На рельсы неподвижного диска был поставлен заводной паровозик массой  $m = 1$  кг и выпущен из рук. Он начал двигаться относительно рельсов со скоростью  $v = 0,8$  м/с. С какой угловой скоростью будет вращаться диск?

1.17. Платформа в виде диска вращается по инерции около вертикальной оси с частотой  $n_1 = 14 \text{ мин}^{-1}$ . На краю платформы стоит человек. Когда человек перешёл в центр платформы, частота возросла до  $n_2 = 25 \text{ мин}^{-1}$ . Масса человека  $m = 70 \text{ кг}$ . Определите массу платформы. Момент инерции человека рассчитывать как для материальной точки.

1.18. Во сколько раз замедляется ход времени при скорости движения часов  $240\,000 \text{ км/с}$ ?

1.19. Ракета летит от Земли со скоростью  $3 \cdot 10^4 \text{ км/ч}$  к ближайшей звезде, находящейся на расстоянии  $4,3$  световых года. Достигнув звезды, ракета возвращается обратно. На сколько отстанут от земных часы, установленные на ракете, за время полёта?

1.20. Каким импульсом обладает электрон, движущийся со скоростью, равной  $4/5$  скорости света?

### Контрольное задание № 1

#### Таблица вариантов задач по разделу «Механика»

Вариант	Номер задачи				
1	1.1	1.11	1.20	1.6	1.16
2	1.2	1.12	1.20	1.7	1.17
3	1.3	1.13	1.20	1.8	1.18
4	1.4	1.14	1.18	1.9	1.19
5	1.5	1.15	1.16	1.10	1.20
6	1.6	1.16	1.1	1.11	1.8
7	1.7	1.17	1.2	1.12	1.9
8	1.8	1.18	1.3	1.13	1.10
9	1.9	1.19	1.4	1.14	1.11
10	1.10	1.20	1.5	1.15	1.12
11	1.1	1.11	1.20	1.6	1.16
12	1.2	1.12	1.20	1.7	1.17
13	1.3	1.13	1.20	1.8	1.18
14	1.4	1.14	1.17	1.9	1.19
15	1.5	1.15	1.17	1.10	1.20
16	1.6	1.16	1.1	1.11	1.7
17	1.7	1.17	1.2	1.12	1.8
18	1.8	1.18	1.3	1.13	1.9
19	1.9	1.19	1.4	1.14	1.10
20	1.10	1.20	1.5	1.15	1.11

## Практическая работа № 2

# МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

### 2.1. Молекулярно-кинетическая теория идеального газа

#### *Теоретический материал*

Основные положения молекулярно-кинетической теории вещества. Микро- и макросостояния системы. Макроскопические параметры. Понятие идеального газа. Молекулярно-кинетическое толкование температуры. Число степеней свободы молекулы. Внутренняя энергия идеального газа. Закон равнораспределения энергии. Давление газа с точки зрения молекулярно-кинетической теории. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории. Уравнение состояния идеального газа (уравнение Клапейрона – Менделеева).

#### *Основные формулы и определения*

- Числом степеней свободы механической системы называется количество независимых величин, с помощью которых задаётся положение системы в пространстве. Первые три степени свободы называются поступательными  $i_{\text{пост}}$ , а две другие – вращательными  $i_{\text{вр}}$  и колебательными  $i_{\text{колеб}}$ . Таким образом,  $i = i_{\text{пост}} + i_{\text{вр}} + 2i_{\text{колеб}}$ . Для молекул с жёсткой связью между атомами  $i$  совпадает с числом степеней свободы молекулы.

- На каждую степень свободы молекулы приходится в среднем одинаковая кинетическая энергия, равная  $\frac{1}{2} kT$ , где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К постоянная Больцмана. Это закон равнораспределения энергии. Средняя энергия молекулы должна равняться  $\langle E \rangle = \frac{i}{2} kT$ .

- Внутренней энергией какого-либо тела называется энергия этого тела за вычетом кинетической энергии тела как целого и потенциальной энергии тела во внешнем поле сил  $U_M = \frac{i}{2} RT$ , где  $R = N_A k$ . Здесь  $N_A$  – число Авогадро;  $R$  – универсальная газовая постоянная.

- Основное уравнение молекулярно-кинетической теории  $P = \frac{2}{3} n \langle E \rangle$ . Давление, оказываемое газом на стенки сосуда, прямо

пропорционально числу молекул в единице объёма и средней кинетической энергии поступательного движения одной молекулы.

▪ Уравнение состояния идеального газа (уравнение Клапейрона – Менделеева) для массы газа  $PV = \frac{m}{\mu} RT$ , где  $m$  – масса газа;  $\mu$  – молярная масса, или  $P = nkT$ , где  $n = \frac{N}{V}$ .

### **Вариант 2.1**

**Задание 1.** Какой газ называется идеальным? Опишите модель идеального газа.

**Задание 2.** Что называется числом степеней свободы механической системы?

**Задание 3.** Из каких частей состоит внутренняя энергия?

**Задание 4.** Что утверждает закон равнораспределения?

**Задание 5.** Запишите основное уравнение молекулярно-кинетической теории.

**Задание 6.** В сосуде находится идеальный газ под давлением  $10^5$  Па. Какова концентрация молекул этого газа, если его температура равна  $17^\circ\text{C}$ ?

1)  $0,5 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ ; 2)  $0,8 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ ; 3)  $1,8 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ ; 4)  $2,5 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ .

**Задание 7.** Средняя кинетическая энергия молекулы идеального газа при температуре  $T$  равна  $\varepsilon = (i/2) kT$ . Здесь  $i = n_{\text{п}} + n_{\text{вр}} + n_{\text{к}}$ , где  $n_{\text{п}}$ ,  $n_{\text{вр}}$  и  $n_{\text{к}}$  – число степеней свободы поступательного, вращательного и колебательного движений молекулы. Для атомарного кислорода число  $i$  равно

1) 5; 2) 3; 3) 1; 4) 7.

**Задание 8.** Температура идеального газа повысилась от  $t_1 = 500^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 1000^\circ\text{C}$ . При этом средняя кинетическая энергия движения молекул газа

1) уменьшилась в 2 раза; 2) уменьшилась в 1,65 раза;

3) не изменилась; 4) увеличилась в 1,65 раза.

**Задание 9.** Плотность алюминия  $\rho = 2,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , молярная масса  $\mu = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$ . Среднее значение объёма, занимаемого одним атомом алюминия, равно

1)  $0,67 \cdot 10^{-29} \text{ м}^3$ ; 2)  $1,67 \cdot 10^{-29} \text{ м}^3$ ; 3)  $2,7 \cdot 10^{-29} \text{ м}^3$ ; 4)  $3,7 \cdot 10^{-29} \text{ м}^3$ .

**Задание 10.** В цилиндре объём воздуха при сжатии уменьшается

в 20 раз, а давление возрастает с  $p_1 = 100$  кПа до  $p_2 = 6000$  кПа. Если в начале сжатия температура воздуха равнялась  $t = 27$  °С, то в конце она составила

- 1) 900 К; 2) 1800 К; 3) 3600 К; 4) 18000 К.

### ***Вопросы для самоконтроля***

1. В чём заключается молекулярно-кинетическое толкование температуры?
2. Как объясняют давление газа в молекулярно-кинетической теории (МКТ)?
3. Что такое средняя кинетическая энергия молекул?
4. Что называется числом степеней свободы механической системы?
5. Каковы границы применимости МКТ?
6. Что такое число Лошмидта? Что оно показывает?

## **2.2. Элементы классической статистики**

### ***Теоретический материал***

Динамические и статические закономерности в физике. Статистический метод исследования системы. Фазовое пространство, фазовая точка, фазовая ячейка. Понятие о функции распределения. Статистическое усреднение. Флуктуация и вероятность. Распределение Максвелла. Распределение молекул по абсолютным значениям скорости. Средние скорости молекул. Эффузия газа и молекулярные пучки. Распределение Больцмана. Барометрическая формула. Распределение Максвелла – Больцмана.

### ***Основные формулы и определения***

- Распределение Максвелла (распределение молекул по скоростям) выражается соотношением

$$dN(v) = Nf(v)dv = 4\pi N \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2} e^{-mv^2/(2kT)} v^2 dv,$$

где  $f(v)$  – функция распределения молекул по модулям скоростей, выражающая отношение вероятности того, что скорость молекулы лежит в интервале от  $v$  до  $v + dv$ , к величине этого интервала, а также долю числа

молекул, скорости которых лежат в этом интервале;  $N$  – общее число молекул;  $m$  – масса молекул.

▪ Распределение Больцмана (распределение частиц в силовом поле)  $n = n_0 e^{-U/(kT)}$ , где  $n$  – концентрация частиц;  $n_0$  – концентрация частиц в точках поля, где  $U = 0$ ;  $U$  – их потенциальная энергия;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – термодинамическая температура;  $e$  – основание натуральных логарифмов. Барометрическая формула (распределение давления в однородном поле тяжести)  $p = p_0 e^{-mgz/(kT)}$ , или  $p = p_0 e^{-\mu gz/(RT)}$ , где  $p$  – давление газа;  $m$  – масса частицы;  $\mu$  – молярная масса;  $z$  – координата (высота) точки по отношению к уровню, принятому за нулевой;  $p_0$  – давление на этом уровне;  $g$  – ускорение свободного падения;  $R$  – молярная газовая постоянная.

▪ Средняя квадратичная скорость молекул  $\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{3kT / m_1}$ , или  $\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{3RT / \mu}$ , где  $m_1$  – масса одной молекулы.

## **Вариант 2.2**

**Задание 1.** Постройте график функции распределения Максвелла и укажите её характерные особенности.

**Задание 2.** Сформулируйте распределение Больцмана.

**Задание 3.** Что определяет барометрическая формула?

**Задание 4.** Нарисуйте график функции распределения Больцмана.

**Задание 5.** Запишите закон распределения Максвелла – Больцмана.

**Задание 6.** Средняя квадратичная скорость молекул кислорода при  $927^\circ\text{C}$  равна  $960$  м/с. Какова средняя квадратичная скорость этих молекул при температуре газа  $27^\circ\text{C}$ ?

1)  $200$  м/с; 2)  $824$  м/с; 3)  $320$  м/с; 4)  $480$  м/с.

**Задание 7.** Средняя квадратичная скорость молекул водорода при  $0^\circ\text{C}$  равна  $1760$  м/с. Какова средняя квадратичная скорость молекул кислорода при  $273$  К? ( $\mu$  водорода =  $2 \cdot 10^{-3}$  кг/моль,  $\mu$  кислорода =  $32 \cdot 10^{-3}$  кг/моль)

1)  $110$  м/с; 2)  $440$  м/с; 3)  $320$  м/с; 4)  $500$  м/с.

**Задание 8.** В трёх одинаковых сосудах находится одинаковое количество газа, причём  $T_1 < T_2 < T_3$ . Распределение скоростей молекул в сосуде с температурой  $T_3$  будет описывать кривая на рис. 2.1

1) 1; 2) 2; 3) 3.

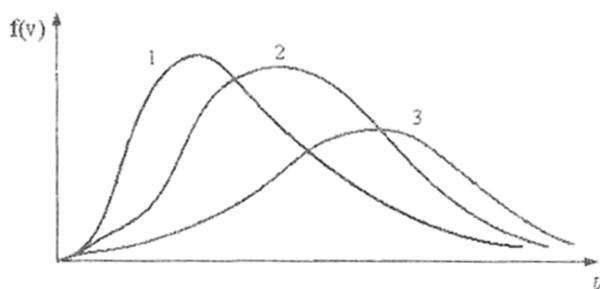


Рис. 2.1

**Задание 9.** На рис. 2.2 представлен график функции распределения молекул идеального газа по скоростям (распределение Максвелла), где  $f(v) = (dN)/(Ndv)$  — доля молекул, скорости которых заключены в интервале скоростей от  $v$  до  $v + dv$  в расчёте на единицу интервала.

Неверным является утверждение:

1) с увеличением температуры площадь под кривой не изменяется;

2) при изменении температуры положение максимума не изменяется;

3) с увеличением температуры максимум кривой смещается вправо.

1) 1; 2) 2; 3) 3.

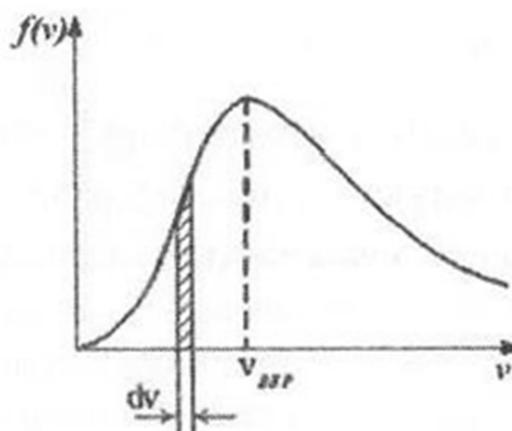


Рис. 2.2

**Задание 10.** Высотная космическая станция расположена на высоте 3250 м над уровнем моря. Найти давление воздуха на этой высоте. Температуру воздуха считать постоянной и равной  $5^\circ\text{C}$ . Массу одного киломоля воздуха принять равной 29 кг/кмоль. Давление воздуха на уровне моря равно 760 мм рт. ст.

1) 510 мм рт. ст.; 2) 800 мм рт. ст.; 3) 300 мм рт. ст.; 4) 480 мм рт. ст.

### Вопросы для самоконтроля

1. Дайте определение вероятности.
2. Дайте определение плотности вероятности.
3. В чём физический смысл фазового пространства и фазовой точки?
4. Сформулируйте эргодическую гипотезу.
5. Что такое функция распределения Максвелла? Каков её физический смысл?
6. В чём суть барометрической формулы? Каково её применение?
7. Каков физический смысл распределения Максвелла – Больцмана?

## 2.3. Реальные газы

### *Теоретический материал*

Силы межмолекулярного взаимодействия в газах. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Изотермы реального газа. Метастабильные состояния. Критическое состояние. Внутренняя энергия реального газа. Эффект Джоуля – Томсона. Сжижение газов и получение низких температур.

### *Основные формулы и определения*

- Уравнение Ван-дер-Ваальса для одного моля газа

$(p + \frac{a}{V_m^2})(V_m - b) = RT$ , где  $a$  и  $b$  – постоянные Ван-дер-Ваальса, рассчитанные на один моль газа;  $V_m$  – молярный объём;  $p$  – давление газа.

- Внутренняя энергия реального газа  $U = \nu (C_V T - \frac{a}{V_m})$ , где  $C_V$  – молярная теплоёмкость газа при постоянном объёме.

### *Вариант 2.3*

**Задание 1.** Запишите уравнение Ван-дер-Ваальса. Какой смысл имеют константы Ван-дер-Ваальса, входящие в это уравнение?

**Задание 2.** В чём заключается эффект Джоуля – Томсона?

**Задание 3.** Каков принцип сжижения газов?

**Задание 4.** Что такое пересыщенный пар?

**Задание 5.** Что такое перегретая жидкость?

**Задание 6.** В сосуде вместимостью  $V = 0,3$  л находится углекислый газ, содержащий количество вещества  $\nu = 1$  моль при температуре  $T = 300$  К. Определите давление  $p$  газа по уравнению Ван-дер-Ваальса.

1) 5,67 МПа; 2) 2,01 МПа; 3) 3,43 МПа.

**Задание 7.** Давление  $p$  кислорода равно 7 МПа, его плотность  $\rho = 100$  кг/м<sup>3</sup>. Найдите температуру  $T$  кислорода.

1) 105 К; 2) 287 К; 3) 345 К.

**Задание 8.** Определите давление  $p$  водяного пара массой  $m = 1$  кг, взятого при температуре  $T = 380$  К и объёме  $V = 1000$  л.

1) 174 кПа; 2) 243 кПа; 3) 300 МПа.

**Задание 9.** Критическая температура  $T_{кр}$  аргона равна 151 К и критическое давление  $P_{кр} = 4,86$  МПа. Определите по этим данным критический молярный объём  $V_{мкр}$  аргона.

1) 96,8 см<sup>2</sup>/моль; 2) 119,8 см<sup>2</sup>/моль; 3) 36,5 см<sup>2</sup>/моль.

**Задание 10.** Вычислите критическую температуру  $T_{кр}$  и давление  $p_{кр}$  кислорода.

1) 150 К и 5 МПа; 2) 250 К и 3 МПа; 3) 350 К и 6 МПа.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. В чём физический смысл сил притяжения и сил отталкивания?
2. Что такое метастабильное состояние?
3. Какие отличия в уравнении Ван-дер-Ваальса от реального газа?
4. Согласуются ли опытные изотермы реального газа с уравнением Ван-дер-Ваальса?
5. Что такое критическое состояние?
6. Что такое критическая температура?

## **2.4. Свойства твёрдых тел**

### **Теоретический материал**

Амфорные и кристаллические тела. Упругая и пластическая деформации. Закон Гука. Кристаллическая решётка. Дальний порядок. Дефекты в кристаллах. Фазы вещества. Условия равновесия фаз. Испарение и конденсация. Плавление и кристаллизация. Уравнение Клапейрона – Клаузиуса. Фазовая диаграмма (диаграмма состояния). Тройная точка. Полиморфизм. Фазовые переходы первого и второго рода.

### **Основные формулы и определения**

▪ Относительная деформация при продольном растяжении или сжатии тела  $\varepsilon = x / l$ , где  $\varepsilon$  – относительное удлинение (сжатие);  $x$  – абсолютное удлинение;  $l$  – начальная длина тела.

▪ Напряжение нормальное  $\sigma = F_{упр} / S$ , где  $F_{упр}$  – упругая сила, перпендикулярная поперечному сечению тела;  $S$  – площадь этого слоя.

▪ Закон Гука для продольного растяжения или сжатия  $F_{упр} = -kx$ , или  $\sigma = \varepsilon E$ , где  $k$  – коэффициент упругости (в случае пружины – жёсткость);  $E$  – модуль Юнга.

▪ Уравнение Клапейрона – Клаузиуса  $\frac{dP}{dT} = \frac{q_{12}}{T(V_2 - V_1)}$ , где

$q_{12}$  – теплота фазового перехода;  $T$  – температура;  $V_1$  и  $V_2$  – объёмы обеих фаз ( $q_{12}$  и  $V_1$ ,  $V_2$  относятся к одному и тому же количеству вещества, например к 1 моллю или 1 кг, т. е. являются удельными).

## Вариант 2.4

**Задание 1.** Что называется фазой? Какие виды фазовых переходов вы знаете?

**Задание 2.** Запишите уравнение Клапейрона – Клаузиуса.

**Задание 3.** В чём физический смысл испарения и конденсации?

**Задание 4.** Объясните физический смысл плавления и кристаллизации.

**Задание 5.** Нарисуйте диаграмму состояния вещества. Что такое тройная точка? Где она находится на диаграмме?

**Задание 6.** В сосуде под поршнем находится ненасыщенный пар. Его можно сделать насыщенным:

1) повышая температуру; 2) уменьшая объём сосуда; 3) увеличивая внутреннюю энергию; 4) добавляя в сосуд другой газ.

**Задание 7.** Относительная влажность воздуха в комнате 40 %. Давление насыщенного водяного пара при той же температуре равно 2,0 кПа. Атмосферное давление 100 кПа. Чему равно парциальное давление водяного пара в комнате?

1) 1,7 кПа; 2) 2,4 кПа; 3) 0,8 кПа.

**Задание 8.** Чтобы целиком расплавить брусок из олова, нагретый до температуры плавления, требуется количество теплоты  $Q$ . Такому бруску, нагретому до температуры плавления, передали количество теплоты  $Q/2$ . Как изменилась при этом его температура?

1) увеличилась; 2) уменьшилась; 3) не изменилась.

**Задание 9.** Чтобы целиком замёрзла вся вода, находящаяся в тарелке под нормальным давлением при температуре  $0^\circ\text{C}$ , требуется отвести от нее количество теплоты  $Q$ . От этой воды отвели количество теплоты  $Q/2$ . Как изменилась при этом внутренняя энергия?

1) увеличилась; 2) уменьшилась; 3) не изменилась.

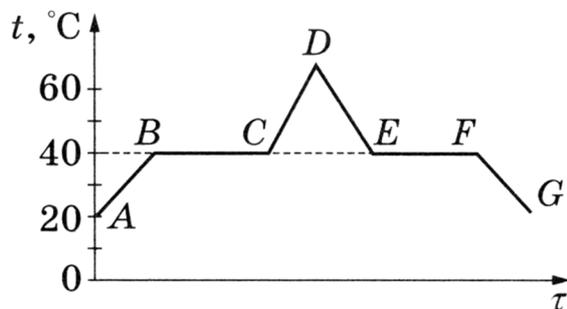


Рис. 2.3

1) AB; 2) BC; 3) DE; 4) EF.

**Задание 10.** В начальный момент в сосуде под лёгким поршнем находится только жидкий эфир. На рис. 2.3 показан график зависимости температуры  $t$  эфира от времени  $\tau$  его нагревания и последующего охлаждения. Установите соответствие между процессами конденсации эфира, его нагреванием и участками графика.

## **Вопросы для самоконтроля**

1. Дайте сравнительную характеристику аморфных и кристаллических тел.
2. В чём заключается деформация твёрдого тела?
3. Чем обусловлено тепловое расширение тел?
4. Что характерно для процесса плавления?
5. Что показывают кривые солидуса и ликвидуса?
6. Что характерно для процесса кристаллизации?

## **2.5. Свойства жидкостей**

### **Теоретический материал**

Характеристика жидкого состояния. Объёмные свойства жидкостей. Строение жидкостей. Ближний порядок. Поверхностное натяжение. Силы, возникающие на кривой поверхности жидкости. Формула Лапласа. Условия равновесия на границе двух сред. Краевой угол. Смачивание. Капиллярные явления.

### **Основные формулы и определения**

▪ Формула Лапласа:  $\Delta P = \alpha \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$ , где  $\alpha$  – коэффициент поверхностного натяжения;  $R_1$  и  $R_2$  – радиусы кривизны в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, пересечение которых совпадает с нормалью к поверхности жидкости в интересующей нас точке.

▪ Мерой смачивания служит краевой угол между касательными к поверхности жидкости. Если  $\theta < \pi/2$ , то говорят, что жидкость смачивает поверхность твёрдого тела. При  $\theta \rightarrow 0$  имеет место полное смачивание. Если  $\theta > \pi/2$ , то жидкость не смачивает поверхность. При  $\theta \rightarrow \pi$  имеем полное смачивание. Для краевого угла имеем  $\cos \theta = \frac{\alpha_{Т-Г} - \alpha_{Т-Ж}}{\alpha_{Ж-Г}}$ ,

где  $\alpha_{Т-Г}$ ,  $\alpha_{Т-Ж}$ ,  $\alpha_{Ж-Г}$  – коэффициенты поверхностного натяжения жидкости на границах: твёрдое тело – газ, твёрдое тело – жидкость, жидкость – газ соответственно.

### **Вариант 2.5**

**Задание 1.** Что такое дальний и ближний порядок?

**Задание 2.** Что такое коэффициент поверхностного натяжения?

**Задание 3.** Нарисуйте качественные зависимости радиальной функции распределения жидкости и твёрдого тела. Объясните возможность «носить воду в решетке»?

**Задание 4.** Напишите формулу Лапласа и поясните её.

**Задание 5.** Изобразите на диаграмме ( $p, T$ ) кривые испарения, плавления и сублимации. Покажите области однофазных состояний вещества.

**Задание 6.** Масса  $m$  100 капель спирта, вытекающего из капилляра, равна 0,71 г. Определите поверхностное натяжение  $\sigma$  спирта, если диаметр  $d$  шейки капли в момент отрыва равен 1 мм.

1) 96,8 мН/м; 2) 22,2 мН/м; 3) 36,5 мН/м.

**Задание 7.** Трубка имеет диаметр  $d_1 = 0,2$  см. На нижнем конце трубки повисла капля воды, имеющая в момент отрыва вид шарика. Найдите диаметр  $d_2$  этой капли.

1) 16,8 мм; 2) 2,2 мм; 3) 4,4 мм.

**Задание 8.** Глицерин поднялся в капиллярной трубке на высоту  $h = 20$  мм. Определить поверхностное натяжение  $\sigma$  глицерина, если диаметр  $d$  канала трубки равен 1 мм.

1) 68 мН/м; 2) 62 мН/м; 3) 36 мН/м.

**Задание 9.** В воду опущена на очень малую глубину стеклянная трубка с диаметром  $d$  внутреннего канала, равным 1 мм. Найдите массу  $m$  вошедшей в трубку воды.

1) 96 мг; 2) 23,1 мг; 3) 36,5 мг.

**Задание 10.** Капиллярная трубка диаметром  $d = 0,5$  мм наполнена водой. На нижнем конце трубки вода повисла в виде капли. Эту каплю можно принять за часть сферы радиусом  $r = 3$  мм. Найдите высоту  $h$  столбика воды в трубке.

1) 6,37 см; 2) 2,23 см; 3) 3,5 см.

### ***Вопросы для самоконтроля***

1. В каких единицах измеряется коэффициент поверхностного натяжения в системе СИ?

2. Какой порядок величины имеет коэффициент поверхностного натяжения при температуре 20 °С?

3. Что такое капилляры?

4. В чём смысл капиллярных явлений?

5. В чём физический смысл испарения и конденсации?

6. Как влияют силы притяжения между молекулами в процессах испарения и конденсации?

7. Что является центром конденсации?

## 2.6. Элементы физической кинетики

### *Теоретический материал*

Понятие о физической кинетике. Неравновесные системы. Время релаксации. Явления переноса. Диффузия. Коэффициент диффузии. Теплопроводность. Коэффициент теплопроводности. Вязкость (внутреннее трение). Коэффициент вязкости. Динамическая и кинематическая вязкость.

### *Основные формулы и определения*

▪ Средняя длина свободного пробега молекулы (путь между двумя последовательными столкновениями) равна  $\langle l \rangle = \langle v \rangle / \langle z \rangle$ ,

где  $\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$  – средняя арифметическая скорость;  $\langle z \rangle$  – среднее

число столкновений, испытываемых одной молекулой за 1 с;

$\langle z \rangle = \sqrt{2} \pi d^2 n \langle v \rangle$ .

▪ Диффузия – самопроизвольное выравнивание концентраций вещества, вследствие которого осуществляется направленный перенос массы. Этот процесс описывается законом Фика  $m_i = -D_i \frac{d\rho_i}{dx} S$ , где коэф-

фициент диффузии  $D_i = \frac{1}{3} \langle v_i \rangle \lambda_i$ ;  $\frac{d\rho_i}{dx}$  – градиент плотности вещества.

▪ Уравнение, которое описывает процесс теплопроводности, называется законом Фурье. Согласно этому закону количество теплоты  $q$ , переносимое в единицу времени через площадку, пропорционально градиенту температуры  $\frac{dT}{dx}$  в направлении  $x$ , перпендикулярном

этой площадке. Получаем, что  $q = -\chi \frac{dT}{dx} S$ , где  $\chi$  – коэффициент тепло-

проводности. Он определяет скорость передачи тепла от более нагретых к менее нагретым участкам.

▪ Закон внутреннего трения (вязкость):  $F_u = \eta \left| \frac{du}{dx} \right| S$ , где  $\left| \frac{du}{dx} \right|$  – градиент скорости слоёв газа в направлении  $x$ ;  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости, который определяется  $\eta = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle \lambda$ ;  $S$  – площадь трущихся слоёв.

### **Вариант 2.6**

**Задание 1.** Какие процессы называются явлениями переноса?

**Задание 2.** Запишите закон Фурье. Что переносится в процессе теплопроводности?

**Задание 3.** Запишите закон внутреннего трения. Что переносится в процессе внутреннего трения?

**Задание 4.** Дайте определение явлению эффузии. Приведите примеры её применения.

**Задание 5.** Определите характер зависимости от температуры  $T$  и давления  $p$  газа его коэффициента диффузии  $D$ , вязкости  $\eta$  и теплопроводности  $\lambda$ .

**Задание 6.** Найдите среднюю длину свободного пробега  $\lambda$  молекул водорода при давлении  $P = 0,1$  Па и температуре  $T = 100$  К.

1) 6,4 см; 2) 2,2 см; 3) 3,5 см.

**Задание 7.** Средняя длина свободного пробега  $\lambda$  атомов гелия при нормальных условиях равна 180 нм. Определите диффузию  $D$  гелия.

1)  $6,83 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с; 2)  $7,23 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с; 3)  $3,65 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с.

**Задание 8.** Диффузия  $D$  кислорода при температуре  $t = 0$  °С равна 0,19 см<sup>2</sup>/с. Определите среднюю длину свободного пробега  $\lambda$  молекул кислорода.

1) 104 нм; 2) 22 мкм; 3) 135 нм.

**Задание 9.** Найдите среднюю длину свободного пробега  $\lambda$  молекул азота при условии, что его динамическая вязкость  $\eta = 17$  мкПа·с.

1) 104 пм; 2) 90 пм; 3) 135 пм.

**Задание 10.** Вычислите теплопроводность гелия при нормальных условиях.

1) 38,6 мВт/(м·К); 2) 7,3 мВт/(м·К); 3) 3,6 мВт/(м·К).

### ***Вопросы для самоконтроля***

1. Что такое время релаксации?
2. Как определяется коэффициент динамической вязкости?
3. Сформулируйте закон Фика. Что переносится в процессе диффузии?
4. Укажите общие признаки процессов переноса.
5. Каков физический смысл коэффициента диффузии?
6. Каков физический смысл коэффициента теплопроводности?
7. Каков физический смысл коэффициента внутреннего трения?
8. Каковы единицы измерения в системе СИ коэффициентов диффузии, теплопроводности и внутреннего трения?

## **2.7. Начала термодинамики**

### ***Теоретический материал***

Статистический и термодинамический методы. Термодинамическая система. Термодинамический процесс. Основные термодинамические понятия: внутренняя энергия, работа, теплота. Формулировки первого начала термодинамики. Уравнение первого начала термодинамики. Теплоёмкость. Зависимость теплоёмкости идеального газа от вида процесса. Формула Майера. Работа, совершаемая газом при изо-процессах. Энтальпия (тепловая функция). Адиабатический процесс. Теплоёмкость твердых тел. Недостаточность классической теории теплоёмкостей газов. Равновесные и неравновесные состояния системы. Обратимые и необратимые процессы. Круговой процесс (цикл). Формулировки второго начала термодинамики. Цикл Карно и его коэффициент полезного действия (КПД) для идеального газа. Тепловые двигатели и холодильные машины. Максимальный КПД теплового двигателя. Энтропия. Статистический вес (термодинамическая вероятность). Закон возрастания энтропии. Термодинамические потенциалы и условия равновесия. Статистическое толкование второго начала термодинамики.

### ***Основные формулы и определения***

- Удельные теплоёмкости при постоянном объёме и постоянном давлении соответственно равны  $c_v = \frac{iR}{2\mu}$ ,  $c_p = \frac{i + 2R}{2\mu}$ .

- Уравнение Майера  $C_p - C_v = R$ .
- Показатель адиабаты  $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ , или  $\gamma = \frac{i+2}{2}$ .
- Работа газа: а) при изобарном процессе ( $p = \text{const}$ )  $A = p(V_2 - V_1)$ ;  
б) при изотермическом процессе ( $T = \text{const}$ )  $A = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1}$ ;  
в) при адиабатном процессе  $A = \frac{m}{\mu} C_v(T_1 - T_2)$ , где  $T_1$  – начальная

температура газа;  $T_2$  – его конечная температура.

- Уравнение Пуассона (уравнение газового состояния при адиабатном процессе)  $PV^\gamma = \text{const}$ .

- Первое начало термодинамики в общем случае записывается в виде  $Q = \Delta U + A$ , где  $Q$  – количество теплоты, сообщённое газу;  $\Delta U$  – изменение его внутренней энергии;  $A$  – работа, совершаемая газом против внешних сил.

Первое начало термодинамики:

а) при изобарном процессе  $Q = \Delta U + A = \frac{m}{\mu} C_v \Delta T + \frac{m}{\mu} R \Delta T = \frac{m}{\mu} C_p \Delta T$ ;

б) при изохорном процессе ( $A = 0$ )  $Q = \Delta U = \frac{m}{\mu} C_v \Delta T$ ;

в) при изотермическом процессе ( $\Delta U = 0$ )  $Q = A = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1}$ ;

г) при адиабатном процессе ( $Q = 0$ )  $A = -\Delta U = -\frac{m}{\mu} C_v \Delta T$ .

- Термический коэффициент полезного действия цикла в общем случае  $\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$ , где  $Q_1$  – количество теплоты, полученное рабочим телом (газом) от нагревателя;  $Q_2$  – количество теплоты, переданное рабочим телом охладителю.

КПД цикла Карно  $\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$ , или  $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$ , где  $T_1$  – температура нагревателя;  $T_2$  – температура охладителя.

- Формула Больцмана  $S = k \cdot \ln W$ , где  $S$  – энтропия системы;  $W$  – термодинамическая вероятность её состояния;  $k$  – постоянная Больцмана.

### Вариант 2.7

**Задание 1.** Как определяется работа, совершаемая газом при изопроцессах?

**Задание 2.** Сформулируйте первое начало термодинамики.

**Задание 3.** Сформулируйте второе начало термодинамики.

**Задание 4.** Из каких процессов состоит цикл Карно?

**Задание 5.** Дайте понятие энтропии. В чём выражается закон возрастания энтропии?

**Задание 6.** Сформулируйте третье начало термодинамики.

**Задание 7.** Если в некотором процессе подведённая к газу теплота равна изменению его внутренней энергии, т. е.  $Q = \Delta U$ , то такой процесс является

1) адиабатическим; 2) изотермическим; 3) изохорическим; 4) изобарическим.

**Задание 8.** На рис. 2.4 представлена диаграмма некоторого циклического процесса 1-2-3-1, происходящего с идеальным одноатомным газом. Работа газа  $A'$  и изменение его внутренней энергии  $\Delta U$  при переходе из состояния 1 в состояние 2 соответственно равны

1)  $A' = -1,8 \cdot 10^5$  Дж,  $\Delta U = 3,6 \cdot 10^5$  Дж;

2)  $A' = 0$  Дж,  $\Delta U = 2,7 \cdot 10^5$  Дж;

3)  $A' = 0$  Дж,  $\Delta U = -2,7 \cdot 10^5$  Дж;

4)  $A' = 1,8 \cdot 10^5$  Дж,  $\Delta U = -3,6 \cdot 10^5$  Дж.

**Задание 9.** В идеальном тепловом двигателе из каждого килоджоуля теплоты, полученной от нагревателя, 700 Дж отдаётся холодильнику. Если при этом температура нагревателя равна  $227^\circ\text{C}$ , то температура холодильника равна

1)  $12^\circ\text{C}$ ; 2)  $27^\circ\text{C}$ ; 3)  $57^\circ\text{C}$ ; 4)  $77^\circ\text{C}$ .

**Задание 10.** КПД идеальной тепловой машины, работающей по циклу Карно, равен  $\eta_1 = 60\%$ . Если температуру нагревателя уменьшить в 1,2 раза, а температуру холодильника увеличить в 1,2 раза, то КПД тепловой машины будет равен  $\eta_2$ . При этом модуль  $|\eta_1 - \eta_2|$  равен

1)  $0\%$ ; 2)  $12,2\%$ ; 3)  $17,6\%$ ; 4)  $18,3\%$ .

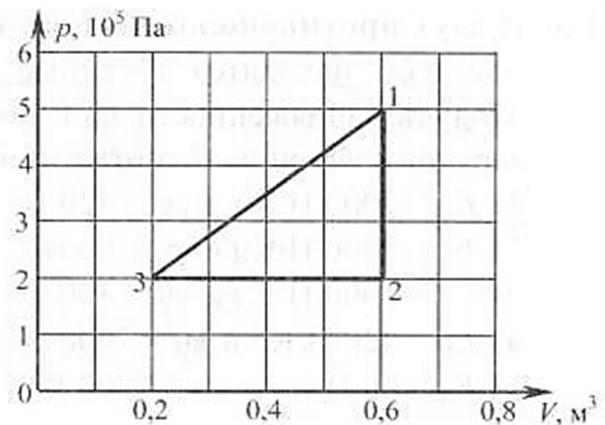


Рис. 2.4

### Вопросы для самоконтроля

1. Сформулируйте основные термодинамические понятия.
2. Чему равен КПД идеальной машины Карно? Что характеризуют температуры  $T_1$  и  $T_2$  в формуле для идеальной машины Карно?
3. Что называется количеством теплоты?
4. В каких единицах системы СИ измеряются работа, количество теплоты, внутренняя энергия?
5. Что такое теплоёмкость тела?
6. Чем отличаются удельная и молярная теплоёмкости?
7. Как физически объяснить тот факт, что  $C_p > C_v$ ?
8. Какой процесс называется адиабатным? Что выражает показатель адиабаты?
9. Может ли тепловая машина, использующая цикл Карно, быть необратимой? Сформулируйте достаточные условия обратимости такой машины.
10. Можно ли сделать обратимую тепловую машину, использующую цикл, отличный от цикла Карно? Что для этого необходимо?
11. Является ли цикл Карно единственным, чей КПД зависит только от минимальной  $T_2$  и максимальной  $T_1$  температур рабочего тела?
12. Покажите эквивалентность формулировок второго начала термодинамики Кельвина и Клаузиуса и утверждения  $dS \geq 0$ , где  $S$  – энтропия изолированной системы.

### Задачи для самостоятельного решения

- 2.1. Вычислите массу  $m$  атома азота.
- 2.2. Вычислите концентрацию молекул: а) идеального газа при нормальных условиях; б) воды; в) жидкого азота; г) алюминия. Плотности воды, жидкого азота и алюминия равны соответственно 1,0; 0,80; 2,7 г/см<sup>3</sup>.
- 2.3. Плотность газа  $\rho$  при давлении  $p = 96$  кПа и температуре  $t = 0$  °С равна 1,35 г/л. Найдите молярную массу  $M$  газа.
- 2.4. Определите давления  $p_1$  и  $p_2$  газа, содержащего  $N = 10^9$  молекул и имеющего объём  $V = 1$  см<sup>3</sup>, при температурах  $T_1 = 3$  К и  $T_2 = 1000$  К.
- 2.5. При температуре  $t = 35$  °С и давлении  $p = 708$  кПа плотность некоторого газа  $\rho = 12,2$  кг/м<sup>3</sup>. Определите относительную молекулярную массу  $M_r$  газа.

2.6. Какой объём  $V$  занимает смесь азота массой  $m_1 = 1$  кг и гелия массой  $m_2 = 1$  кг при нормальных условиях?

2.7. В баллоне вместимостью  $V = 15$  л находится смесь, содержащая  $m_1 = 10$  г водорода,  $m_2 = 54$  г водяного пара и  $m_3 = 60$  г оксида углерода. Температура смеси  $t = 27$  °С. Определите давление.

2.8. Найдите полную кинетическую энергию, а также кинетическую энергию вращательного движения одной молекулы аммиака  $\text{NH}_3$  при температуре  $t = 27$  °С.

2.9. Определите удельные теплоёмкости  $c_p$  и  $c_v$  газообразного оксида углерода  $\text{CO}$ .

2.10. Смесь газа состоит из кислорода  $\text{O}_2$  с массовой долей  $w_1 = 85$  % и озона  $\text{O}_3$  с массовой долей  $w_2 = 15$  %. Определите удельные теплоёмкости  $c_p$  и  $c_v$  газовой смеси.

2.11. Газовая смесь состоит из азота массой  $m_1 = 3$  кг и водяного пара массой  $m_2 = 1$  кг. Принимая эти газы за идеальные, определите удельные теплоёмкости  $c_p$  и  $c_v$  газовой смеси.

2.12. Молекула газа состоит из двух атомов; разность удельных теплоёмкостей газа при постоянных давлении и объёме равна  $260$  Дж/(кг·К). Найдите молекулярную массу газа и его удельные теплоёмкости  $c_p$  и  $c_v$ .

2.13. Водород занимает объём  $V = 10$  м<sup>3</sup> при давлении  $p_1 = 0,1$  МПа. Его нагрели при постоянном объёме до давления  $p_2 = 0,3$  МПа. Определите изменение  $\Delta U$  внутренней энергии газа, работу  $A$ , совершённую им, и теплоту  $Q$ , сообщённую газу.

2.14. Кислород при неизменном давлении  $p = 80$  кПа нагревается. Его объём увеличивается от  $V_1 = 1$  м<sup>3</sup> до  $V_2 = 3$  м<sup>3</sup>. Определите изменение  $\Delta U$  внутренней энергии кислорода, работу  $A$ , совершённую им при расширении, а также теплоту  $Q$ , сообщённую газу.

2.15. В цилиндре под поршнем находится азот, имеющий массу  $m = 0,6$  кг и занимающий объём  $V_1 = 1,2$  м<sup>3</sup>, при температуре  $T_1 = 560$  К. В результате нагревания газ расширился и занял объём  $V_2 = 4,2$  м<sup>3</sup>, причём температура осталась неизменной. Найдите изменение  $\Delta U$  внутренней энергии газа, совершённую им работу  $A$  и теплоту  $Q$ , сообщённую газу.

2.16. В бензиновом автомобильном двигателе степень сжатия горючей смеси равна  $6,2$ . Смесь засасывается в цилиндр при температуре  $t_1 = 15$  °С. Найдите температуру  $t_2$  горючей смеси в конце такта сжатия. Горючую смесь рассматривать как двухатомный идеальный газ; процесс считать адиабатным.

2.17. Газ совершает цикл Карно. Температура теплоотдатчика в три раза выше температуры теплоприёмника. Теплоотдатчик передал газу  $Q_1 = 41,9$  кДж теплоты. Какую работу совершил газ?

2.18. Какую энергию надо затратить, чтобы выдуть мыльный пузырь диаметром  $d = 12$  см? Каково будет добавочное давление внутри этого пузыря?

2.19. На нижнем конце трубки диаметром  $d = 0,2$  см повисла шарообразная капля воды. Найдите диаметр этой капли.

2.20. В сосуд с ртутью частично погружены две вертикально расположенные и параллельные друг другу стеклянные пластинки. Расстояние между пластинками  $d = 1$  мм. Определите разность  $\Delta h$  уровней ртути в сосуде и между пластинками, краевой угол принять равным  $138^\circ$ .

2.21. Определите для равновесного газа: а)  $\langle V_x \rangle$ ; б)  $V_{x \text{ наиб}}$ ; в) долю молекул с  $v_x \leq 0$ ; г) долю молекул с  $\frac{T}{K} - 273,15 \leq 0, v_y \leq 0, v_z \geq 0$ . Здесь

$\frac{T}{K} - 273,15, v_y$  и  $v_z$  – компоненты скорости молекул вдоль осей  $x, y$  и  $z$

соответственно;  $V_{x \text{ наиб}}$  – наиболее вероятное значение  $\frac{T}{K} - 273,15$ .

2.22. Что происходит с максимумом функции  $f(v)$  при: а) увеличении температуры газа  $T$ ; б) увеличении массы молекул газа  $m$ ? Как меняется при этом относительное число «быстрых» ( $v \geq v_0$ ) и «медленных» ( $v \leq v_0$ ) молекул,  $v_0 = \sqrt{2kT/m}$ ?

## Контрольное задание № 2

### Таблица вариантов задач по разделу «Молекулярная физика и термодинамика»

Вариант	Номер задачи				
	2.1	2.11	2.21	2.6	2.16
1	2.1	2.11	2.21	2.6	2.16
2	2.2	2.12	2.22	2.7	2.17
3	2.3	2.13	2.2	2.8	2.18
4	2.4	2.14	2.3	2.9	2.19
5	2.5	2.15	2.4	2.10	2.20
6	2.6	2.16	2.1	2.11	2.12

Окончание таблицы

Вариант	Номер задачи				
7	2.7	2.17	2.2	2.12	2.13
8	2.8	2.18	2.3	2.13	2.14
9	2.9	2.19	2.4	2.14	2.15
10	2.10	2.20	2.5	2.15	2.16
11	2.1	2.11	2.21	2.6	2.17
12	2.2	2.12	2.22	2.7	2.17
13	2.3	2.13	2.2	2.8	2.18
14	2.4	2.14	2.3	2.9	2.19
15	2.5	2.15	2.4	2.10	2.20
16	2.6	2.16	2.1	2.11	2.12
17	2.7	2.17	2.2	2.12	2.13
18	2.8	2.18	2.3	2.13	2.14
19	2.9	2.19	2.4	2.14	2.15
20	2.10	2.20	2.5	2.15	2.16

### Практическая работа № 3

## ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

### 3.1. Напряжённость электрического поля в вакууме

#### *Теоретический материал*

Электрический заряд. Сохранение заряда. Дискретность заряда. Закон Кулона. Понятие электростатического поля. Силовые линии (линии напряженности). Концепции близко- и дальнего действия. Принцип суперпозиции электростатических полей. Поток вектора напряженности. Теорема Гаусса для электростатического поля в вакууме и её связь с законом Кулона. Дифференциальная форма теоремы Гаусса. Применение теоремы Гаусса для расчета полей.

#### *Основные формулы и определения*

- Закон Кулона  $F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$ , где  $F$  – сила взаимодействия

двух точечных зарядов  $Q_1$  и  $Q_2$ ;  $r$  – расстояние между зарядами;

$\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды;  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – электрическая постоянная.

- Закон сохранения заряда  $\sum_{i=1}^n Q_i = \text{const}$ , где  $\sum_{i=1}^n Q_i$  – алгебраическая сумма зарядов, входящих в изолированную систему;  $n$  – число зарядов.

- Напряжённость электрического поля  $\vec{E} = \vec{F} / Q$ , где  $\vec{F}$  – сила, действующая на точечный положительный заряд  $Q$ , помещённый в данную точку поля.

- Теорема Остроградского – Гаусса. Поток вектора напряжённости  $\vec{E}$  через любую замкнутую поверхность, охватывающую заряды  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ ,  $\Phi_E = \frac{1}{\epsilon_0 \epsilon} \sum_{i=1}^n Q_i$ , где  $\sum_{i=1}^n Q_i$  – алгебраическая сумма зарядов, заключённых внутри замкнутой поверхности;  $n$  – число зарядов.

- Напряжённость электрического поля, создаваемого точечным зарядом  $Q$  на расстоянии  $r$  от заряда,  $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{\epsilon r^2}$ .

- Напряжённость электрического поля, создаваемого металлической сферой радиусом  $R$ , несущей заряд  $Q$ , на расстоянии  $r$  от центра сферы:

а) внутри сферы ( $r < R$ )  $E = 0$ ;

б) на поверхности сферы ( $r = R$ )  $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{\epsilon R^2}$ ;

в) вне сферы ( $r > R$ )  $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{\epsilon r^2}$ .

- Принцип суперпозиции (наложения) электрических полей, согласно которому напряжённость  $\vec{E}$  результирующего поля, созданного двумя (и более) точечными зарядами, равна векторной сумме напряжённостей складываемых полей  $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n$ .

- В случае двух электрических полей с напряжённостями  $\vec{E}_1$  и  $\vec{E}_2$  модуль вектора напряжённости  $E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cos \alpha}$ , где  $\alpha$  – угол между векторами  $\vec{E}_1$  и  $\vec{E}_2$ .

- Напряжённость поля, создаваемого бесконечно длинной равномерно заряженной нитью на расстоянии  $r$  от оси,  $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2\tau}{\epsilon r}$ , где  $\tau$  – линейная плотность заряда, которая определяется как величина, равная отношению заряда, распределённого по нити, к длине нити  $\tau = \frac{\Delta Q}{\Delta l_0}$ .
- Напряжённость поля, создаваемого бесконечной равномерно заряженной плоскостью,  $E = \frac{1}{2\epsilon_0} \frac{\sigma}{\epsilon}$ , где  $\sigma$  – поверхностная плотность заряда, равная отношению заряда, распределённого по поверхности, к площади этой поверхности  $\sigma = \frac{\Delta Q}{\Delta S}$ .
- Напряжённость поля, создаваемого двумя параллельными бесконечными равномерно и разноимённо заряженными плоскостями, с одинаковой по модулю поверхностной плотностью  $\sigma$  заряда (поле плоского конденсатора)  $E = \frac{\sigma}{\epsilon_0\epsilon}$ .

### **Вариант 3.1**

**Задание 1.** Сформулируйте закон Кулона.

**Задание 2.** Что такое напряжённость электрического поля?

**Задание 3.** Сформулируйте теорему Остроградского – Гаусса для электростатического поля в вакууме.

**Задание 4.** Приведите примеры применения теоремы Остроградского – Гаусса. Поясните их.

**Задание 5.** Изобразите качественно линии поля  $\vec{E}$ : а) точечного заряда; б) однородного электрического поля; в) диполя. Для случаев а) и б) изобразите также эквипотенциальные поверхности.

**Задание 6.** Одинаковые небольшие проводящие шарики, заряженные одноимёнными зарядами  $q_1 = 5$  мКл и  $q_2 = 20$  мКл, находятся на расстоянии  $L$  друг от друга ( $L$  много больше радиуса шариков). Шарики привели в соприкосновение и вновь развели на такое же расстояние. При этом сила взаимодействия между ними

- 1) уменьшилась в 4 раза; 2) уменьшилась в 1,56 раза;
- 3) не изменилась; 4) увеличилась в 1,56 раза.

**Задание 7.** Если на точечный заряд  $10^{-9}$  Кл, помещённый в некоторую точку поля, действует сила  $2 \cdot 10^{-8}$  Н, то модуль напряжённости электрического поля в этой точке равен

- 1) 10 В/м; 2) 200 В/м; 3) 150 В/м; 4) 20 В/м.

**Задание 8.** В двух вершинах при основании равнобедренного треугольника закреплены одинаковые положительные точечные заряды величиной  $4 \cdot 10^{-9}$  Кл. Углы при основании треугольника равны  $30^\circ$ , а длина его боковой стороны составляет 3 см. Чему равен модуль вектора напряжённости в третьей вершине треугольника?

- 1)  $10^4$  В/м; 2)  $2 \cdot 10^4$  В/м; 3)  $4 \cdot 10^4$  В/м; 4)  $6 \cdot 10^4$  В/м.

**Задание 9.** Металлический шар радиусом 20 см зарядили до потенциала 3 кВ. Величина заряда, помещённого на шаре, равна

- 1) 6,7 нКл; 2) 60 нКл; 3) 67 нКл; 4) 600 нКл.

**Задание 10.** На рис. 3.1 представлены графики зависимости напряжённости  $E(r)$  для различных распределений заряда. График зависимости  $E(r)$  для заряженной металлической сферы радиусом  $R$  показан на рисунке

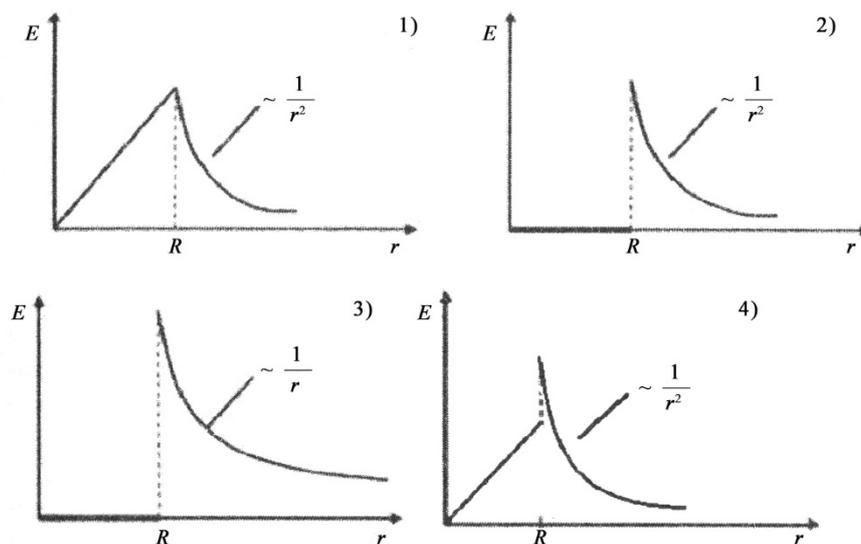


Рис. 3.1

- 1) 1; 2) 3; 3) 2; 4) 4.

### Вопросы для самоконтроля

1. В чём заключается закон сохранения заряда?
2. Как было определено значение элементарного заряда? Какое значение это имело для развития науки?

3. Какова единица измерения напряжённости поля в системе СИ?
4. В чём физический смысл напряжённости поля?
5. В чём заключается принцип суперпозиции электрических полей?
6. Напишите уравнение Пуассона.
7. Что такое электрическое смещение?

### 3.2. Диэлектрики в электрическом поле

#### *Теоретический материал*

Свободные и связанные заряды в веществе. Сторонние заряды. Полярные и неполярные молекулы. Типы диэлектриков. Ионная, электронная и ориентационная поляризация. Поляризуемость молекулы. Поляризованность (вектор поляризации). Однородная и неоднородная поляризации. Связь поляризованности с поверхностной плотностью поляризационного заряда. Диэлектрическая восприимчивость вещества и её зависимость от температуры. Теорема Гаусса для электрического поля в диэлектрике. Электрическое смещение (электрическая индукция) в диэлектрике. Диэлектрическая проницаемость среды. Вычисление напряжённости электрического поля в диэлектрике. Граничные условия для электрического поля на границе раздела «диэлектрик – диэлектрик». Сегнетоэлектрики.

#### *Основные формулы и определения*

- Поляризованность  $\vec{P}$  – это величина, характеризующая степень поляризации диэлектрика. Её физический смысл – дипольный момент единицы объёма  $\vec{P} = \frac{\sum \vec{p}_i}{\Delta V}$ , где  $\Delta V$  – бесконечно малый объём, заключающий точку, в которой определяется поляризованность;  $\sum \vec{p}_i$  – векторная сумма дипольных моментов молекул в этом объёме.

- Поляризованность  $\vec{P}$  связана с  $\vec{E}$  соотношением  $\vec{P} = \chi \epsilon_0 \vec{E}$ , где  $\chi$  – диэлектрическая восприимчивость вещества. Она является характеристикой самого вещества. Для полярных диэлектриков диэлектрическая восприимчивость обратно пропорциональна температуре  $\chi \sim 1/T$ .

- Теорема Гаусса для электрического поля в диэлектрике  $\int_S \vec{D} d\vec{S} = Q_{\text{своб}}$ . Поток вектора электрического смещения через замкнутую поверхность равен алгебраической сумме заключённых внутри этой

поверхности свободных зарядов. Вектор  $\vec{D}$  называется вектором электрического смещения и определяется  $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$ .

- Диэлектрическая проницаемость среды определяется как  $\epsilon = \chi + 1$ . Она показывает, во сколько раз поле в диэлектрике слабее, чем поле в вакууме.

- Тангенциальные составляющие вектора напряжённости электрического поля являются одинаковыми  $E_{1\tau} = E_{2\tau}$  по обе стороны границы раздела.

- Тангенциальная составляющая вектора электрического смещения на границе раздела диэлектриков испытывает скачок и изменяется прямо пропорционально диэлектрической проницаемости среды

$$\frac{D_{1\tau}}{D_{2\tau}} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}.$$

- Нормальные составляющие вектора электрического смещения являются одинаковыми по разные стороны границы раздела, не испытывая скачка  $D_{1n} = D_{2n}$ .

- Нормальная составляющая вектора напряжённости поля на границе раздела двух диэлектриков испытывает скачок и изменяется обратно пропорционально диэлектрической проницаемости среды

$$\frac{E_{1n}}{E_{2n}} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}.$$

### **Вариант 3.2**

**Задание 1.** Как определяется поляризованность вещества? Каков её физический смысл?

**Задание 2.** Сформулируйте теорему Гаусса для электрического поля в диэлектрике.

**Задание 3.** Какие виды поляризации вещества существуют?

**Задание 4.** Сформулируйте граничные условия для векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{D}$ .

**Задание 5.** Плоский воздушный конденсатор подключили к источнику напряжения, затем, не отключая его от источника, сдвинули пластины, уменьшив зазор в два раза. Как изменятся: а) энергия, запасённая конденсатором; б) заряд на обкладках конденсатора; в) плотность энергии поля в конденсаторе?

**Задание 6.** Площадь пластин плоского воздушного конденсатора равна  $S = 1,0 \text{ см}^2$ . Пробой воздуха в конденсаторе возникает при

напряжённости поля  $E = 3 \cdot 10^6$  В/м. Данному конденсатору может быть сообщен максимальный заряд, равный

- 1) 1,32 нКл; 2) 2,66 нКл; 3) 5,30 нКл; 4) 1,32 мкКл.

**Задание 7.** Площадь обкладок плоского воздушного конденсатора  $600 \text{ см}^2$ , расстояние между ними  $L = 3$  мм. Между обкладками параллельно им вдвигают пластинку из диэлектрика с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 7$  и толщиной  $d = 1,5$  мм. Определите ёмкость полученного конденсатора.

- 1) 3,14 пФ; 2) 100 пФ; 3) 310 пФ; 4) 730 пФ.

**Задание 8.** После того как конденсатор, заряженный до разности потенциалов  $U_1 = 500$  В, соединили параллельно с незаряженным конденсатором ёмкостью  $C_2 = 4$  мкФ, между обкладками конденсаторов установилась разность потенциалов  $U_2 = 100$  В. Ёмкость первого конденсатора равна

- 1) 1 мкФ; 2) 2 мкФ; 3) 4 мкФ; 4) 6 мкФ.

**Задание 9.** Диэлектрическая проницаемость воды равна 81. Как надо изменить каждый из двух одинаковых точечных положительных зарядов, чтобы при погружении в воду сила электрического взаимодействия зарядов при том же расстоянии между ними была такой же, как и в вакууме?

- 1) уменьшить в 9 раз; 2) увеличить в 9 раз;
- 3) уменьшить в 81 раз; 4) увеличить в 81 раз.

**Задание 10.** В масле на расстоянии  $l = 8$  см друг от друга находятся неподвижные точечные заряды  $q_1 = 6$  нКл и  $q_2 = -2$  нКл. Сила взаимодействия между зарядами  $5,4$  мкН. Диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$  масла равна

- 1) 2,5; 2) 2,9; 3) 3,1; 4) 3,2.

### ***Вопросы для самоконтроля***

1. В чём различие в поляризации полярных и неполярных диэлектриков?

2. Как влияет поляризация на поле в диэлектрике? Почему?

3. Каков физический смысл диэлектрической проницаемости вещества?

4. Как диэлектрическая проницаемость диэлектриков зависит от температуры?

5. В чём физический смысл электрического смещения?

6. Что такое свободные и связанные заряды? В чём их отличие?

7. Дайте определение сегнетоэлектрикам.

### 3.3. Постоянный электрический ток

#### *Теоретический материал*

Характеристики электрического тока: плотность тока, сила тока. Условие существования электрического тока. Сторонние силы. Разность потенциалов, напряжение, электродвижущая сила (ЭДС). ЭДС гальванического элемента. Классическая электронная теория электропроводности металлов. Законы Ома и Джоуля – Ленца в локальной форме. Закон Ома для неоднородного участка цепи. Правила Кирхгофа. Электрический ток в сплошной среде. Заземление линий электропередач. Квазистационарные токи. Разрядка и зарядка конденсатора. Недостаточность классической электронной теории электропроводности. Границы применимости закона Ома.

#### *Основные формулы и определения*

▪ Количественной характеристикой электрического тока служит сила тока – величина заряда, переносимого через рассматриваемую поверхность в единицу времени,  $I = \frac{dq}{dt}$ .

▪ Вектором плотности тока  $\vec{J} = \frac{dI}{dS_{\perp}}$  называется вектор, по направлению совпадающий с направлением скорости положительных зарядов, а по абсолютной величине равный отношению силы тока через элементарную площадку, расположенную в данной точке пространства перпендикулярно к направлению движения носителей, к её площади.

▪ Величина, равная отношению работы сторонних сил по перемещению заряда к величине этого заряда, называется электродвижущей силой  $\varepsilon = \frac{A_{\text{стор}}}{q}$ .

▪ Величина, численно равная отношению работы и электростатических и сторонних сил по перемещению заряда к величине этого заряда, называется падением напряжения, или просто напряжением, на данном участке цепи  $U_{12}$ . Таким образом,  $U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12}$ .  $U_{12} = IR$ , где полное сопротивление цепи, и тогда  $IR = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12}$ . Это уравнение выражает закон Ома для неоднородного участка цепи (с ЭДС). Он также называется обобщённым законом Ома.

▪ Закон Ома в локальной форме (параметры относятся к данной точке сечения проводника):  $\vec{J} = \sigma \vec{E}$ , где коэффициент пропорциональности  $\sigma = \frac{ne^2\lambda}{2mv}$  – проводимость.

▪ Закон Джоуля – Ленца в локальной форме  $W = \sigma E^2$ . Тепловая мощность, выделяющаяся в единице объёма при протекании электрического тока, пропорциональна квадрату напряжённости поля. Переходя от  $\sigma$  и  $E_{кр}$  и  $j$ , получим  $W = \rho j^2$  – объёмная плотность тепловой мощности равна произведению удельного сопротивления на квадрат плотности тока.

▪ Первое правило Кирхгофа: алгебраическая сумма сил токов, сходящихся в узле, равна нулю  $\sum I_k = 0$ .

▪ Второе правило Кирхгофа: алгебраическая сумма произведений сил токов в отдельных участках произвольного замкнутого контура на их сопротивления равна алгебраической сумме ЭДС, действующих в этом контуре,  $\sum I_k R_j = \sum \varepsilon_i$ .

### **Вариант 3.3**

**Задание 1.** Назовите характеристики электрического тока.

**Задание 2.** Сформулируйте закон Ома в локальной форме.

**Задание 3.** Сформулируйте закон Джоуля – Ленца в локальной форме.

**Задание 4.** Сформулируйте обобщённый закон Ома для участка цепи с ЭДС.

**Задание 5.** Какие затруднения имеются в классической теории металлов?

**Задание 6.** Сформулируйте правила Кирхгофа.

**Задание 7.** Через поперечное сечение контактного провода за 2 с проходит  $6 \cdot 10^{21}$  электронов, и в проводе протекает ток, равный

1) 133 А; 2) 480 А; 3) 48 А; 4) 600 А.

**Задание 8.** Какова плотность тока в обмотке возбуждения двигателя тепловоза, если площадь поперечного сечения провода равна  $110 \text{ мм}^2$ , а номинальная сила тока 770 А?

1)  $7 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$ ; 2)  $700 \text{ А/м}^2$ ; 3)  $7 \text{ А/м}^2$ ; 4)  $7 \cdot 10^3 \text{ А/м}^2$ .

**Задание 9.** Сила тока, протекающего через резистор, равна 2 А, при этом на нём за каждые 3 с выделяется количество теплоты  $Q = 24 \text{ Дж}$ . Сопротивление резистора равно

1) 1,3 Ом; 2) 2 Ом; 3) 4 Ом; 4) 36 Ом.

**Задание 10.** Сколько энергии израсходовала электрическая лампа накаливания за 5 мин при напряжении 220 В, если её сопротивление равно 440 Ом?

- 1) 150 Дж; 2) 150 кДж; 3) 33 Дж; 4) 33 кДж.

### ***Вопросы для самоконтроля***

1. Что называется электрическим током и каковы условия существования тока проводимости?
2. Дайте определение единице силы тока 1 А.
3. В чём физический смысл плотности тока? В каких единицах в системе СИ он измеряется?
4. Приведите примеры применения закона Джоуля – Ленца в технике.
5. Какова физическая природа сторонних сил?
6. Каков смысл ЭДС, напряжения и разности потенциалов?
7. Дайте определение единице напряжения 1 В.

## **3.4. Элементы физической электроники**

### ***Теоретический материал***

Электрический ток в вакууме. Электронная эмиссия. Работа выхода электронов из металла. Электрический ток в газе. Процессы ионизации и рекомбинации. Работа ионизации. Потенциал ионизации. Ударная ионизация. Несамостоятельный газовый разряд. Самостоятельный газовый разряд. Вольт-амперная характеристика газового разряда. Виды разрядов.

### ***Основные формулы и определения***

▪ Для ионизации атомов и молекул необходимо совершить работу против сил взаимодействия между электроном и остальными частицами атома (или молекулы). Эта работа называется работой ионизации  $A_i$ .

▪ Отношение работы ионизации  $A_i$  к заряду электрона называется потенциалом ионизации  $\phi_i = \frac{A_i}{e}$ .

▪ Подвижность ионов  $b = \frac{\langle v \rangle}{E}$ , где  $\langle v \rangle$  – средняя скорость упорядоченного движения ионов;  $E$  – напряжённость электрического поля.

### **Вариант 3.4**

**Задание 1.** Что такое работа и потенциал ионизации?

**Задание 2.** По какой формуле определяется концентрация электронов на электроде (катоде)?

**Задание 3.** Нарисуйте вольт-амперную характеристику разряда.

**Задание 4.** Какие виды разрядов вы знаете?

**Задание 5.** Что называется газовым разрядом?

**Задание 6.** Энергия ионизации атома водорода  $E_i = 2,18 \cdot 10^{-18}$  Дж. Определите потенциал ионизации  $U_i$  водорода.

1) 15,0 В; 2) 150 В; 3) 13,6 В.

**Задание 7.** Какой наименьшей скоростью  $V_{\min}$  должен обладать электрон, чтобы ионизировать атом азота, если потенциал ионизации  $U_i$  азота равен 14,5 В?

1)  $2,3 \cdot 10^6$  м/с; 2)  $5,3 \cdot 10^6$  м/с; 3)  $2,0 \cdot 10^5$  м/с.

**Задание 8.** Какова должна быть температура  $T$  атомарного водорода, чтобы средняя кинетическая энергия поступательного движения атомов была достаточна для ионизации путём соударений? Потенциал ионизации  $U_i$  атомарного водорода равен 13,6 В.

1) 150 кК; 2) 210 кК; 3) 136 кК.

**Задание 9.** Пространство между пластинами плоского конденсатора имеет объём  $V = 375$  см<sup>3</sup> и заполнено водородом, который частично ионизирован. Площадь пластин конденсатора  $S = 250$  см<sup>2</sup>. При каком напряжении  $U$  между пластинами конденсатора сила тока  $I$ , протекающего через конденсатор, достигает значения 2 мкА, если концентрация  $n$  ионов обоих знаков в газе равна  $5,3 \cdot 10^7$  см<sup>-3</sup>? Принять подвижность ионов  $b_+ = 5,4 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/(В·с),  $b_- = 7,4 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/(В·с).

1) 110 В; 2) 210 В; 3) 130 В.

**Задание 10.** Азот ионизируется рентгеновским излучением. Определить проводимость  $G$  азота, если в каждом кубическом сантиметре газа находится в условиях равновесия  $n_0 = 10^7$  пар ионов. Подвижность положительных ионов  $b_+ = 1,27$  см<sup>2</sup>/(В·с) и отрицательных  $b_- = 1,81$  см<sup>2</sup>/(В·с).

1) 1,5 нСм; 2) 2,1 нСм; 3) 0,5 нСм.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Как происходит ударная ионизация?
2. Как определяется коэффициент ионизации?
3. Как возникает дуговой разряд?
4. Что такое термоэлектронная эмиссия?
5. Как применяется дуговой разряд в технике?

### 3.5. Магнитное поле в вакууме

#### *Теоретический материал*

Закон Ампера. Магнитная индукция. Закон Био и Савара (закон Био – Савара – Лапласа). Понятие магнитного поля. Принцип суперпозиции магнитных полей. Сила Лоренца и сила Ампера. Магнитное поле прямолинейного и кругового токов. Циркуляция вектора магнитной индукции. Закон полного тока (теорема о циркуляции магнитного поля) в вакууме. Применение закона полного тока для расчета магнитных полей. Магнитное поле длинного соленоида и тороида. Определение единицы силы тока – ампера. Вихревое поле движущегося заряда. Инвариантность электрического заряда. Виток с током в магнитном поле. Магнитный момент. Потенциальная энергия витка с током во внешнем магнитном поле. Момент сил, действующий на рамку с током во внешнем магнитном поле.

#### *Основные формулы и определения*

- Закон Ампера: сила, действующая на элемент проводника длиной  $dl$  с током  $I$ , определяется как  $d\vec{F}_A = I [d\vec{l} \times \vec{B}]$ , где  $d\vec{l}$  – вектор элемента длины проводника, проведённого в направлении тока;  $\vec{B}$  – вектор магнитной индукции. Модуль силы  $dF = IdlB \sin \alpha$ , где  $\alpha$  – угол между направлением тока в проводнике и направлением индукции магнитного поля. Для прямолинейного проводника длиной  $l$  и током  $I$  в однородном магнитном поле  $B$   $F_A = IlB \sin \alpha$ .

- Сила, действующая на движущийся в магнитном поле заряд, называется магнитной силой Лоренца  $\vec{F}_L = q [\vec{v} \times \vec{B}]$ , где  $\vec{v}$  – скорость относительно системы координат, в которой измеряется сила  $\vec{F}_L$  и измерена индукция поля  $\vec{B}$ . Если кроме магнитного поля имеется электрическое поле напряжённостью  $\vec{E}$ ,  $\vec{F}_L = q\vec{E} + q [\vec{v} \times \vec{B}]$ . Сила Лоренца  $\vec{F}_L$  перпендикулярна  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ . В случае положительного заряда направление  $\vec{F}_L$  определяется правилом левой руки.

- Принцип суперпозиции (наложения): поле  $\vec{B}$ , порождаемое несколькими движущимися зарядами (токами), равно векторной сумме полей  $\vec{B}_i$ , порождаемых каждым зарядом (током) в отдельности  $\vec{B} = \sum \vec{B}_i$ .

▪ Соотношение, определяющее магнитную индукцию  $d\vec{B}$  поля, создаваемого элементом тока длины  $dl$  в точке, определяемой радиус-вектором  $\vec{r}$ , выражает закон Био – Савара – Лапласа  $d\vec{B} = \frac{\mu_0 I [d\vec{l} \times \vec{r}]}{4\pi r^3}$ , где  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м. Направление  $d\vec{B}$  всегда перпендикулярно плоскости, содержащей радиус-вектор  $\vec{r}$  и элемент тока  $I d\vec{l}$ . Направление вектора магнитной индукции определяется по правилу буравчика: если поступательное движение буравчика совпадает с направлением тока, то вращательное движение ручки буравчика даёт направление вектора магнитной индукции.

▪ Магнитное поле прямого тока  $B_A = \frac{\mu_0 I}{2\pi b}$ , где  $b$  – перпендикуляр от проводника с током до точки  $A$ .

▪ Магнитное поле кругового тока в центре витка  $B_0 = \frac{\mu_0 I}{2r}$ , где  $r$  – радиус витка.

▪ Закон полного тока  $\int_l \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \sum_k I_k$  – циркуляция вектора магнитной индукции вдоль произвольного замкнутого контура прямо пропорциональна алгебраической сумме токов, охватываемых этим контуром.

▪ Магнитное поле соленоида определится как  $B = \mu_0 n I$ , где  $n = N/l$  – число витков на единицу длины.

▪ Магнитное поле внутри тороида будет определяться как  $B = \frac{\mu_0 n I}{2\pi r}$ , где  $r$  – радиус контура.

▪ Магнитный момент контура с током  $\vec{p}_m = IS\vec{n}$ , где  $\vec{n}$  – единичный вектор нормали к плоскости контура;  $S$  – площадь контура с током  $I$ .

▪ Момент сил, действующий на рамку с током,  $\vec{M} = [\vec{p}_m \times \vec{B}]$ .

### **Вариант 3.5**

**Задание 1.** Запишите закон Ампера в векторной форме.

**Задание 2.** Дайте определение единице силы тока в системе СИ.

**Задание 3.** Сформулируйте закон Био – Савара – Лапласа.

**Задание 4.** Сформулируйте закон полного тока.

**Задание 5.** Что такое дипольный магнитный момент?

**Задание 6.** Линейный проводник длиной 20 см при силе тока в нём 5 А находится в однородном магнитном поле с индукцией 0,2 Тл. Если угол, образованный проводником с направлением вектора индукции, равен  $30^\circ$ , то на проводник действует сила, модуль которой равен  
1) 0,1 Н; 2) 10,0 Н; 3) 0,2 Н; 4) 20,0 Н.

**Задание 7.** Линии индукции однородного магнитного поля с индукцией 4 Тл пронизывают рамку под углом  $30^\circ$  к её плоскости, создавая магнитный поток, равный 1 Вб. Чему равна площадь рамки?

1)  $0,5 \text{ м}^2$ ; 2)  $1,0 \text{ м}^2$ ; 3)  $1,5 \text{ м}^2$ ; 4)  $2,0 \text{ м}^2$ .

**Задание 8.** Индуктивность рамки  $L = 40 \text{ мГн}$ . Если за время  $\tau = 1 \text{ мс}$  сила тока в рамке возросла на 20 мА, то модуль ЭДС самоиндукции равен

1) 100 мВ; 2) 200 мВ; 3) 600 мВ; 4) 800 мВ.

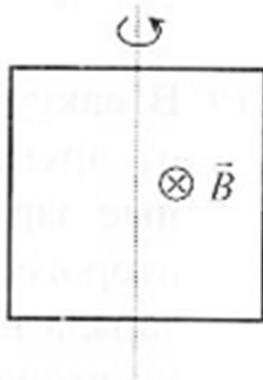


Рис. 3.2

**Задание 9.** Электрон движется по окружности радиусом  $r = 0,2 \text{ мм}$  в однородном магнитном поле  $B$  перпендикулярно линиям индукции поля. Если скорость электрона  $v = 2,2 \cdot 10^7 \text{ м/с}$ , то индукция магнитного поля  $B$  равна

1) 0,24 Тл; 2) 0,48 Тл; 3) 0,63 Тл; 4) 0,89 Тл.

**Задание 10.** Плоская квадратная рамка находится в однородном магнитном поле  $B = 0,4 \text{ Тл}$ . Сопротивление провода, из которого сделана рамка, равно  $R = 2 \text{ Ом}$ . Вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  перпендикулярен плоскости рамки. За  $t = 0,2 \text{ с}$  рамку повернули на  $45^\circ$  вокруг вертикальной оси (рис. 3.2), при этом по рамке протекал ток  $I = 4 \text{ мА}$ . Площадь рамки равна

1)  $95 \text{ см}^2$ ; 2)  $106 \text{ см}^2$ ; 3)  $124 \text{ см}^2$ ; 4)  $137 \text{ см}^2$ .

### Вопросы для самоконтроля

1. Где применяется закон Ампера?
2. Поясните закон Био – Савара – Лапласа с помощью рисунка.
3. В каких единицах в системе СИ измеряется магнитная индукция?
4. Как определяется магнитное поле тороида и соленоида?

### 3.6. Магнитное поле в веществе

#### *Теоретический материал*

Понятие магнитного момента атома. Микро- и макротоки. Молекулярные токи. Намагниченность (вектор намагничивания). Однородное и неоднородное намагничивание. Связь намагниченности с линейной плотностью поверхностного молекулярного тока. Магнитная восприимчивость вещества и её зависимость от температуры. Закон полного тока (теорема о циркуляции магнитного поля) в веществе. Напряжённость магнитного поля в веществе. Магнитная проницаемость среды. Индукция магнитного поля в веществе. Условия для магнитного поля на границе раздела двух сред. Типы магнетиков. Точка Кюри. Домены. Кривая намагничивания.

#### *Основные формулы и определения*

▪ Орбитальный магнитный момент электрона  $p_m = \frac{evr}{2}$ , где  $r$  – радиус орбиты электрона.

▪ Под воздействием магнитного поля всякое вещество способно приобретать магнитный момент (намагничиваться), т. е. является магнетиком. Степень намагничивания магнетика характеризуется магнитным моментом единицы объёма. Эту величину называют намагниченностью

$\vec{J} = \frac{\sum \vec{p}_m}{\Delta V}$ , где  $\vec{p}_m$  – магнитный момент отдельной молекулы (молекулярного тока). Суммирование производится по всем молекулам, заключённым в объёме  $\Delta V$  – физически бесконечно малом объёме в окрестности данной точки (но много больше объёма молекулы).

▪ Намагниченность можно определить через напряжённость магнитного поля  $\vec{J} = \chi \vec{H}$ , где  $\chi$  – магнитная восприимчивость, характерная для каждого данного магнетика.

▪ Закон полного тока для магнитного поля в веществе: циркуляция вектора напряжённости магнитного поля по некоторому замкнутому контуру равна алгебраической сумме макротоков, охватываемых этим контуром  $\oint_l \vec{H} d\vec{l} = I$ .

▪ Магнитная проницаемость вещества  $\mu = 1 + \chi$ , которая показывает, во сколько раз магнитная индукция поля, образованного намагничивающим током в данном веществе, отличается от индукции поля, образованного этим же током в вакууме. Тогда для среды будет  $\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}$ .

▪ Условия для магнитного поля на границе раздела двух сред. Нормальная составляющая вектора  $\vec{B}$  не испытывает скачок и одинакова по обе стороны раздела:  $B_{1n} = B_{2n}$ . Нормальная составляющая вектора  $\vec{H}$  при переходе границы раздела магнетиков испытывает скачок и изменяется обратно пропорционально магнитной проницаемости магнетиков  $\frac{H_{1n}}{H_{2n}} = \frac{\mu_2}{\mu_1}$ . Тангенциальная составляющая вектора  $\vec{H}$  не испытывает скачок и одинакова по обе стороны границы раздела  $H_{1\tau} = H_{2\tau}$ . Тангенциальная составляющая вектора  $\vec{B}$  при переходе границы раздела магнетиков испытывает скачок и изменяется прямо пропорционально магнитной проницаемости магнетиков.

▪ Типы магнетиков в зависимости от знака и величины магнитной восприимчивости подразделяются на три группы: а) диамагнетики  $\chi < 0$  ( $\mu < 1$ ),  $\chi \sim 10^{-6} \div 10^{-9}$ ; б) парамагнетики  $\chi > 0$  ( $\mu > 1$ ),  $\chi \sim 10^{-4} \div 10^{-6}$ ; в) ферромагнетики  $\chi \gg 0$  ( $\mu \gg 1$ ),  $\chi \sim 10^3 \div 10^5$ .

### Вариант 3.6

**Задание 1.** Как определяется намагниченность вещества? Каков её физический смысл?

**Задание 2.** Сформулируйте закон полного тока для магнитного поля в веществе.

**Задание 3.** Поясните закон Кюри – Вейсса.

**Задание 4.** Нарисуйте качественную зависимость  $\vec{B}$  от  $\vec{H}$  для ферромагнетиков.

**Задание 5.** Поясните физический смысл магнитной восприимчивости.

**Задание 6.** На рис. 3.3 представлены графики, отражающие характер зависимости величины намагниченности  $J$  вещества (по модулю) от напряжённости магнитного поля  $H$ . Укажите зависимость, соответствующую парамагнетикам:

1) 3; 2) 1; 3) 2.

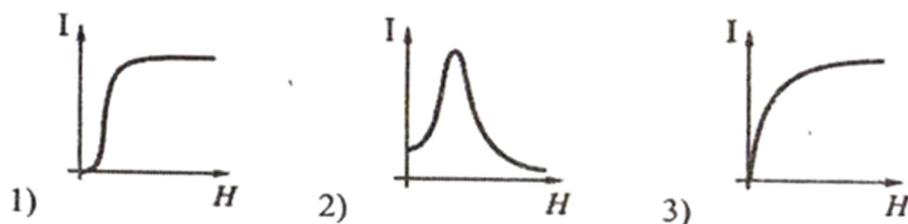


Рис. 3.3

**Задание 7.** Напишите уравнение Максвелла, которое показывает отсутствие магнитных зарядов.

**Задание 8.** Зависимость намагниченности ферромагнетика  $J$  от напряжённости внешнего поля  $H$  показана на графике рис. 3.4.

1) 3; 2) 1; 3) 2.

**Задание 9.** Физический смысл магнитной проницаемости  $\mu$ . Если магнетик заполняет всё пространство соленоида, то  $\mu$  показывает:

1) магнитный момент единицы объёма;

2) во сколько раз магнитная индукция поля в данном веществе, образованного намагничивающим током, отличается от индукции поля, образованного в вакууме;

3) намагниченность вещества;

4) степень намагничивания магнетика.

**Задание 10.** Электрон влетает в однородное магнитное поле с индукцией  $B = 1,26 \cdot 10^{-3}$  Тл перпендикулярно силовым линиям со скоростью  $V = 10^6$  м/с. Определите радиус окружности, по которой будет двигаться электрон.

1) 3 мм; 2) 1,5 мм; 3) 4,5 мм; 4) 4 мм.

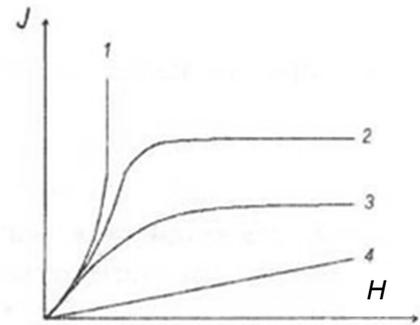


Рис. 3.4

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Чем обусловлен магнитный момент атома?

2. В чём физический смысл намагниченности?

3. Каков физический смысл магнитной проницаемости среды?

4. Чем различаются магнитные свойства диа- и парамагнетиков?

Каковы особенности магнитных свойств ферромагнетиков?

5. Что такое коэрцитивная сила?

6. Приведите примеры применения ферромагнетиков.

## **3.7. Электромагнитная индукция**

### **Теоретический материал**

Опыт Фарадея. Магнитный поток. ЭДС индукции. Основной закон электромагнитной индукции (закон Фарадея). Вывод основного закона электромагнитной индукции из закона сохранения энергии, а

также на основе электронной теории. Правило Ленца (закон Ленца). Явление самоиндукции. Индуктивность. Индуктивность длинного соленоида. Токи замыкания и размыкания цепи. Явление взаимной индукции. Взаимная индуктивность. Энергия магнитного поля. Объёмная плотность энергии магнитного поля.

### **Основные формулы и определения**

- Магнитный поток через замкнутую поверхность  $\Phi = \oint \vec{B} d\vec{S}$ .
- Основной закон электромагнитной индукции: ЭДС индукции в контуре равна скорости изменения магнитного потока, пронизывающего этот контур, взятый с обратным знаком  $\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}$ .
- Правило Ленца: индукционный ток всегда направлен так, чтобы противодействовать изменению магнитного потока, вызвавшего этот ток.
- ЭДС самоиндукции  $\varepsilon_s = -L\frac{dI}{dt}$ . Коэффициент пропорциональности  $L$  называется индуктивностью, или коэффициентом самоиндукции.
  - Индуктивность длинного соленоида определяется как  $L = \mu\mu_0 n^2 V$ , где  $n$  – число витков, приходящихся на единицу длины соленоида;  $V$  – объём соленоида.
  - Ток размыкания (экстраток размыкания) определяется по формуле  $I = I_0 e^{-\frac{R}{L}t}$ , где  $I_0$  – начальное значение тока; скорость убывания тока определяется отношением  $R/L$ .
  - Ток замыкания (экстраток замыкания) определяется как  $I = I_m (1 - e^{-\frac{R}{L}t})$ , где  $I_m = \varepsilon/R$ .
  - Энергия магнитного поля  $W = \frac{LI^2}{2}$ .
  - Объёмная плотность энергии магнитного поля  $w = \frac{W}{V} = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2}$ , где  $H$  – напряжённость магнитного поля.

### Вариант 3.7

**Задание 1.** В каких единицах измеряется в системе СИ магнитный поток?

**Задание 2.** Сформулируйте закон электромагнитной индукции Фарадея и запишите его.

**Задание 3.** От каких параметров зависит индуктивность контура?

**Задание 4.** Напишите выражение для магнитной энергии тока и объёмной плотности энергии магнитного поля.

**Задание 5.** Число витков катушки уменьшили в два раза, но сохранили её геометрические размеры и ток в обмотке. Как при этом изменятся а) индуктивность катушки; б) энергия магнитного поля катушки; в) средняя плотность энергии магнитного поля внутри катушки?

**Задание 6.** Индуктивность рамки равна  $L = 40$  мГн. Если за время  $\tau = 1$  мс сила тока в рамке возросла на 20 мА, то модуль ЭДС самоиндукции в рамке равен

- 1) 100 мВ; 2) 800 мВ; 3) 200 мВ; 4) 20 мВ.

**Задание 7.** В катушке с индуктивностью  $L = 2,5$  Гн при протекании тока силой  $I_0$  запасена энергия  $E = 5$  Дж. Тогда при линейном увеличении силы тока в катушке в четыре раза за  $t = 3$  с величина ЭДС самоиндукции, возникающая в катушке, будет равна

- 1) 1 В; 2) 2 В; 3) 4 В; 4) 5 В.

**Задание 8.** Магнитный поток через контур с сопротивлением, равным  $R = 4$  Ом, меняется так, как показано на рис. 3.5. В момент времени  $t = 4$  с индукционный ток в контуре равен

- 1) 0,25 А; 2) 0,50 А; 3) 1,25 А; 4) 4,00 А.

**Задание 9.** При изменении силы тока по закону  $I = (1 - 0,5 t)$  А в катушке возбуждается ЭДС самоиндукции  $2 \cdot 10^{-3}$  В. Индуктивность катушки  $L$  равна

- 1) 2 мГн; 2) 5 мГн; 3) 12 мГн; 4) 4 мГн.

**Задание 10.** Соленоид намотан «виток к витку» тонким проводом в один слой, он имеет 1200 витков, длину 25 см и площадь сечения  $13$  см<sup>2</sup>. Поверх этого соленоида вплотную намотан второй точно такой же. Найдите их взаимную индуктивность.

- 1) 8,7 мГн; 2) 9,4 мГн; 3) 11 мГн; 4) 16 мГн.

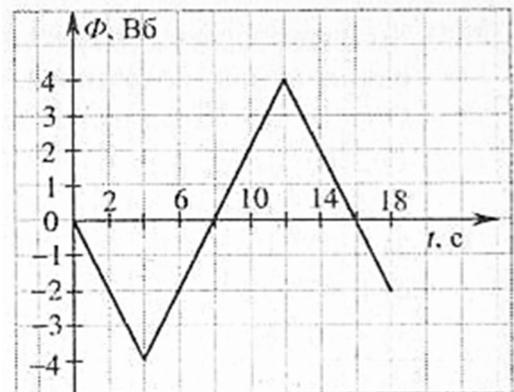


Рис. 3.5

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Что такое магнитный поток? Как он определяется?
2. Приведите примеры закона электромагнитной индукции Фарадея.
3. Что выражает правило Ленца?
4. Какое явление называется самоиндукцией? Взаимоиндукцией?
5. В чём физический смысл индуктивности контура?
6. Какую роль играет индуктивность для токов размыкания и замыкания?
7. Приведите примеры применения экстратоков замыкания и размыкания в технике.
8. Каковы сферы применения магнитной энергии?

### **Задачи для самостоятельного решения**

3.1. Два шарика массой  $m = 1$  г каждый подвешены на нитях, верхние концы которых соединены вместе. Длина каждой нити  $l = 10$  см. Какие одинаковые заряды надо сообщить шарикам, чтобы нити разошлись на угол  $\alpha = 60^\circ$ ?

3.2. Расстояние между шариками  $Q_1 = 100$  нКл и  $Q_2 = -50$  нКл равно  $d = 10$  см. Вычислите силу  $F$ , действующую на заряд  $Q_3 = 1$  мкКл, отстоящую на  $r_1 = 12$  см от заряда  $Q_1$  и на  $r_2 = 10$  см от заряда  $Q_2$ .

3.3. Тонкий длинный стержень равномерно заряжен с линейной плотностью  $\tau = 1,5$  нКл / см. На продолжении оси стержня на расстоянии  $d = 12$  см от его конца находится точечный заряд  $Q = 0,2$  мКл. Определите силу взаимодействия заряженного стержня и точечного заряда.

3.4. Длинная прямая тонкая проволока несёт равномерно распределённый заряд. Вычислите линейную плотность  $\tau$  заряда, если напряжённость поля на расстоянии  $r = 0,5$  м от проволоки против её середины  $E = 2$  В/см.

3.5. С какой силой, приходящейся на единицу площади, отталкиваются две одноимённо заряженные бесконечно протяжённые плоскости с одинаковой поверхностной плотностью заряда  $\sigma = 2$  мкКл/м<sup>2</sup>?

3.6. Какую ускоряющую разность потенциалов  $U$  должен пройти электрон, чтобы получить скорость  $v = 8$  Мм/с<sup>2</sup>?

3.7. Заряд равномерно распределён по бесконечной плоскости с поверхностной плотностью  $\sigma = 10$  нКл/м<sup>2</sup>. Определите разность потенциалов двух точек поля, одна из которых находится на плоскости, а другая удалена от неё на расстояние  $a = 10$  см.

3.8. В установке Токомак Т-10 мощность в импульсе электрического разряда  $3 \cdot 10^5$  кВт, продолжительность импульса 1 с. Какой ёмкостью должна обладать батарея конденсаторов при напряжении 20 кВ, используемая в качестве накопителя энергии?

3.9. Оцените среднюю скорость упорядоченного движения электронов  $\langle u \rangle$  в проводнике с концентрацией электронов  $n = 10^{29} \text{ м}^{-3}$  при плотности тока  $j = 100 \text{ А/см}$ . Сравните эту скорость со средней скоростью теплового движения  $\langle v \rangle$  электронов при комнатной температуре, считая, что распределение электронов по скоростям является максвелловским.

3.10. К батарее с ЭДС  $\varepsilon = 300 \text{ В}$  подключены два плоских конденсатора ёмкостями  $C_1 = 2 \text{ пФ}$  и  $C_2 = 3 \text{ пФ}$ . Определите заряд  $Q$  и напряжение  $U$  на пластинках конденсаторов при последовательном и параллельном соединениях.

3.11. На концах медного провода длиной  $l = 5 \text{ м}$  поддерживается напряжение  $U = 1 \text{ В}$ . Определите плотность тока  $j$  в проводе.

3.12. Резистор сопротивлением  $R_1 = 5 \text{ Ом}$ , вольтметр и источник тока соединены параллельно. Вольтметр показывает напряжение  $U_1 = 10 \text{ В}$ . Если заменить резистор другим с сопротивлением  $R_2 = 12 \text{ Ом}$ , то вольтметр покажет напряжение  $U_2 = 12 \text{ В}$ . Определите ЭДС и внутреннее сопротивление источника тока. Током через вольтметр пренебречь.

3.13. Определите электрический заряд, прошедший через поперечное сечение провода сопротивлением  $R = 3 \text{ Ом}$  при равномерном нарастании напряжения на концах провода от  $U_1 = 2 \text{ В}$  до  $U_2 = 4 \text{ В}$  в течение  $t = 20 \text{ с}$ .

3.14. Рассчитайте силу тока в цепи, состоящей из двух элементов с ЭДС  $\varepsilon_1 = 1,6 \text{ В}$  и  $\varepsilon_2 = 1,2 \text{ В}$  и внутренними сопротивлениями  $R_1 = 0,6 \text{ Ом}$  и  $R_2 = 0,4 \text{ Ом}$ , соединённых одноимёнными полюсами.

3.15. Гальванический элемент даёт на внешнее сопротивление  $R_1 = 0,5 \text{ Ом}$  и силу тока  $I_1 = 0,2 \text{ А}$ . Если внешнее сопротивление заменить на  $R_2 = 0,5 \text{ Ом}$ , то элемент даёт силу тока  $I_2 = 0,15 \text{ А}$ . Определите силу тока короткого замыкания.

3.16. К источнику тока с ЭДС  $\varepsilon = 12 \text{ В}$  присоединена нагрузка. Напряжение  $U$  на клеммах источника стало при этом равным 8 В. Найдите КПД источника тока.

3.17. Внешняя цепь источника тока потребляет мощность  $P = 0,75 \text{ Вт}$ . Определите силу тока в цепи, если ЭДС источника тока  $\varepsilon = 2 \text{ В}$  и внутреннее сопротивление  $r = 1 \text{ Ом}$ .

3.18. Какая наибольшая полезная мощность  $P_{\max}$  может быть получена от источника тока с ЭДС  $\varepsilon = 12$  В и внутренним сопротивлением  $r = 1$  Ом?

3.19. При выключении источника тока сила тока в цепи убывает по закону  $I = I_0 e^{-\alpha t}$  ( $I_0 = 10$  А,  $\alpha = 5 \cdot 10^2$  с<sup>-1</sup>). Определите количество теплоты, которое выделится в резисторе сопротивлением  $R = 5$  Ом после выключения источника тока.

3.20. По двум длинным параллельным проводам текут в одинаковом направлении токи  $I_1 = 10$  А и  $I_2 = 15$  А. Расстояние между проводами  $A = 10$  см. Определите напряжённость  $H$  магнитного поля в точке, удалённой от первого провода на  $r_1 = 8$  см и от второго на  $r_2 = 6$  см.

3.21. По двум параллельным проводам текут в противоположных направлениях токи  $I_1 = 10$  А и  $I_2 = 15$  А. Расстояние между проводами  $A = 10$  см. Определите напряжённость  $H$  магнитного поля в точке, удалённой от первого провода на  $r_1 = 15$  см и от второго на  $r_2 = 10$  см.

3.22. По тонкому проводнику, изогнутому в виде правильного шестиугольника со стороной  $a = 10$  см, идёт ток  $I = 20$  А. Определите магнитную индукцию  $B$  в центре шестиугольника.

3.23. Обмотка соленоида содержит два слоя плотно прилегающих друг к другу витков провода диаметром  $d = 0,2$  мм. Определите магнитную индукцию  $B$  на оси соленоида, если по проводнику идёт ток  $I = 0,5$  А.

3.24. В однородном магнитном поле с индукцией  $B = 0,01$  Тл помещён прямой проводник длиной  $l = 20$  см (подводящие провода находятся вне поля). Определите силу  $F$ , действующую на проводник, если по нему течёт ток  $I = 50$  А, а угол  $\varphi$  между направлением тока и вектором магнитной индукции равен  $30^\circ$ .

3.25. Рамка с током  $I = 5$  А содержит  $N = 20$  витков тонкого провода. Определите магнитный момент  $p_m$  рамки с током, если её площадь  $S = 10$  см<sup>2</sup>.

3.26. По витку радиусом  $R = 10$  см течёт ток  $I = 50$  А. Виток помещён в однородное магнитное поле ( $B = 0,2$  Тл). Определите момент силы  $M$ , действующей на виток, если плоскость витка составляет угол  $\varphi = 60^\circ$  с линиями индукции.

3.27. Протон влетел в магнитное поле перпендикулярно линиям индукции и описал дугу радиусом  $R = 10$  см. Определите скорость  $v$  протона, если магнитная индукция  $B = 1$  Тл.

3.28. Определите частоту  $n$  обращения электрона по круговой орбите в магнитном поле ( $B = 1$  Тл).

3.29. Электрон в однородном магнитном поле движется по винтовой линии радиусом  $R = 5$  см и шагом  $h = 20$  см. Определите скорость  $v$  электрона, если магнитная индуктивность  $B = 0,1$  мТл.

3.30. Кольцо радиусом  $R = 10$  см находится в однородном магнитном поле ( $B = 0,318$  Тл). Плоскость кольца составляет с линиями индукции угол  $\varphi = 30^\circ$ . Вычислите магнитный поток  $\Phi$ , пронизывающий кольцо.

3.31. По проводнику, согнутому в виде квадрата со стороной  $a = 10$  см, течёт ток  $I = 20$  А. Плоскость квадрата перпендикулярна магнитным силовым линиям поля. Определите работу, которую необходимо совершить для того, чтобы удалить проводник за пределы поля. Магнитная индукция  $B = 0,1$  Тл. Поле считать однородным.

3.32. Проводник длиной  $l = 1$  м движется со скоростью  $v = 5$  м/с перпендикулярно линиям индукции однородного магнитного поля. Определите магнитную индукцию  $B$ , если на концах проводника возникает разность потенциалов  $U = 0,02$  В.

3.33. Рамка площадью  $S = 50$  см<sup>2</sup>, содержащая  $N = 100$  витков, равномерно вращается в однородном магнитном поле ( $B = 40$  мТл). Найдите максимальную ЭДС индукции  $\varepsilon_{\max}$ , если ось вращения лежит в плоскости рамки и перпендикулярна линиям индукции, а рамка вращается с частотой  $n = 960$  об/мин.

3.34. Кольцо из проволоки сопротивлением  $R = 1$  мОм находится в однородном магнитном поле ( $B = 0,4$  Тл). Плоскость кольца составляет с линиями индукции угол  $\varphi = 90^\circ$ . Определите заряд  $Q$ , который протечёт по кольцу, если его выдернуть из поля. Площадь кольца  $S = 10$  см<sup>2</sup>.

3.35. Соленоид содержит  $N = 4000$  витков провода, по которому течёт ток  $I = 20$  А. Вычислите магнитный поток  $\Phi$  и потокосцепление  $\Psi$ , если индуктивность  $L = 0,4$  Гн.

3.36. На ленточный каркас длиной  $l = 50$  см и площадью сечения  $S = 4$  см<sup>2</sup> намотан в один слой провод диаметром  $d = 0,2$  мм так, что витки плотно прилегают друг к другу (толщиной изоляции пренебречь). Определить индуктивность  $L$  получившегося соленоида.

3.37. Рассчитайте силу тока в цепи через  $t = 0,01$  с после её замыкания. Сопротивление цепи  $R = 20$  Ом и индуктивность  $L = 0,1$  Гн. Сила тока до размыкания цепи  $I_0 = 50$  А.

3.38. По обмотке соленоида индуктивностью  $L = 0,2$  Гн течёт ток  $I = 10$  А. Определите энергию  $W$  магнитного поля соленоида.

### Контрольное задание № 3

#### *Таблица вариантов задач по разделу «Электричество и магнетизм»*

Вариант	Номер задачи				
1	3.1	3.11	3.21	3.31	3.33
2	3.2	3.12	3.22	3.32	3.34
3	3.3	3.13	3.23	3.33	3.35
4	3.4	3.14	3.24	3.34	3.36
5	3.5	3.15	3.25	3.35	3.37
6	3.6	3.16	3.26	3.36	3.38
7	3.7	3.17	3.27	3.37	3.1
8	3.8	3.18	3.28	3.38	3.2
9	3.9	3.19	3.29	3.1	3.3
10	3.10	3.20	3.30	3.2	3.4
11	3.1	3.11	3.21	3.31	3.33
12	3.2	3.12	3.22	3.32	3.34
13	3.3	3.13	3.23	3.33	3.35
14	3.4	3.14	3.24	3.34	3.36
15	3.5	3.15	3.25	3.35	3.37
16	3.6	3.16	3.26	3.36	3.38
17	3.7	3.17	3.27	3.37	3.1
18	3.8	3.18	3.28	3.38	3.2
19	3.9	3.19	3.29	3.1	3.3
20	3.10	3.20	3.30	3.2	3.4

## Практическая работа № 4

### КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

#### 4.1. Механические колебания

##### *Теоретический материал*

Свободные (собственные) и вынужденные колебания. Дифференциальное уравнение гармонических колебаний и его решение. Характеристики гармонических колебаний. Понятие о гармоническом осцилляторе. Энергия гармонических колебаний. Сложение одинаково направленных (скалярных) гармонических колебаний. Метод векторной диаграммы. Биения. Сложение взаимно перпендикулярных (векторных) гармонических колебаний. Фигуры Лиссажу. Дифференциальное уравнение затухающих колебаний и его решение. Аперiodический процесс. Частота и коэффициент затухания. Логарифмический декремент затухания и добротность колебательной системы. Изохронность колебаний. Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний и его решение. Амплитуда и фаза при вынужденных механических колебаниях. Механический резонанс. Резонансные кривые. Соотношение между фазами вынуждающей силы и скорости при механическом резонансе.

##### *Основные формулы и определения*

▪ Уравнение гармонических колебаний  $x = A \cos(\omega t + \varphi)$ , где  $x$  – смещение колеблющейся точки от положения равновесия;  $t$  – время;  $A$ ,  $\omega$ ,  $\varphi$  – соответственно амплитуда, угловая частота, начальная фаза колебаний;  $(\omega t + \varphi)$  – фаза колебаний в момент времени  $t$ .

▪ Угловая частота колебаний  $\omega = 2\pi\nu$  или  $\omega = 2\pi/T$ , где  $\nu$  и  $T$  частота и период колебаний.

▪ Дифференциальное уравнение гармонических колебаний  $\frac{d^2x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0$ , где  $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$  – собственная частота колебаний груза. Решение дифференциального уравнения для свободных колебаний  $x = a \cos(\omega_0 t + \alpha)$ , где  $a$  – амплитуда. Амплитуда  $a$  – наибольшее отклонение от положения равновесия. Фаза колебаний  $\varphi$  – изменяющийся

аргумент функции, описывающей колебательный процесс ( $\omega_0 t + \alpha$ ). Фаза характеризует значение изменяющейся величины в данный момент времени. Значение  $\varphi$  в момент времени  $t = 0$  называется начальной фазой  $\alpha$ .

- Энергия гармонических колебаний  $E = K + U = \frac{ma^2\omega_0^2}{2}$ .

- Амплитуда  $A$  результирующего колебания, полученного при сложении двух колебаний с одинаковыми частотами, происходящих в одном направлении, определяется по формуле  $A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\phi_2 - \phi_1)$ , где  $A_1$  и  $A_2$  – амплитуды составляющих колебаний;  $\phi_1$  и  $\phi_2$  – их начальные фазы.

- Начальная фаза  $\varphi$  результирующего колебания может быть найдена из формулы  $\operatorname{tg}\varphi = \frac{A_1 \sin \phi_1 + A_2 \sin \phi_2}{A_1 \cos \phi_1 + A_2 \cos \phi_2}$ .

- Если два складываемых гармонических колебания одинакового направления мало отличаются по частоте, то возникают пульсации амплитуды, которые называются биениями. Промежуток времени между соседними моментами времени, когда амплитуда максимальна, называется периодом биений  $T_6$ . Он определяется  $T_6 = \frac{2\pi}{\Delta\omega}$ .

- Сложение взаимно перпендикулярных колебаний

$$\begin{cases} x = a \cos \omega t \\ y = b \cos(\omega t + \alpha) \end{cases}'$$

где  $\alpha$  – разность фаз обоих колебаний.  $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{2xy}{ab} \cos \alpha = \sin^2 \alpha$ .

- Дифференциальное уравнение затухающих колебаний имеет вид  $\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0$ , где  $\omega_0^2$  – частота, с которой совершались бы свободные колебания системы в отсутствие сопротивления среды (собственная частота колебания системы);  $\beta = \frac{r}{2m}$  – коэффициент затухания ( $r$  – коэффициент сопротивления, т. е. коэффициент пропорциональности между скоростью и силой сопротивления).

- Решение уравнения затухающих колебаний имеет вид  $x = a_0 e^{-\beta t} \cos(\omega_3 t + \alpha)$ , где частота затухающих колебаний определится как  $\omega_3 = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ .

- Логарифмический декремент колебаний  $\theta = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)} = \frac{1}{N_e}$ .

- Добротность пропорциональна числу колебаний  $N_e$ , совершаемых системой за то время  $\tau$ , за которое амплитуда уменьшается в  $e$  раз,  $Q = \pi/\theta = \pi N_e$ .

- Вынужденные механические колебания поддерживаются внешней вынуждающей силой, изменяющейся по закону  $F_{\text{вын}} = F_0 \cos \omega t$ , где  $\omega$  – частота вынуждающей силы. Дифференциальное уравнение

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = \frac{F_0}{m} \cos \omega t.$$

- Амплитуда вынужденных колебаний пропорциональна амплитуде вынуждающей силы. Для колебательной системы (определённых  $\omega_0$  и  $\beta$ ) амплитуда зависит от частоты вынуждающей силы. Вынужденные колебания отстают по фазе от вынуждающей силы, причём величина отставания также зависит от частоты вынуждающей силы.

- При некоторой определённой для данной системы частоте амплитуда колебаний достигает максимального значения. Это явление называется резонансом, а соответствующая частота – резонансной частотой.

Максимум амплитуды определяется как  $a(\omega) = \frac{F_0 / m}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}}$ .

Проведя преобразования, получим  $\omega_{\text{рез}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}$ . При  $\omega \rightarrow 0$  все кривые приходят к одному и тому же значению  $a(0) = \frac{F_0}{m \omega_0^2}$ . При  $\omega \rightarrow \infty$  следует  $a \rightarrow 0$ . Чем меньше коэффициент затухания  $\beta$ , тем острее максимум.

### **Вариант 4.1**

**Задание 1.** Дайте определение следующих характеристик гармонического колебания: амплитуды, фазы, начальной фазы, периода, частоты, циклической частоты.

**Задание 2.** Как происходит сложение гармонических колебаний?

**Задание 3.** Напишите дифференциальное уравнение гармонических колебаний.

**Задание 4.** Напишите дифференциальное уравнение, описывающее затухающие колебания, и его решение.

**Задание 5.** В чём физический смысл логарифмического декремента затухания и добротности колебательной системы?

**Задание 6.** Напишите дифференциальное уравнение, описывающее вынужденные колебания, и его решение.

**Задание 7.** Движение тела вдоль оси  $OX$  в системе СИ описывается уравнением  $x(t) = 0,4\cos(0,5t + 1,5\pi)$ . Через какой промежуток времени  $t = 0$  с тело оказывается в точке с координатой  $x = -0,4$  м?

- 1)  $-0,4$  м; 2)  $0,8$  м; 3)  $0$  м; 4)  $4$  м.

**Задание 8.** Материальная точка совершает гармонические колебания по закону  $x = 0,45\cos(3/2\pi t + \pi/8)$ . Максимальное значение ускорения точки равно

- 1)  $2\pi/3$  м/с<sup>2</sup>; 2)  $0,6\pi$  м/с<sup>2</sup>; 3)  $0,2\pi^2$  м/с<sup>2</sup>; 4)  $4\pi^2$  м/с<sup>2</sup>.

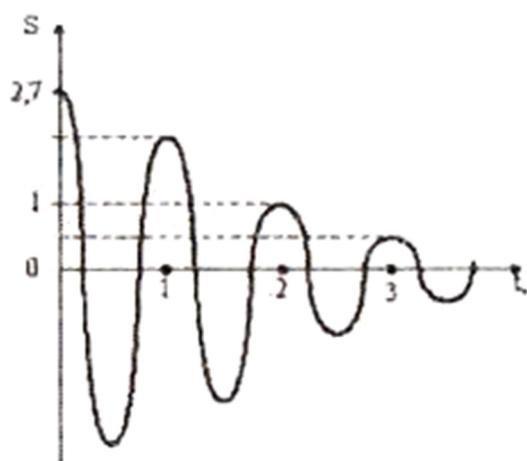


Рис. 4.1

**Задание 9.** На рис. 4.1 изображён график затухающих колебаний, где  $S$  – колеблющаяся величина, описываемая уравнением  $x(t) = A_0 \cdot e^{-\beta t} \times \sin(\omega_1 t + \varphi)$ . Определите коэффициент затухания  $\beta$ .

- 1)  $0,5$ ; 2)  $2,8$ ; 3)  $1$ ; 4)  $2$ .

**Задание 10.** Уравнение движения пружинного маятника  $\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{m}x = 0$  является дифференциальным уравнением:

- 1) вынужденных колебаний; 2) свободных незатухающих колебаний; 3) свободных затухающих колебаний; 4) автоколебаний.

### Вопросы для самоконтроля

1. Какие колебания называются гармоническими?
2. Как образуются биения?
3. Как изменяются со временем кинетическая и потенциальная энергии гармонического колебания?
4. Что такое затухающие колебания? Приведите примеры.
5. Что такое собственные колебания? Приведите примеры.
6. Что такое резонанс? Приведите примеры.

## 4.2. Механические волны

### *Теоретический материал*

Механизм образования механических волн в упругой среде. Продольные и поперечные волны. Волновое уравнение и его решение. Гармонические волны и их характеристики. Ударные волны. Принцип суперпозиции волн и граница его применимости. Фазовая скорость и дисперсия волн. Волновой пакет и групповая скорость. Понятие о когерентности. Интерференция волн. Стоячие волны. Энергия и поток энергии упругой волны. Вектор Умова. Эффект Доплера для звуковых волн. Ультразвук.

### *Основные формулы и определения*

▪ Уравнение, позволяющее определить смещение  $\zeta(x, t)$  любой точки среды с координатой  $x$  в любой момент времени  $t$ , называется волновым. Для плоской волны, т. е. распространяющейся в направлении оси  $X$ , имеем  $\zeta(x, t) = a \cos \omega(t - \frac{x}{v})$ , где  $\zeta(x, t)$  – смещение точек среды через время  $t$ , за которое волна распространяется на расстояние  $x = vt$  ( $v$  – скорость распространения волны).

▪ Уравнение волны является решением дифференциального уравнения, называемого волновым уравнением 
$$\frac{d^2\zeta}{dx^2} + \frac{d^2\zeta}{dy^2} + \frac{d^2\zeta}{dz^2} = \frac{1}{v^2} \frac{d^2\zeta}{dt^2}.$$

▪ Скорость  $v$  распространения волны есть скорость перемещения фазы, т. е. фазовая скорость  $v = \omega/k$ . Дисперсия – это зависимость фазовой скорости гармонической волны от её частоты  $\omega$ .

▪ Суперпозиция волн, мало отличающихся друг от друга по частоте, называется волновым пакетом (или группой волн). Скорость перемещения огибающей пакета называют групповой скоростью  $u$ . Она

определится как  $u = \frac{d\omega}{dk}$ . Групповая скорость связана с фазовой следующим образом:  $u = v - \lambda \frac{dv}{d\lambda}$ . При отсутствии дисперсии  $\frac{dv}{d\lambda} = 0$  групповая скорость совпадает с фазовой.

▪ Когерентностью называется согласованное протекание нескольких колебательных или волновых процессов. Для двух волн одинаковой частоты  $x_1 = A_1 \cos(\omega t + \alpha_1)$ ,  $x_2 = A_2 \cos(\omega t + \alpha_2)$ . Амплитуда

результатирующего колебания определится как  $A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \delta$ , где  $\delta = \alpha_2 - \alpha_1$ . Если разность фаз  $\delta$ , возбуждаемых волнами колебаний, остаётся постоянной во времени, то волны называются когерентными. При сложении когерентных волн возникает явление интерференции, заключающееся в том, что колебания в одних точках усиливают, а в других ослабляют друг друга.

- При наложении двух встречных плоских волн одинаковой частоты с одинаковой амплитудой возникает колебательный процесс, называемый стоячей волной. Стоячие волны возникают при отражении от преград. Точки, где амплитуда достигает максимального значения  $x_{\text{пуч}} = \pm n \frac{\lambda}{2}$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ), называются пучностями. Точки, где амплитуда обращается в нуль, называются узлами  $x_{\text{узел}} = \pm (n + \frac{1}{2}) \frac{\lambda}{2}$ . В стоячей волне отсутствует перенос энергии.

- Эффект Доплера – изменение частоты колебаний, воспринимаемой наблюдателем при движении источника колебания и наблюдателя относительно друг друга,  $\nu = \frac{\nu_{\text{зв}} + u_{\text{пр}}}{\nu_{\text{зв}} - u_{\text{ист}}} \nu_0$ , где  $\nu$  – частота звука, воспринимаемого движущимся прибором;  $\nu_{\text{зв}}$  – скорость звука в среде;  $u_{\text{пр}}$  – скорость прибора относительно среды;  $u_{\text{ист}}$  – скорость источника звука относительно среды;  $\nu_0$  – частота звука, испускаемого источником.

### **Вариант 4.2**

**Задание 1.** Какие волны называют продольными, какие поперечными? Приведите примеры.

**Задание 2.** Какие волны называют гармоническими? Охарактеризуйте следующие параметры гармонической волны: амплитуда, длина волны, частота.

**Задание 3.** Что такое фазовая скорость? Как фазовая скорость связана с циклической частотой и волновым числом?

**Задание 4.** Что называется волновым пакетом и групповой скоростью?

**Задание 5.** Что такое звук и каковы его характеристики?

**Задание 6.** Если в упругой среде распространяется волна со скоростью 6 м/с и периодом колебаний 0,5 с, то минимальное расстояние

между двумя точками среды, которые колеблются в одинаковых фазах, равно

- 1) 6,0 м; 2) 1,5 м; 3) 3,0 м; 4) 4,0 м.

**Задание 7.** Уравнение плоской синусоидальной волны, распространяющейся вдоль оси  $OX$ , имеет вид  $\xi = 0,02 \sin 10^3 (t - (x/500))$ .

Длина волны равна

- 1) 100 м; 2) 1,5 м; 3) 3,14 м; 4) 4,0 м.

**Задание 8.** На рис. 4.2 представлен профиль поперечной упругой бегущей волны. Согласно графику значение волнового числа равно

- 1)  $0,628 \text{ м}^{-1}$ ; 2)  $0,314 \text{ м}^{-1}$ ;  
3)  $1,156 \text{ м}^{-1}$ ; 4)  $2,512 \text{ м}^{-1}$ .

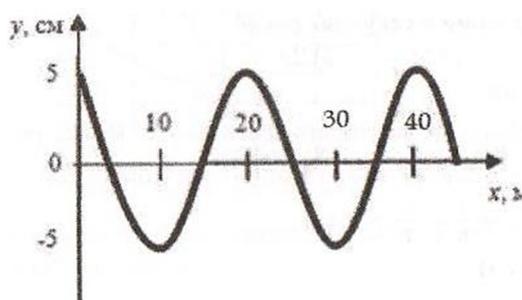


Рис. 4.2

**Задание 9.** Если увеличить в 2 раза амплитуду волны и при этом уве-

личить в 4 раза скорость распространения волны (например, при переходе из одной среды в другую), то плотность потока энергии увеличится

- 1) в 6 раз; 2) 5 раз; 3) 2 раза; 4) 16 раз.

**Задание 10.** Рыболов заметил, что при прохождении волны поплавок за 10 с совершает 20 колебаний, а расстояние между соседними гребнями волны равно 1,2 м. С какой скоростью распространяется волна по поверхности воды?

- 1) 2,4 м/с; 2) 0,6 м/с; 3) 1,2 м/с; 4) 1,6 м/с.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Какое применение находит понятие волнового пакета?
2. Что такое когерентность? Какие волны называют когерентными?
3. Приведите примеры применения когерентных волн.
4. В чём заключается эффект Доплера?
5. Что изучает акустика?

### 4.3. Электромагнитные колебания

#### *Теоретический материал*

Дифференциальное уравнение колебаний в колебательном контуре и его решение. Дифференциальное уравнение затухающих электромагнитных колебаний и его решение. Частота и коэффициент затухания электромагнитного колебания. Логарифмический декремент затухания и добротность контура. Дифференциальное уравнение вынужденных электромагнитных колебаний и его решение. Амплитуда и фаза при вынужденных электромагнитных колебаниях. Резонанс в колебательном контуре. Резонансные кривые для напряжения и силы тока. Переменный ток.

#### *Основные формулы и определения*

▪ Дифференциальное уравнение гармонических незатухающих колебаний  $\frac{d^2q}{dt^2} + \omega_0^2 q = 0$ , решение которого  $q = q_m \cos(\omega_0 t + \alpha)$ . Здесь

$q$  – заряд на конденсаторе;  $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$ .

▪ Дифференциальное уравнение затухающих электромагнитных колебаний запишется в виде  $\frac{d^2q}{dt^2} + 2\beta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = 0$ . Здесь  $\beta = \frac{R}{2L}$  – коэф-

фициент затухания;  $\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$  – собственная частота контура. Его реше-

ние имеет вид  $q = q_{m0} e^{-\beta t} \cos(\omega t + \alpha)$ , где  $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}$  – частота затухающих электромагнитных колебаний;  $q_{m0} e^{-\beta t}$  – амплитуда затухающих колебаний;  $\alpha$  – начальная фаза.

▪ Логарифмический декремент затухания определяется как натуральный логарифм отношения двух значений амплитуд, взятых че-

рез период  $\lambda = \ln \frac{U(t)}{U(t+T)} = \frac{\pi R}{L\omega}$ .

▪ Добротность колебательного контура пропорциональна числу колебаний, за которое амплитуда уменьшается в  $e$  раз:  $Q = \frac{\pi}{\lambda}$ .

▪ Дифференциальное уравнение вынужденных электромагнитных колебаний имеет вид  $\frac{d^2q}{dt^2} + 2\beta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = \frac{U_m}{L} \cos \omega t$ . Частное решение этого уравнения имеет вид  $q = q_m \cos(\omega t - \psi)$ , где  $q_m$  – амплитуда заряда на конденсаторе;  $\psi$  – разность фаз между колебаниями заряда и внешним напряжением  $U$ .

▪ Амплитуда силы тока  $I_m = \omega q_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}$ .

▪ Тангенс угла сдвига по фазе между током и приложенным напряжением определится как  $\text{tg } \phi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$ .

▪ Резонанс в случае электромагнитных колебаний – это возбуждение сильных колебаний при частоте внешнего напряжения, равной или близкой к собственной частоте этого колебательного контура. Резонансная частота на ёмкости определится как  $\omega_{\text{Срез}} = \omega_0 \sqrt{1 - 2(\beta / \omega_0)^2}$ . Резонансная частота на индуктивности  $\omega_{\text{Lрез}} = \omega_0 / \sqrt{1 - 2(\beta / \omega_0)^2}$ . Чем меньше  $\beta$ , тем ближе резонансные частоты к  $\omega_0$ .

▪ Переменный ток – это вынужденные электромагнитные колебания в цепи, содержащей резистор, индуктивность и ёмкость. Полное сопротивление, или импеданс, можно определить в колебательном контуре, содержащем ёмкость, индуктивность и сопротивление,

$z = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}$ . Здесь составляющие этого выражения

$x = \omega L - \frac{1}{\omega C}$  – реактивное сопротивление;  $x_L = \omega L$  – индуктивное со-

противление;  $x_C = \frac{1}{\omega C}$  – ёмкостное сопротивление;  $R$  – активное со-

противление.

### **Вариант 4.3**

**Задание 1.** Какие характеристики имеют электромагнитные колебания?

**Задание 2.** Напишите дифференциальное уравнение гармонических незатухающих колебаний в контуре Томсона.

**Задание 3.** Как определяется полная энергия электромагнитных колебаний?

**Задание 4.** Что является аналогом индуктивности и электрического сопротивления в механике?

**Задание 5.** Напишите дифференциальное уравнение затухающих электромагнитных колебаний.

**Задание 6.** Колебательный контур с конденсатором ёмкостью 1 мкФ настроен на частоту 400 Гц. Когда параллельно первому конденсатору подключили второй конденсатор, резонансная частота стала равной 100 Гц. Какова ёмкость второго конденсатора? Сопротивлением контура пренебречь.

1) 16 мкФ; 2) 5 мкФ; 3) 10 мкФ; 4) 15 мкФ.

**Задание 7.** Колебательный контур, состоящий из катушки индуктивности и конденсатора, настроен на длину волны  $\lambda = 14$  м. Зная, что максимальный ток в цепи  $I = 0,02$  А, определите максимальный заряд конденсатора.

1)  $1,5 \cdot 10^{-10}$  Кл; 2)  $2,1 \cdot 10^{-10}$  Кл; 3)  $3,8 \cdot 10^{-10}$  Кл; 4)  $4,2 \cdot 10^{-10}$  Кл.

**Задание 8.** Уменьшение амплитуды колебаний в системе с затуханием характеризуется временем релаксации. Если при неизменной индуктивности катушки в колебательном контуре уменьшить в 2 раза омическое сопротивление, то время релаксации

1) уменьшится в 2 раза; 2) увеличится в 4 раза;  
3) увеличится в 2 раза; 4) уменьшится в 4 раза.

**Задание 9.** Индуктивность колебательного контура радиоприёмника равна  $L = 4 \cdot 10^{-7}$  Гн. Максимальная сила тока в контуре  $I_{\max} = 2,4 \cdot 10^{-3}$  А. При этом максимальная разность потенциалов на конденсаторе контура составляет  $U_{\max} = 6 \cdot 10^{-3}$  В. Радиоприёмник настроен на длину волны

1) 301 м; 2) 401 м; 3) 501 м; 4) 601 м.

**Задание 10.** В колебательном контуре, состоящем из катушки индуктивности  $L = 10$  Гн, конденсатора  $C = 10$  мкФ и сопротивления  $R = 10$  Ом, время релаксации в секундах равно

1) 8 с; 2) 4 с; 3) 5 с; 4) 2 с.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Приведите пример формирования свободных гармонических колебаний.
2. Какие характеристики затухающих колебаний вы знаете? Каков их смысл?
3. Приведите пример возникновения вынужденных электромагнитных колебаний.
4. В чём отличие резонансной частоты от частоты собственных колебаний?
5. Как определяется резонансная частота?
6. Нарисуйте резонансные кривые для силы тока и напряжения. В чём их отличие?
7. Приведите примеры применения вынужденных колебаний.

### **4.4. Электромагнитные волны. Уравнения Максвелла**

#### ***Теоретический материал***

Фарадеевская и максвелловская трактовки явления электромагнитной индукции. Ток смещения. Электромагнитное поле. Система уравнений Максвелла. Волновое уравнение для электромагнитного поля и его решение. Скорость распространения электромагнитных волн в средах. Основные свойства электромагнитных волн. Энергия и поток энергии электромагнитных волн. Вектор Умова – Пойнтинга. Импульс электромагнитного поля. Излучение диполя. Диаграмма направленности. Эффект Доплера для электромагнитных волн. Шкала электромагнитных волн.

#### ***Основные формулы и определения***

- Ток смещения определится как  $I_{\text{смещ}} = \int_S \vec{j} d\vec{S} = \frac{\partial}{\partial t} \int_S \vec{D} d\vec{S}$ , где  $\vec{D} = \epsilon\epsilon_0 \vec{E}$  – электрическое смещение;  $\vec{j} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$  – плотность тока смещения.
- Плотность полного тока, равного сумме токов проводимости и смещения,  $\vec{j}_{\text{полн}} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ .

- Система уравнений Максвелла в дифференциальной форме:

1.  $rot\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}$  – индукционный ток обусловлен возникающим в

проводе электрическим полем.

2.  $div\vec{B} = 0$  – силовые линии магнитного поля не имеют источника, т. е. не существует «магнитных зарядов».

3.  $rot\vec{H} = \vec{j}_{np} + \frac{\partial\vec{D}}{\partial t}$  – магнитное поле может создаваться не только

токами проводимости, но и переменным электрическим полем.

4.  $div\vec{D} = \rho$  – источниками силовых линий электрического поля являются электрические заряды.

- Волновые уравнения электромагнитного поля:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial t^2}, \end{cases} \text{ где } v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu\epsilon_0\mu_0}} \text{ – скорость распространения элек-}$$

тромагнитной волны.

- Решения волновых уравнений:  $\begin{cases} E_y = E_m \sin(\omega t - kx), \\ H_z = H_m \sin(\omega t - kx). \end{cases}$

- Плотность потока электромагнитной энергии, распространяющейся вместе с волной, – это количество энергии, проходящей за единицу времени через единицу площади воображаемой площадки, расположенной перпендикулярно распространению волны,  $\vec{S} = [\vec{E} \times \vec{H}]$ .

Вектор  $\vec{S}$  называется вектором Умова – Пойнтинга.

- Источником электромагнитных волн является электрический диполь, электрический момент которого изменяется во времени по гармоническому закону  $\vec{p} = \vec{p}_m \cos \omega t$ , где  $\vec{p}_m$  – амплитуда вектора  $\vec{p}$ .

Интенсивность излучения диполя в волновой зоне  $I \sim \sin^2 \vartheta / r^2$ . Диполь сильнее всего излучает в направлениях, перпендикулярных его оси, где  $\vartheta = \pi / 2$ . Вдоль своей оси ( $\vartheta = 0$  и  $\vartheta = \pi$ ) диполь не излучает.

#### **Вариант 4.4**

**Задание 1.** Напишите систему уравнений Максвелла в дифференциальной форме.

**Задание 2.** В чём состоит физический смысл каждого уравнения Максвелла?

**Задание 3.** Напишите волновые уравнения для электромагнитного поля и их решения.

**Задание 4.** Перечислите основные свойства электромагнитных волн.

**Задание 5.** Что называется вектором Умова – Пойнтинга? Каков его физический смысл?

**Задание 6.** Индуктивность колебательного контура радиоприёмника  $L = 2 \cdot 10^{-7}$  Гн. Максимальная сила тока в контуре равна  $I_{\max} = 1,9 \cdot 10^{-3}$  А. При этом максимальная разность потенциалов на конденсаторе контура составляет  $U_{\max} = 5 \cdot 10^{-3}$  В. Радиоприёмник настроен на частоту

1) 1,1 МГц; 2) 1,9 МГц; 3) 2,1 МГц; 4) 3,9 МГц.

**Задание 7.** На какую длину волны настроен колебательный контур, состоящий из катушки индуктивности и конденсатора, если максимальный ток в цепи  $I = 0,3$  А, а максимальный заряд на конденсаторе  $Q = 2 \cdot 10^{-8}$  Кл?

1) 41,2 м; 2) 92,3 м; 3) 125,6 м; 4) 135,4 м.

**Задание 8.** Если в электромагнитной волне, распространяющейся в среде с показателем преломления  $n = 2$ , значения напряжённостей электрического и магнитного полей соответственно равны  $E = 750$  В/м,  $H = 1$  А/м, то объёмная плотность энергии составляет

1) 125 мкДж/м<sup>3</sup>; 2) 50 мкДж/м<sup>3</sup>; 3) 5 мкДж/м<sup>3</sup>; 4) 55 мкДж/м<sup>3</sup>.

**Задание 9.** Период колебаний в колебательном контуре равен  $T_1 = 4 \cdot 10^{-5}$  с. Чтобы период увеличить на  $\Delta T = 4 \cdot 10^{-5}$  с, ёмкость конденсатора из колебательного контура необходимо

1) уменьшить в 4 раза; 2) уменьшить в 2 раза;  
3) увеличить в 2 раза; 4) увеличить в 4 раза.

**Задание 10.** При уменьшении ёмкости конденсатора из колебательного контура в четыре раза период колебаний в контуре

1) уменьшается в 4 раза; 2) уменьшается в 2 раза;  
3) увеличивается в 2 раза; 4) увеличивается в 4 раза.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. В чём заключается максвелловская трактовка явления электромагнитной индукции?
2. В чём отличие тока смещения от тока проводимости?
3. При каких условиях скорость распространения электромагнитных волн совпадает со скоростью света в вакууме?
4. Куда направлен вектор потока плотности электромагнитной энергии?
5. Что такое электрический диполь?
6. Приведите примеры использования электрического диполя.
7. Какие существуют диапазоны волн?

### **Задачи для самостоятельного решения**

4.1. Точка совершает гармонические колебания. В некоторый момент времени смещение точки  $x = 5$  см, скорость её  $V = 20$  см/с и ускорение  $W = -80$  см/с<sup>2</sup>. Найдите циклическую частоту и период колебаний, фазу колебаний в рассматриваемый момент и амплитуду колебаний.

4.2. Точка совершает гармонические колебания, уравнение которых имеет вид  $x = A \sin \omega t$ , где  $A = 5$  см,  $\omega = 2$  с<sup>-1</sup>. Найдите момент времени (ближайший к началу отсчёта), в который потенциальная энергия точки  $10^{-4}$  Дж, а возвращающая сила  $F = +5 \cdot 10^{-3}$  Н. Определите также фазу колебаний в этот момент времени.

4.3. Два гармонических колебания, направленных по одной прямой, имеющих одинаковые амплитуды и периоды, складываются в одно колебание той же амплитуды. Найдите разность фаз складываемых колебаний.

4.4. Два маятника начинают одновременно совершать колебания. За время первых 15 колебаний первого маятника второй совершил только 10 колебаний. Определите отношение длин маятников.

4.5. В какой машине меньше трясёт – в пустой или нагруженной? Почему?

4.6. Почему у камертона две ножки?

4.7. Точка совершает одновременно два гармонических колебания, происходящих по взаимно перпендикулярным направлениям и выражаемых уравнениями  $x = A_1 \sin \omega_1 t$ ,  $y = A_2 \sin \omega_2(t + \tau)$ , где  $A_1 = 4$  см,  $\omega_1 = \pi \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $A_2 = 8$  см,  $\omega_2 = \pi \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $\tau = 1$  с. Напишите уравнение траектории и начертите её с соблюдением масштаба.

4.8. Поперечная волна распространяется вдоль упругого шнура со скоростью  $V = 15$  м/с. Период колебаний точек шнура  $T = 1,2$  с. Определите разность фаз  $\Delta\varphi$  колебаний двух точек, лежащих на луче и отстоящих от источника волн на расстояниях  $x_1 = 20$  м,  $x_2 = 30$  м.

4.9. Зависимость от времени  $t$  координаты  $q$  гармонического осциллятора имеет вид  $x = A\sin(\omega_0 t + \alpha)$ . Выразите через  $A$  и  $\alpha$  начальные (в момент времени  $t = 0$ ) значения координаты  $x_0$  и скорости  $\dot{x}_0$ .

4.10. Энергия одномерного гармонического осциллятора имеет вид  $E = m\dot{x}^2/2 + kx^2/2$ , где  $m$  – масса;  $k$  – коэффициент квазиупругой силы. Найдите амплитуду колебаний  $x_m$  и амплитуду скорости  $\dot{x}_m$ .

4.11. Зависимость координаты  $x$  от времени  $t$  некоторой системы с одной степенью свободы имеет вид  $x = a_0 \exp(-\beta t) \cos(\omega t + \alpha)$ , где  $a_0$ ,  $\beta$ ,  $\omega$ ,  $\alpha$  – константы. Какое движение совершает эта система? Перечислите его основные параметры.

4.12. Катушка индуктивностью  $30$  мкГн присоединена к плоскому конденсатору с площадью пластин  $0,01$  м<sup>2</sup> и расстоянием между ними  $0,1$  мм. Найдите диэлектрическую проницаемость среды, заполняющей пространство между пластинами, если контур настроен на частоту  $400$  кГц?

4.13. Колебательный контур состоит из катушки индуктивностью  $4$  Гн и конденсатора ёмкостью  $1$  мкФ. Амплитуда колебаний заряда на обкладках конденсатора равна  $100$  мкм. Напишите уравнение зависимости  $q(t)$ ,  $i(t)$  и  $U(t)$ .

4.14. Напряжение на обкладках конденсатора ёмкостью  $1$  мкФ меняется по закону  $U = 100\cos 500t$  (В). Найдите: а) максимальное значение напряжения на конденсаторе; б) период, частоту и циклическую частоту колебаний в контуре; в) максимальный заряд конденсатора; г) индуктивность контура; д) максимальную силу тока в контуре.

4.15. На конденсаторе, включённом в колебательный контур, максимальное напряжение  $100$  В. Ёмкость конденсатора  $10$  пФ. Определите максимальные значения электрической и магнитной энергий в контуре.

4.16. Конденсатор ёмкостью  $10$  мкФ зарядили до напряжения  $400$  В и подключили к катушке. После этого возникли затухающие электрические колебания. Какое количество теплоты выделится в контуре за время, в течение которого амплитуда колебаний уменьшится вдвое?

4.17. В колебательном контуре индуктивность катушки 0,2 Гн. Амплитуда силы тока 40 мА. Найдите энергию магнитного поля катушки и энергию электрического поля конденсатора в тот момент, когда мгновенное значение силы тока в 2 раза меньше амплитудного. Сопротивлением контура пренебречь.

4.18. После того как конденсатору колебательного контура был сообщён заряд  $10^{-6}$  Кл, в контуре произошли затухающие колебания. Какое количество теплоты выделится в контуре к тому моменту времени, когда колебания полностью затухнут? Ёмкость конденсатора равна 0,01 мкФ.

4.19. Контур состоит из катушки индуктивностью 28 мкГн, резистора сопротивлением 1 Ом и конденсатора ёмкостью 2222 пФ. Какую мощность должен потреблять контур, чтобы в нём поддерживались незатухающие колебания, при которых максимальное напряжение на конденсаторе равно 5 В?

4.20. В сеть переменного тока напряжением 120 В последовательно включены проводник с активным сопротивлением 15 Ом и катушка индуктивностью 50 мГн. Найдите частоту тока, если амплитуда тока в сети равна 7 А.

4.21. Катушка индуктивностью 45 мГн и активным сопротивлением 10 Ом включена в сеть переменного тока с частотой 50 Гц. Напряжение в сети 220 В. Определите силу тока в катушке и сдвиг фаз между силой тока и напряжением.

### Контрольное задание № 4

#### *Таблица вариантов задач по разделу «Колебания и волны»*

Вариант	Номер задачи				
1	4.1	4.11	4.21	4.10	4.20
2	4.2	4.12	4.1	4.11	4.21
3	4.3	4.13	4.2	4.12	4.1
4	4.4	4.14	4.3	4.13	4.2
5	4.5	4.15	4.4	4.14	4.3
6	4.6	4.16	4.5	4.15	4.4
7	4.7	4.17	4.6	4.16	4.5
8	4.8	4.18	4.7	4.17	4.6

Окончание таблицы

Вариант	Номер задачи				
	9	4.9	4.19	4.8	4.18
10	4.10	4.20	4.9	4.19	4.8
11	4.1	4.11	4.21	4.10	4.20
12	4.2	4.12	4.1	4.11	4.21
13	4.3	4.13	4.2	4.12	4.1
14	4.4	4.14	4.3	4.13	4.2
15	4.5	4.15	4.4	4.14	4.3
16	4.6	4.16	4.5	4.15	4.4
17	4.7	4.17	4.6	4.16	4.5
18	4.8	4.18	4.7	4.17	4.6
19	4.9	4.19	4.8	4.18	4.7
20	4.10	4.20	4.9	4.19	4.8

## Практическая работа № 5

### ОПТИКА

#### 5.1. Распространение света через границу двух сред

##### *Теоретический материал*

Электромагнитная природа света. Принцип Гюйгенса. Абсолютный и относительный показатели преломления. Закон отражения и преломления. Полное внутреннее отражение. Световоды. Геометрическая оптика как предельный случай волновой оптики. Оптические инструменты.

##### *Основные формулы и определения*

▪ Отношение скорости световой волны в вакууме  $c$  к фазовой скорости  $v$  в некоторой среде называется абсолютным показателем преломления этой среды  $n = \frac{c}{v}$  или при  $\epsilon = 1$  и  $\mu = 1$  получим  $n = \sqrt{\epsilon\mu}$ .

▪ Отношение абсолютных показателей преломления второй среды к первой называется относительным показателем преломления второй среды относительно первой  $\frac{n_2}{n_1} = n_{21}$ .

▪ Закон отражения света: угол отражения равен углу падения, и отражённый луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и нормалью.

▪ Закон преломления света: преломленный луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и нормалью, восстановленной в точке падения, отношение синуса падения к синусу преломления есть величина постоянная для данных веществ и равная отношению показателя преломления второй среды к показателю преломления первой среды

$$\frac{\sin \theta_{\text{пад}}}{\sin \theta_{\text{пр}}} = \frac{n_2}{n_1}.$$

▪ Предельный угол полного отражения определяется как  $\theta_{\text{пред}} = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$ .

▪ Геометрическая оптика как предельный случай волновой оптики. При выполнении соотношения  $\frac{D^2}{\lambda l} \gg 1$ , где  $D$  – диаметр диафрагмы (отверстия);  $\lambda$  – длина световой волны;  $l$  – расстояние от освещаемого объекта до экрана.

### ***Вариант 5.1***

**Задание 1.** Поясните физический смысл законов отражения и преломления.

**Задание 2.** В чём состоит принцип Гюйгенса?

**Задание 3.** Как определяется абсолютный показатель преломления?

**Задание 4.** Как определяется относительный показатель преломления?

**Задание 5.** В чём отличие абсолютного и относительного показателей преломления?

**Задание 6.** Световой луч распространяется в среде с показателем преломления  $n = 1,7$ . Если известно, что в среде он прошёл путь на  $\Delta L = 15$  см меньше, чем в вакууме, то время распространения луча  $t$  равно  
1) 0,7 нс; 2) 1,2 нс; 3) 1,5 нс; 4) 2,5 нс.

**Задание 7.** Луч света падает на зеркало перпендикулярно к его поверхности. Если зеркало повернуть на  $10^\circ$ , то угол между падающим и отражёнными лучами будет

1)  $0^\circ$ ; 2)  $5^\circ$ ; 3)  $10^\circ$ ; 4)  $20^\circ$ .

**Задание 8.** Под каким углом из вакуума должен падать световой луч на поверхность вещества с показателем преломления, равным 1,73, чтобы угол преломления был в 2 раза меньше угла падения?

1)  $30^\circ$ ; 2)  $60^\circ$ ; 3)  $45^\circ$ ; 4)  $90^\circ$ .

**Задание 9.** Предельный угол полного внутреннего отражения светового луча на границе раздела двух сред – жидкости и воздуха – равен  $30^\circ$ . Луч идёт из жидкости в воздух, при этом угол падения луча  $\alpha = 20^\circ$ . Если  $\nu_{\text{ж}}$  – частота и  $\lambda_{\text{ж}}$  – длина световой волны в жидкости, то  $\nu_{\text{в}}$  – частота и  $\lambda_{\text{в}}$  – длина световой волны в воздухе соответственно равны

1)  $\nu_{\text{в}} = \nu_{\text{ж}}$  и  $\lambda_{\text{в}} = 2,0 \lambda_{\text{ж}}$ ; 2)  $\nu_{\text{в}} = \nu_{\text{ж}}$  и  $\lambda_{\text{в}} = 0,5 \lambda_{\text{ж}}$ ;

3)  $\nu_{\text{в}} = \nu_{\text{ж}}$  и  $\lambda_{\text{в}} = 0,87 \lambda_{\text{ж}}$ ; 4)  $\nu_{\text{в}} = 2,0 \nu_{\text{ж}}$  и  $\lambda_{\text{в}} = 0,5 \lambda_{\text{ж}}$ .

**Задание 10.** Угол падения пучка параллельных лучей на поверхность воды  $\alpha = 60^\circ$ . Ширина пучка в воздухе  $d = 10$  см. Определите ширину пучка в воде. Абсолютный показатель преломления воды  $n = 1,3$ .

1) 7,2 см; 2) 7,7 см; 3) 11 см; 4) 15 см.

### ***Вопросы для самоконтроля***

1. Как формулируется принцип Гюйгенса?
2. Каков физический принцип работы световода?
3. Поясните границы применимости геометрической оптики.

## **5.2. Интерференция света**

### ***Теоретический материал***

Монохроматические и немонахроматические волны. Понятие о разложении Фурье. Принцип суперпозиции и интенсивность при сложении световых волн. Когерентность световых волн. Время и длина когерентности. Оптическая длина пути. Оптическая разность хода. Расчет интерференционной картины от двух когерентных источников. Полосы равной толщины и равного наклона. Многолучевая интерференция. Способы получения когерентных лучей. Интерферометры.

### ***Основные формулы и определения***

Интерференция света – пространственное перераспределение энергии светового излучения при наложении когерентных световых волн. Когерентностью называется согласованное протекание двух или нескольких колебательных процессов. Время, за которое разность фаз

компонент световой волны с верхней и нижней частотой составит порядка  $\pi$ , и будет временем когерентности  $t_{\text{ког}} \approx \frac{1}{\Delta\nu}$  или  $t_{\text{ког}} \approx \frac{\lambda^2}{c\Delta\lambda}$ , где  $\Delta\lambda$  – ширина интервала длин интерферирующих волн. Чем меньше интервал  $\Delta\lambda$ , тем больше время когерентности.

- Расстояние, на которое перемещается волна за время когерентности, называется длиной когерентности  $l_{\text{ког}} \approx ct_{\text{ког}}$  или  $l_{\text{ког}} \approx \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}$ .

- Оптическая длина пути определяется как произведение геометрической длины пути  $l$  световой волны в среде на абсолютный показатель преломления  $n$ :  $L = nl$ .

Оптической разностью хода называется величина, определяемая как  $\Delta = L_2 - L_1 = n_2l_2 - n_1l_1$ .

- Если на оптической разности хода укладывается чётное число полуволен  $2m \frac{\lambda}{2}$  (целое число длин волн  $m\lambda$ ), т. е.  $\Delta = m\lambda$ , то колебания усилят друг друга (условие максимума).

- Если же на длине  $\Delta$  укладывается нечётное число полуволен  $\Delta = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}$  ( $m = 0, 1, 2, \dots$ ), то колебания будут происходить в противофазе. Поэтому световые волны максимально ослабят друг друга (условие минимума).

### **Вариант 5.2**

**Задание 1.** Что такое когерентность световых волн?

**Задание 2.** Как определяются время и длина когерентности?

**Задание 3.** В чем различие оптического пути и оптической разности хода?

**Задание 4.** Как определяется радиус когерентности?

**Задание 5.** Как получить полосы равной толщины и равного наклона?

**Задание 6.** При наблюдении интерференции фиолетового цвета в опыте Юнга расстояние между соседними тёмными полосами на экране равно 2 мм. Если источник фиолетового света заменить источником красного света, длина волны которого в 2 раза больше, то это расстояние станет равным

1) 1,3 мм; 2) 7,7 мм; 3) 2,5 мм; 4) 4,0 мм.

**Задание 7.** Интерференцией света называется явление:

- 1) наложения когерентных волн и перераспределения их энергии в пространстве;
- 2) рассеяния света неоднородностями среды;
- 3) отклонения света от прямолинейного распространения;
- 4) разложения белого света в спектр.

**Задание 8.** Появление цветных радужных пятен на поверхности воды, покрытой тонкой бензиновой или масляной плёнкой, является следствием явления:

- 1) дифракции света;
- 2) дисперсии света;
- 3) интерференции света;
- 4) поляризации света.

**Задание 9.** Когерентными называются волны (или колебания):

- 1) с одинаковой длиной волны;
- 2) с одинаковой разностью хода и разной частотой;
- 3) дающие устойчивую интерференционную картину при их наложении;
- 4) у которых разность хода больше радиуса когерентности.

**Задание 10.** Радиус когерентности протяжённого монохроматического источника света размером  $l$  (на расстоянии  $L$  от источника):

- 1)  $\approx \lambda/L$ ;
- 2)  $\approx \lambda L/l$ ;
- 3)  $\approx l/L$ ;
- 4)  $\approx L/l$ .

### ***Вопросы для самоконтроля***

1. В чём заключается разложение Фурье?
2. Что такое когерентность?
3. В чём состоит временная когерентность? Каков смысл времени и длины когерентности?
4. Поясните понятие пространственной когерентности. Каков смысл радиуса когерентности?
5. Опишите способы получения когерентных лучей.

## **5.3. Дифракция света**

### ***Теоретический материал***

Принцип Гюйгенса – Френеля. Метод зон Френеля. Прямолинейное распространение света. Дифракция Френеля. Дифракция Френеля от круглого отверстия и круглого диска. Дифракция Фраунгофера от

бесконечно длинной прямой щели. Дифракция от одномерной дифракционной решетки. Разрешающая способность оптических инструментов. Понятие о голографии.

### **Основные формулы и определения**

▪ Количественный критерий, позволяющий определить, какой вид дифракции будет иметь место  $\frac{b^2}{\lambda l} \begin{cases} \ll 1 & \text{дифракция Фраунгофера} \\ \approx 1 & \text{дифракция Френеля} \\ \gg 1 & \text{геометрическая оптика,} \end{cases}$

где  $b$  – характерный размер объекта;  $\lambda$  – длина волны света;  $l$  – расстояние от объекта до экрана.

▪ Дифракция Френеля на круглом отверстии. Амплитуда колебания определяется как  $A = \frac{1}{2} A_1 \pm \frac{1}{2} A_m$ , где  $A_m$  берётся со знаком «плюс», если  $m$  – нечётное, и со знаком «минус», если  $m$  – чётное.

▪ Дифракция Френеля на круглом диске. Амплитуда колебаний определяется как  $A = \frac{A_{m+1}}{2}$ . С увеличением радиуса диска интенсивность центрального максимума падает, так как уменьшается  $A_{m+1}$ .

▪ Дифракция света на одной щели при нормальном падении лучей. Условие минимумов интенсивности света  $a \sin \varphi = \pm 2k \frac{\lambda}{2} = \pm k\lambda$ , где  $a$  – ширина щели;  $\varphi$  – угол дифракции,  $k$  – номер минимума;  $k = 1, 2, 3, \dots$ ;  $\lambda$  – длина волны. Условие максимумов интенсивности света  $a \sin \varphi = \pm (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$ ,  $k = 1, 2, 3, \dots$

▪ Дифракция света на дифракционной решётке при нормальном падении лучей. Условие главных максимумов интенсивности  $d \sin \varphi = \pm k\lambda$ ,  $k = 1, 2, 3, \dots$ , где  $d$  – период (постоянная) решётки;  $k$  – номер главного максимума;  $\varphi$  – угол между нормалью к поверхности решётки и направлением дифрагированных волн.

▪ Разрешающая сила дифракционной решётки  $R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = kN$ , где

$\Delta\lambda$  – наименьшая разность длин волн двух соседних спектральных линий ( $\lambda$  и  $\lambda + \Delta\lambda$ ), при которой эти линии могут быть видны отдельно в спектре, полученном посредством данной решётки;  $k$  – порядковый номер дифракционного максимума;  $N$  – число штрихов решётки.

- Разрешающая сила объектива телескопа  $R = \frac{D}{1,22\lambda}$ , где  $D$  – диаметр объектива;  $\lambda$  – длина волны.

метр объектива;  $\lambda$  – длина волны.

### **Вариант 5.3**

**Задание 1.** Сформулируйте принцип Гюйгенса – Френеля.

**Задание 2.** Зоны Френеля – что это?

**Задание 3.** Дайте определение постоянной дифракционной решётки.

**Задание 4.** Напишите условия дифракционных максимумов и минимумов от одной щели, на которую свет падает нормально.

**Задание 5.** Как определяется разрешающая способность оптических приборов?

**Задание 6.** Максимум третьего порядка при дифракции света с длиной волны  $\lambda = 600$  нм на дифракционной решётке, имеющей 100 штрихов на 1 мм длины, виден под углом

- 1)  $\arcsin 0,60$ ; 2)  $\arcsin 0,18$ ; 3)  $\arcsin 0,20$ ; 4)  $\arcsin 0,06$ .

**Задание 7.** Свет падает нормально на дифракционную решётку с периодом, равным 1 мкм. Если главный дифракционный максимум первого порядка наблюдается под углом  $30^\circ$ , то длина световой волны равна

- 1) 100 нм; 2) 200 нм; 3) 150 нм; 4) 500 нм.

**Задание 8.** Свет от газоразрядной трубки падает нормально на дифракционную решётку, имеющую 800 штрихов на миллиметр. Максимум первого порядка для красной линии виден под углом  $\alpha_1 = 30^\circ$ , а максимум того же порядка для зелёной линии – под углом  $\alpha_2 = 24,8^\circ$  ( $\sin(24,8^\circ) = 0,42$ ). Разность длин волн красной и зелёной линий равна

- 1) 70 нм; 2) 80 нм; 3) 144 нм; 4) 100 нм.

**Задание 9.** На рис. 5.1 представлена схема разбиения волновой поверхности  $\Phi$  на зоны Френеля. Разность хода между лучами  $N_1P$  и  $N_2P$  равна

- 1) 0; 2)  $3\lambda/2$ ; 3)  $2\lambda$ ; 4)  $\lambda/2$ .

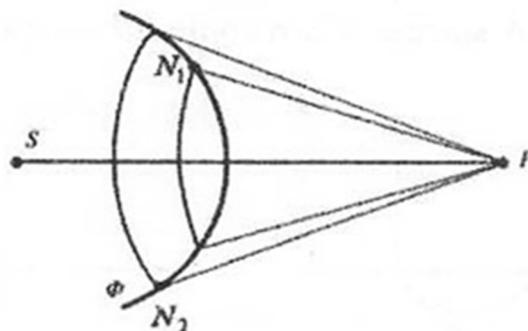


Рис. 5.1

**Задание 10.** При дифракции на дифракционной решётке с периодом  $d$ , равном 0,004 мм, наблюдается зависимость интенсивности монохроматического излучения от синуса угла дифракции, представленная на рис. 5.2 (изображены только главные максимумы). Длина волны монохроматического излучения равна

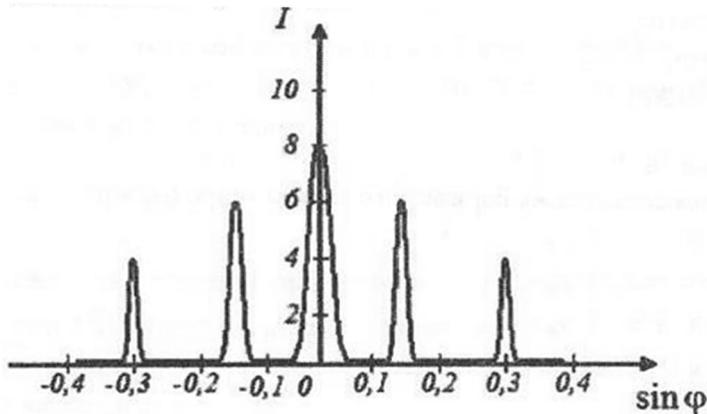


Рис. 5.2

монохроматического излучения от синуса угла дифракции, представленная на рис. 5.2 (изображены только главные максимумы). Длина волны монохроматического излучения равна

- 1) 400 нм; 2) 600 нм;
- 3) 200 нм; 4) 300 нм.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. В чём физический смысл метода зон Френеля?
2. В чем отличие дифракции Френеля от дифракции Фраунгофера?
3. Нарисуйте качественную картину распределения интенсивности света на экране за дифракционной решёткой.

## **5.4. Поляризация света**

### **Теоретический материал**

Естественный и поляризованный свет. Степень поляризации. Поляризация света при преломлении и отражении. Закон Брюстера. Поляризация при двойном лучепреломлении. Обыкновенный и необыкновенный лучи. Оптическая ось кристалла. Поляроиды и поляризационные призмы. Поляризаторы и анализаторы. Закон Малюса. Искусственная оптическая анизотропия. Оптическая активность вещества. Эффекты Керра и Фарадея.

### **Основные формулы и определения**

- Степень поляризации света  $P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$ , где  $I_{\max}$  и  $I_{\min}$  – максимальная и минимальная интенсивности частично поляризованного света, пропускаемого анализатором.

Для плоскополяризованного света  $I_{\min} = 0$  и  $P = 1$ ; для естественного света  $I_{\max} = I_{\min}$ , соответственно  $P = 0$ .

▪ Закон Брюстера  $\operatorname{tg}\varepsilon_B = n_{21}$ , где  $\varepsilon_B$  – угол падения, при котором отражённая световая волна полностью поляризована;  $n_{21}$  – относительный показатель преломления. Тангенс угла падения равен показателю преломления второй среды относительно первой.

▪ Закон Малюса  $I = I_0 \cos^2 \alpha$ , где  $I$  – интенсивность плоскополяризованного света, прошедшего через анализатор;  $I_0$  – интенсивность плоскополяризованного света, падающего на анализатор;  $\alpha$  – угол между направлением колебаний светового вектора волны, падающей на анализатор, и плоскостью пропускания анализатора. Интенсивность прошедшего через анализатор поляризованного света пропорциональна квадрату косинуса угла между плоскостью поляризации падающего света и плоскостью анализатора.

▪ Оптически активное вещество обладает способностью поворачивать плоскость поляризации. Для чистых кристаллов и жидкостей угол поворота плоскости поляризации определяется по формуле  $\varphi = \alpha d$  для оптически активных растворов  $\varphi = \alpha_0 c d$ , где  $\alpha$  ( $\alpha_0$ ) – удельное вращение (или постоянная вращений);  $c$  – концентрация раствора;  $d$  – расстояние, пройденное светом в оптически активном веществе.

#### **Вариант 5.4**

**Задание 1.** Назовите и поясните виды поляризованного света.

**Задание 2.** Как определяется степень поляризации?

**Задание 3.** Сформулируйте закон Брюстера?

**Задание 4.** Дайте определение обыкновенному и необыкновенному лучу.

**Задание 5.** Сформулируйте закон Малюса.

**Задание 6.** Пучок естественного света проходит через два поляризатора. Интенсивность естественного света равна  $I_0$ , угол между плоскостями пропускания поляризаторов равен  $\varphi$ . Согласно закону Малюса интенсивность света после второго поляризатора равна

1)  $I = I_0$ ; 2)  $I = (I_0/2) \cos^2 \varphi$ ; 3)  $I = (I_0/2)$ ; 4)  $I = I_0/2 \cos \varphi$ .

**Задание 7.** Угол между плоскостями пропускания двух поляризаторов равен  $30^\circ$ . Если угол увеличить в 3 раза, то интенсивность света, прошедшего через оба поляризатора:

1) увеличится в 1,5 раза; 2) станет равной нулю;  
3) увеличится в 3 раза; 4) увеличится в 2 раза.

**Задание 8.** Естественный свет проходит через границу раздела двух изотропных сред (диэлектриков). После прохождения отражённая световая волна оказывается полностью поляризованной. Чему равен угол между падающим и отражённым лучами?

1)  $60^\circ$ ; 2)  $120^\circ$ ; 3)  $90^\circ$ ; 4)  $30^\circ$ .

**Задание 9.** При падении света из воздуха на диэлектрик отражённый луч полностью поляризован. Если угол преломления  $30^\circ$ , то угол падения равен:

1)  $90^\circ$ ; 2)  $30^\circ$ ; 3)  $60^\circ$ ; 4)  $45^\circ$ .

**Задание 10.** Интенсивность естественного света, проходящего через поляризатор и анализатор, ослабляется в два раза. Тогда угол между плоскостями поляризации поляризатора и анализатора равен

1)  $45^\circ$ ; 2)  $60^\circ$ ; 3)  $0^\circ$ ; 4)  $30^\circ$ .

### ***Вопросы для самоконтроля***

1. Чем отличается поляризованный свет от естественного?
2. Чем отличается поляризатор от анализатора?
3. Каково техническое применение эффектов Керра и Фарадея?

## **5.5. Дисперсия света**

### ***Теоретический материал***

Затруднения в электромагнитной теории Максвелла. Нормальная и аномальная дисперсии. Методы наблюдения дисперсии. Призматический и дифракционный спектры. Электронная теория дисперсии света. Поглощение света. Закон Бугера. Цвета тел и спектры поглощения.

### ***Основные формулы и определения***

▪ Дисперсией света называются явления, обусловленные зависимостью показателя преломления вещества от длины (частоты) световой волны. Если показатель преломления увеличивается с частотой, т. е.  $dn/d\omega > 0$  (или  $dn/d\lambda < 0$ ), то такую зависимость называют нормальной дисперсией. Если  $dn/d\omega < 0$  (или  $dn/d\lambda > 0$ ), дисперсия света называется аномальной.

▪ Интенсивность света  $I$  при прохождении через вещество убывает по закону Бугера  $I = I_0 \exp(-\chi l)$ , где  $I_0$  – интенсивность света

на входе в поглощающий слой;  $\chi$  – постоянная, зависящая от свойств поглощающего слоя, длины волны, и называется коэффициентом поглощения;  $l$  – толщина слоя. Зависимость коэффициента поглощения от длины волны  $\chi(\lambda)$  называется спектром поглощения.

### Вариант 5.5

**Задание 1.** В чём заключается дисперсия света?

**Задание 2.** В чём отличие нормальной и аномальной дисперсий?

**Задание 3.** Сформулируйте основные положения электронной дисперсии света.

**Задание 4.** Какие виды спектров вы знаете? В чём их отличия?

**Задание 5.** Сформулируйте закон Бугера.

**Задание 6.** На рис. 5.3 изображена дисперсионная кривая для некоторого вещества. Аномальная дисперсия наблюдается в диапазоне частот излучения:

- 1) от  $\omega_0$  до  $\omega_2$ ; 2) от  $\omega_1$  до  $\omega_0$ ;
- 3) от  $\omega_1$  до  $\omega_2$ ; 4) от  $\omega_2$  до  $\infty$ .

**Задание 7.** Графики дисперсионных кривых зависимостей показателя преломления среды от частоты  $\omega$  и длины волны  $\lambda$  света имеют вид, представленный на рис. 5.4.

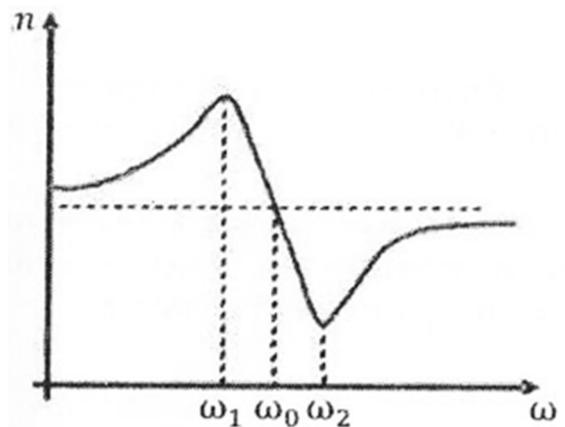


Рис. 5.3

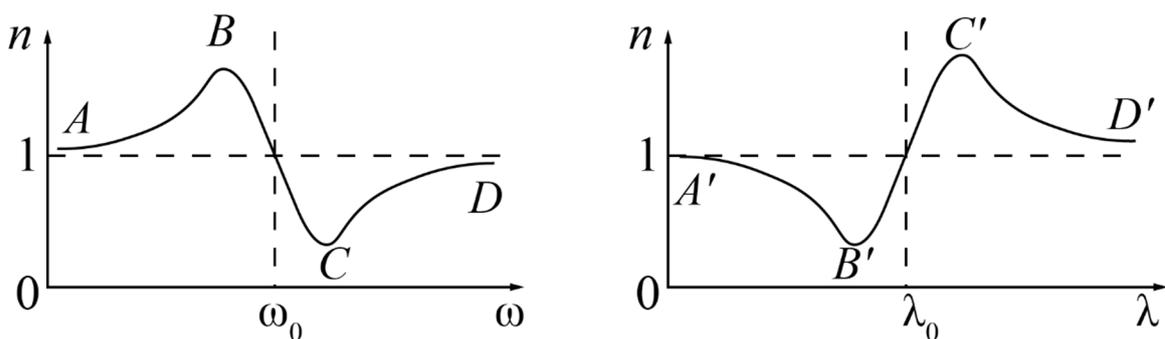


Рис. 5.4

Участки кривых  $CD$  и  $A'B'$  соответствуют дисперсии:

- 1)  $CD$  – нормальной,  $A'B'$  – нормальной;
- 2)  $CD$  – аномальной,  $A'B'$  – аномальной;
- 3)  $CD$  – нормальной,  $A'B'$  – аномальной;
- 4)  $CD$  – аномальной,  $A'B'$  – нормальной.

**Задание 8.** Показатель преломления воды для красного света меньше, чем для зелёного. В связи с этим при прохождении света в воде наблюдается:

- 1) аномальная дисперсия; 2) нормальная дисперсия;
- 3) оптическая активность; 4) поляризация.

**Задание 9.** Какое оптическое явление объясняет появление цветных радужных пятен на поверхности воды, покрытой тонкой бензиновой плёнкой?

- 1) дисперсия света; 2) фотоэффект;
- 3) дифракция света; 4) интерференция света.

**Задание 10.** Закон Бугера имеет вид  $I = I_0 e^{-\mu l}$ . Что обозначено символом  $\mu$ ?

- 1) коэффициент отражения света; 2) коэффициент поглощения света;
- 3) коэффициент рассеяния света; 4) коэффициент преломления света.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Каковы затруднения электромагнитной теории Максвелла?
2. Дайте характеристику спектра поглощения.
3. В чём отличие спектра паров веществ и твёрдых тел?

### **Задачи для самостоятельного решения**

5.1. В каком направлении распространяется плоская волна с волновым вектором: а)  $(k, 0, 0)$ ; б)  $(-k, -k, 0)$ ; в)  $(k, -k, 0)$ ; г)  $(0, 0, -k)$ ? Определите частоту  $\omega$  и длину  $\lambda$  этих волн, если их скорость в среде известна и равна  $v$ . Напишите соответствующие волновые уравнения.

5.2. На пути пучка света поставлена стеклянная пластина толщиной  $d = 1$  мм так, что угол падения луча  $i_1 = 30^\circ$ . На сколько изменится оптическая длина пути светового пучка?

5.3. На мыльную плёнку с показателем преломления  $n = 1,33$  падает по нормали монохроматический свет с длиной волны  $\lambda = 0,66$  мкм. Отражённый свет в результате интерференции имеет наибольшую яркость. Какова наименьшая возможная толщина  $d_{\min}$  плёнки?

5.4. Радиус второго тёмного кольца Ньютона в отражённом свете  $r_2 = 0,4$  мм. Определите радиус  $R$  кривизны плосковыпуклой линзы, взятой для опыта, если она освещается монохроматическим светом с длиной волны  $\lambda = 0,64$  мкм.

5.5. На пластину с щелью, ширина которой  $a = 0,05$  мм, падает нормально монохроматический свет с длиной волны  $\lambda = 0,7$  мкм. Определите угол  $\varphi$  отклонения лучей, соответствующий первому дифракционному максимуму.

5.6. Дифракционная решётка, освещённая нормально падающим монохроматическим светом, отклоняет спектр третьего порядка на угол  $\varphi_1 = 30^\circ$ . На какой угол  $\varphi_2$  отклоняет она спектр четвёртого порядка?

5.7. Угол преломления луча в жидкости  $i_2 = 35$ . Определите показатель преломления  $n$  жидкости, если известно, что отражённый пучок света максимально поляризован.

5.8. Можно ли наблюдать дифракцию Френеля от отверстия радиусом  $r \sim 1,0$  мм при освещении его солнечным светом?

5.9 На сколько процентов уменьшается интенсивность света после прохождения через призму Николя, если потери света составляют 10 %?

5.10. Установка для получения колец Ньютона освещается монохроматическим светом, падающим параллельно главной оптической оси линзы. Наблюдение ведётся в отражённом свете. Радиусы двух соседних тёмных колец равны 4,0 и 4,38 мм. Радиус кривизны линзы 6,4 м. Найдите порядковые номера колец и длину волны падающего света.

5.11. Пучок света падает перпендикулярно к поверхности стеклянного клина. Длина волны света 582 нм, угол клина  $20^\circ$ . Какое число тёмных интерференционных полос приходится на единицу длины клина? Показатель преломления стекла 1,5.

5.12. При помощи дифракционной решётки с периодом 0,02 мм получено первое дифракционное изображение на расстоянии 3,6 см от центрального и на расстоянии 1,8 м от решётки. Найдите длину световой волны.

5.13. Дифракционная решётка, постоянная которой равна 0,004 мм, освещается светом с длиной волны 687 нм. Под каким углом к решётке нужно проводить наблюдение, чтобы видеть изображение спектра второго порядка?

5.14. При освещении дифракционной решётки светом с длиной волны 627 нм на экране получились полосы, расстояние между которыми оказалось равным 39,6 см. Зная, что экран расположен на расстоянии 120 см от решётки, найдите постоянную решётки.

5.15. Какое число штрихов на единицу длины имеет дифракционная решётка, если зелёная линия ртути ( $\lambda = 546,1$  нм) в спектре первого порядка наблюдается под углом  $19^\circ 8'$ ?

5.16. На дифракционную решётку, имеющую период 2 мкм, падает нормально свет, пропущенный сквозь светофильтр. Фильтр пропускает волны с длиной волны от 500 до 600 нм. Будут ли спектры разных порядков перекрываться друг с другом?

5.17. Частично линейно-поляризованный свет рассматривается через николю. При повороте николя на угол  $60^\circ$  от положения, соответствующего максимальной яркости, яркость пучка уменьшается в три раза. Найдите отношение интенсивностей естественного и линейно-поляризованного света, а также степень поляризации пучка.

5.18. Для каких волн видимой части спектра кристаллическая пластинка толщиной 1 мм, вырезанная параллельно оптической оси, служит пластинкой в четверть волны? Разность показателей преломления обыкновенных и необыкновенных лучей в диапазоне видимого излучения  $9,0 \cdot 10^{-3}$ .

5.19. Между двумя параллельными николями помещают кварцевую пластинку толщиной 1 мм, вырезанную параллельно оптической оси. При этом плоскость поляризации монохроматического света, падающего на поляризатор, повернулась на угол  $20^\circ$ . При какой минимальной толщине пластинки свет не пройдёт через анализатор?

5.20. Монохроматический пучок света проходит через ячейку Керра со скрещенными николями. Конденсатор заполнен сероуглеродом, длина пластин конденсатора 10 мм, расстояние между ними 2,2 мм. Если на конденсатор подать напряжение 7,15 кВ, яркость света, выходящего из анализатора, оказывается максимальной. Определите константу Керра для света данной частоты.

### Контрольное задание № 5

#### *Таблица вариантов задач по разделу «Оптика»*

Вариант	Номер задачи				
1	5.1	5.11	5.15	5.5	5.16
2	5.2	5.12	5.16	5.6	5.17
3	5.3	5.13	5.17	5.7	5.18
4	5.4	5.14	5.18	5.8	5.19
5	5.5	5.15	5.19	5.9	5.20
6	5.6	5.16	5.20	5.10	5.1
7	5.7	5.17	5.1	5.11	5.2

Окончание таблицы

Вариант	Номер задачи				
8	5.8	5.18	5.2	5.12	5.3
9	5.9	5.19	5.3	5.13	5.4
10	5.10	5.20	5.4	5.14	5.5
11	5.1	5.11	5.15	5.5	5.16
12	5.2	5.12	5.16	5.6	5.17
13	5.3	5.13	5.17	5.7	5.18
14	5.4	5.14	5.18	5.8	5.19
15	5.5	5.15	5.19	5.9	5.20
16	5.6	5.16	5.20	5.10	5.1
17	5.7	5.17	5.1	5.11	5.2
18	5.8	5.18	5.2	5.12	5.3
19	5.9	5.19	5.3	5.13	5.4
20	5.10	5.20	5.4	5.14	5.5

## Практическая работа № 6

### ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ И АТОМНОЙ ФИЗИКИ. ФИЗИКА ТВЁРДОГО ТЕЛА

#### 6.1. Корпускулярные свойства волн

##### *Теоретический материал*

Внешний фотоэффект и его законы. Фотоны. Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта. Масса и импульс фотона. Опыты Лебедева. Квантовое и волновое объяснение давления света. Эффект Комптона и его теория. Диалектическое единство корпускулярных и волновых свойств электромагнитного излучения.

##### *Основные формулы и определения*

▪ Внешним фотоэффектом называется испускание электронов веществом под действием света. Основные законы фотоэффекта:

1. Максимальная начальная скорость фотоэлектронов определяется частотой света и не зависит от его интенсивности.

2. Для каждого вещества существует «красная граница» фотоэффекта, т. е. характерная минимальная частота света  $\omega_0$  (или максимальная  $\lambda_0$ ), при которой ещё возможен фотоэффект:  $\omega_0 = A/\hbar$ . «Красная граница» зависит только от работы выхода электрона, т. е. от химической природы вещества и состояния его поверхности.

3. Количество испускаемых с катода электронов пропорционально интенсивности светового излучения (фототок насыщения пропорционален энергетической освещённости катода).

▪ Энергетический баланс при фотоэффекте выражается уравнением Эйнштейна  $\hbar\omega = A_g + \frac{mv_{\max}^2}{2}$ , где  $\hbar\omega$  – энергия светового кванта, переданная электрону.

▪ Для фотона  $m_0 = 0$  и  $E = \varepsilon = \hbar\omega$ , отсюда  $p = E/c$ ,  $p = \hbar\omega/c = mc$ .

▪ Световое давление определяется как  $P = \frac{I}{c}(1 + \rho)$ , где  $I = n\hbar\omega$  – интенсивность света ( $n$  – количество фотонов, падающих на единицу поверхности в единицу времени);  $\rho$  – коэффициент отражения света от поверхности тела.

▪ Изменение длины волны  $\Delta\lambda$  фотона при рассеянии его на электроном на угол  $\theta$ :  $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \lambda_C (1 - \cos\theta)$ , где  $\lambda_C = \frac{2\pi\hbar}{mc}$  – комптоновская длина волны (в данном случае электрона).

### **Вариант 6.1**

**Задание 1.** Напишите уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта.

**Задание 2.** Как будет изменяться максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона при увеличении частоты падающего излучения?

**Задание 3.** Как определяется «красная граница» фотоэффекта для данного металла?

**Задание 4.** Как определяется давление, производимое светом при нормальном падении на поверхность?

**Задание 5.** Как вычисляется комптоновская длина волны?

**Задание 6.** Работа выхода электрона из металла равна  $6,6 \cdot 10^{-19}$  Дж. Определите частоту света, вырывающего с поверхности этого металла электроны, полностью задерживающиеся разностью потенциалов 5 В.

1)  $2,2 \cdot 10^{15}$  Гц; 2)  $3,6 \cdot 10^{15}$  Гц; 3)  $1,6 \cdot 10^{15}$  Гц; 4)  $4,2 \cdot 10^{15}$  Гц.

**Задание 7.** Сетчатка глаза начинает реагировать на жёлтый свет с длиной волны 600 нм при мощности падающего на неё излучения  $1,98 \cdot 10^{-18}$  Вт. Сколько фотонов при этом падает на сетчатку каждую секунду?

1) 500; 2) 3000; 3) 6; 4) 100.

**Задание 8.** Работа выхода электронов из натрия  $A = 2,27$  эВ. «Красная граница» фотоэффекта равна

1)  $1,4 \cdot 10^{14}$  Гц; 2)  $3,6 \cdot 10^{14}$  Гц; 3)  $2,9 \cdot 10^{14}$  Гц; 4)  $5,5 \cdot 10^{14}$  Гц.

**Задание 9.** Величина изменения длины волны  $\Delta\lambda$  излучения при комптоновском рассеянии зависит

1) от свойств рассеивающего света; 2) энергии падающего фотона; 3) угла рассеяния излучения; 4) длины волны падающего излучения.

**Задание 10.** Фотон с длиной волны 4,86 пм рассеялся при первоначально покоившемся свободном электроне. Комptonовская длина волны электрона  $\lambda_c = 2,43$  пм. Отношение максимально возможной длины волны рассеянного фотона к его первоначальной длине равно

1) 1; 2) 2; 3) 1/2; 4) 2/3.

### ***Вопросы для самоконтроля***

1. Сформулируйте законы внешнего фотоэффекта.
2. В чём физический смысл эффекта Комптона?
3. В чём различие характера взаимодействия при эффекте Комптона и фотоэффекте?
4. Сформулируйте корпускулярные свойства электромагнитных волн.

## **6.2. Тепловое излучение**

### ***Теоретический материал***

Равновесное излучение в полости. Абсолютно чёрное тело. Закон Кирхгофа. Закон Стефана – Больцмана. Закон смещения Вина. Формула Рэлея – Джинса. Распределение энергии в спектре абсолютно чёрного тела. Ультрафиолетовая катастрофа. Квантовая гипотеза и формула Планка.

## Основные формулы и определения

▪ Закон Кирхгофа: отношение испускательной к поглотительной способности не зависит от природы тела, оно является для всех тел одной и той же (универсальной) функцией частоты (длины волны) и температуры

$$\left(\frac{r_{\omega,T}}{a_{\omega,T}}\right)_1 = \left(\frac{r_{\omega,T}}{a_{\omega,T}}\right)_2 = \left(\frac{r_{\omega,T}}{a_{\omega,T}}\right)_3 = \dots = f(\omega, T).$$

Для абсолютно чёрного тела поглотительная способность равна единице. Следовательно, универсальная функция Кирхгофа  $f(\omega, T)$  имеет смысл испускательной способности абсолютно чёрного тела.

▪ Закон Стефана – Больцмана  $M_e = \sigma T^4$ , где  $M_e$  – энергетическая светимость чёрного тела;  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) – постоянная Стефана – Больцмана;  $T$  – термодинамическая температура.

▪ Энергетическая светимость серого тела  $M_e = \varepsilon \sigma T^4$ , где  $\varepsilon$  – коэффициент теплового излучения (степень черноты) серого тела.

▪ Закон смещения Вина  $\lambda_m = b/T$ , где  $\lambda_m$  – длина волны, на которую приходится максимум энергии;  $b$  – постоянная закона смещения Вина ( $b = 2,90 \cdot 10^{-3}$  м·К).

▪ Формула Планка  $M_{\lambda,T} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/(\lambda kT)} - 1}$ ;  $M_{\omega,T} = \frac{\hbar \omega^3}{4\pi^2 c^2} \times \frac{1}{e^{\hbar \omega/(kT)} - 1}$ , где  $M_{\lambda,T}$ ,  $M_{\omega,T}$  – спектральные плотности энергетической светимости чёрного тела;  $\lambda$  – длина волны;  $\omega$  – круговая частота;  $c$  – скорость света в вакууме;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – термодинамическая температура;  $h$  – постоянная Планка;  $\hbar = h/(2\pi)$  – постоянная Планка, делённая на  $2\pi$ .

▪ Зависимость максимальной спектральной плотности энергетической светимости от температуры  $(M_{\lambda,T}) = CT^5$ , где  $C$  – постоянная ( $C = 1,30 \cdot 10^5$  Вт/(м<sup>3</sup>·К<sup>5</sup>)).

## Вариант 6.2

**Задание 1.** Дайте определение абсолютно чёрному телу.

**Задание 2.** Сформулируйте закон Стефана – Больцмана.

**Задание 3.** В область каких длин волн сместится максимум испускательной способности абсолютно чёрного тела при увеличении термодинамической температуры?

**Задание 4.** Сформулируйте закон смещения Вина.

**Задание 5.** Напишите формулу Планка для спектральной плотности энергетической светимости.

**Задание 6.** Энергетическая светимость абсолютно чёрного тела возросла в 16 раз. Во сколько раз следует в этом случае изменить термодинамическую температуру тела?

- 1) увеличить в 2 раза; 2) увеличить в 4 раза;
- 3) уменьшить в 2 раза; 4) уменьшить в 4 раза.

**Задание 7.** На рис. 6.1 показаны кривые зависимости спектральной плотности энергетической светимости абсолютно чёрного тела от длины волны при разных температурах. Если кривая II соответствует спектру излучения абсолютно чёрного тела при температуре 1500 К, то кривая I соответствует температуре

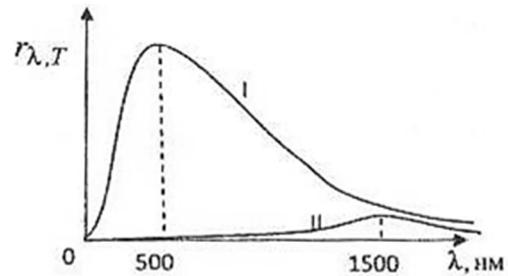


Рис. 6.1

- 1) 6000 К; 2) 4500 К; 3) 3000 К; 4) 15000 К.

**Задание 8.** На рис. 6.2 представлено распределение энергии в спектре излучения абсолютно чёрного тела в зависимости от длины волны для температуры  $T = 5000$  К. При уменьшении температуры в 2 раза длина волны, соответствующая максимуму излучения, будет равна

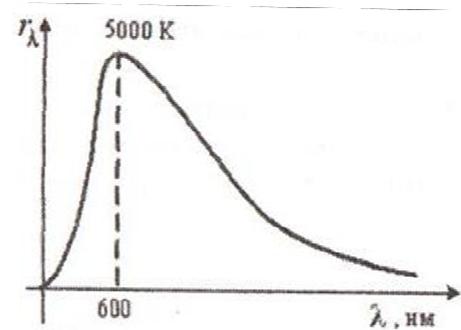


Рис. 6.2

- 1) 150 нм; 2) 300 нм; 3) 600 нм;
- 4) 1200 нм.

**Задание 9.** На какую длину волны  $\lambda_m$  приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости  $(M_{\lambda, T})_{\max}$  чёрного тела при температуре  $t = 0$  °С?

- 1) 10,6 мкм; 2) 1,6 мкм; 3) 30,0 мкм; 4) 15,0 мкм.

**Задание 10.** Определить температуру  $T$  чёрного тела, при которой максимум спектральной плотности энергетической светимости  $(M_{\lambda, T})_{\max}$  приходится на «красную границу» видимого спектра ( $\lambda_1 = 750$  нм).

- 1) 6000 К; 2) 3800 К; 3) 3000 К; 4) 5000 К.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Что такое равновесное тепловое излучение?
2. В чём заключается квантовая гипотеза?
3. При каких условиях из формулы Планка можно получить формулу Рэля Джинса?

### **6.3. Волновые свойства частиц. Уравнение Шредингера**

#### **Теоретический материал**

Трудности классической электродинамики при объяснении строения атома. Волны де Бройля. Опытное обоснование волновых свойств частиц. Корпускулярно-волновой дуализм свойств материи. Волновая функция и её статистический смысл. Принцип причинности в квантовой механике. Общее уравнение Шредингера для стационарных состояний. Свободная частица. Туннельный эффект. Частица в одномерной прямоугольной «потенциальной яме». Принцип соответствия Бора. Линейный гармонический осциллятор.

#### **Основные формулы и определения**

▪ Формула де Бройля, выражающая связь длины волн с импульсом  $p$  движущейся частицы, для двух случаев:

а) в классическом приближении ( $p = m_0 v$ )  $\lambda = 2\pi \hbar / p$ ;

б) в релятивистском случае (скорость  $v$  частицы сравнима со скоростью света в вакууме  $p = mv = m_0 v / \sqrt{1 - v^2 / c^2}$ )  $\lambda = \frac{2\pi \hbar}{m_0 v_0} \sqrt{1 - v^2 / c^2}$ .

▪ Связь длины волны де Бройля с кинетической энергией  $T$  частицы

а) в классическом приближении  $\lambda = \frac{2\pi \hbar}{\sqrt{2m_0 T}}$ ;

б) в релятивистском случае  $\lambda = \frac{2\pi \hbar c}{\sqrt{T(T + 2E_0)}}$ , где  $E_0$  – энергия частицы ( $E_0 = m_0 c^2$ ).

▪ Фазовая скорость волн де Бройля  $v = \frac{\omega}{k}$ , где  $\omega$  – круговая частота;  $k$  – волновое число ( $k = 2\pi/\lambda$ ).

- Групповая скорость волн де Бройля  $u = \frac{d\omega}{dk}$ .

- Соотношения де Бройля  $E = \hbar\omega$ ;  $\vec{p} = \hbar\vec{k}$ , где  $E$  – энергия движущейся частицы;  $p$  – импульс частицы;  $\vec{k}$  – волновой вектор;  $|\vec{k}| = k = 2\pi / \lambda$ ;  $\hbar$  – постоянная Планка ( $\hbar = h/(2\pi) = 1,05 \cdot 10^{-34}$  Дж·с).

- Соотношения неопределённостей:

а) для координаты и импульса частицы  $\Delta p_x \Delta x \geq \hbar$ , где  $\Delta p_x$  – неопределённость проекции импульса частицы на ось  $x$ ;  $\Delta x$  – неопределённость её координаты;

б) для энергии и времени  $\Delta E \Delta t \geq \hbar$ , где  $\Delta E$  – неопределённость энергии данного квантового состояния;  $\Delta t$  – время пребывания системы в этом состоянии.

- Одномерное временное уравнение Шредингера  $i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2 \partial^2 \psi}{2m \partial x^2}$ , где  $i$  – мнимая единица  $\sqrt{-1}$ ;  $m$  – масса частицы;  $\psi(x, t)$  – волновая функция, описывающая состояние частицы.

Волновая функция, описывающая одномерное движение свободной частицы,  $\psi(x, t) = A \exp \frac{i}{\hbar} (px - Et)$ , где  $A$  – амплитуда волны де Бройля;  $p$  – импульс частицы;  $E$  – энергия частицы.

Одномерное уравнение Шредингера для стационарных состояний  $\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U) \psi = 0$ , где  $E$  – полная энергия частицы;  $U(x)$  – потенциальная энергия;  $\psi(x)$  – координатная (или амплитудная) часть волновой функции. Для случая трёх измерений  $\psi(x, y, z)$  уравнение Шредингера записывается в виде  $\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U) \psi = 0$  или в операторной

форме  $\Delta \psi + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U) \psi = 0$ , где  $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$  – оператор Лапласа.

- Вероятность  $dW$  обнаружить частицу в интервале от  $x$  до  $x + dx$  (в одномерном случае) выражается формулой  $dW = |\psi(x)|^2 dx$ , где  $|\psi(x)|^2$  – плотность вероятности. Вероятность  $W$  обнаружить частицу в интервале от  $x_1$  и  $x_2$  находится интегрированием  $dW$  в указанных пределах

$$W = \int_{x_1}^{x_2} |\psi(x)|^2 dx.$$

▪ Собственное значение энергии  $E_n$  частицы, находящейся в  $n$ -м энергетическом уровне в бесконечно глубоком одномерном прямоугольном потенциальном ящике, определяется формулой  $E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ml^2} n^2$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ), где  $l$  – ширина потенциального ящика. Соответствующая этой энергии собственная волновая функция имеет вид  $\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin \frac{\pi n}{l} x$ .

### **Вариант 6.3**

**Задание 1.** Сформулируйте формулу де Бройля.

**Задание 2.** Напишите соотношение неопределённостей для координаты и импульса частицы.

**Задание 3.** Напишите соотношение неопределённостей для энергии и времени частицы.

**Задание 4.** Поясните физический смысл нормировки вероятностей.

**Задание 5.** Запишите стационарное уравнение Шредингера для линейного гармонического осциллятора?

**Задание 6.** Если протон и нейтрон двигаются с одинаковыми скоростями, то отношения их длин волн де Бройля  $\lambda_p/\lambda_n$  равно

1)  $\frac{1}{2}$ ; 2) 2; 3) 1; 4) 4.

**Задание 7.** Согласно гипотезе де Бройля любая частица должна обладать волновыми свойствами, и её импульс  $p$  связан с характерной для неё длиной волны  $\lambda_B$  так же, как и для фотона,  $p = (2\pi\hbar)/\lambda$ . Если скорость частиц одинакова, то наибольшей длиной волны обладают

1) нейтроны; 2) электроны; 3)  $\alpha$ -частицы; 4) протоны.

**Задание 8.** Согласно гипотезе де Бройля каждую частицу можно рассматривать как волну, для которой  $\lambda = (2\pi\hbar)/p$ , где  $p$  – импульс частицы. Если ускоряющее напряжение поля, в котором движется электрон, уменьшить в 2 раза, то длина волны де Бройля электрона

1) уменьшится в 2 раза; 2) увеличится в  $\sqrt{2}$  раза;

3) уменьшится в  $\sqrt{2}$  раза; 4) увеличится в 2 раза.

**Задание 9.** На рис. 6.3 представлены графики распределения плотности вероятности нахождения микрочастицы в потенциальной яме с бесконечно высокими стенками. Состоянию частицы с наибольшей энергией соответствует

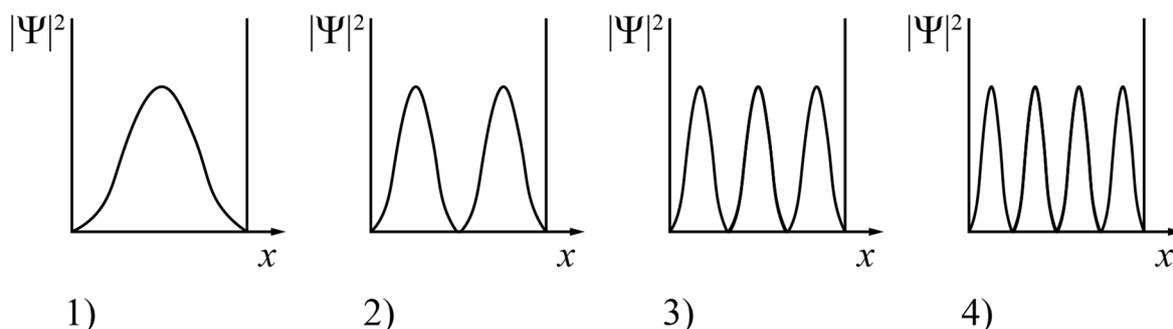


Рис. 6.3

**Задание 10.** Вероятность нахождения частицы в центре одномерной потенциальной ямы для состояния, представленного на рис. 6.4, равна

- 1)  $1/2$ ; 2)  $1/4$ ; 3) 0; 4) 1.

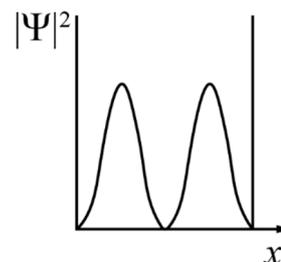


Рис. 6.4

### Вопросы для самоконтроля

1. Какие опыты подтвердили волновые свойства частиц?
2. Сформулируйте принцип неопределённости.
3. Почему при физической интерпретации волновой функции говорят не о самой функции, а о квадрате её модуля  $\psi^2$ ?
4. Может ли  $|\psi(x)|^2$  быть больше единицы?

## 6.4. Квантово-механическая теория атома водорода

### Теоретический материал

Уравнение Шредингера для электрона в атоме водорода. Главное, орбитальное и магнитное квантовые числа. Квантование энергии электрона в атоме. Спектр атома водорода. Правила отбора. Опыт Штерна и Герлаха. Спин электрона. Спиновое квантовое число. Магнитное спиновое квантовое число. Квантование момента импульса. Принцип Паули. Распределение электронов в атоме по состояниям. Электронные оболочки (слои), подоболочки. Периодическая система элементов Менделеева.

### Основные формулы и определения

- Уравнение Шредингера для электрона в атоме водорода. В системе, состоящей из неподвижного ядра с зарядом  $Ze$  и движущегося

вокруг него электрона, потенциальная энергия электрона определяется как  $U = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r}$ , где  $r$  – расстояние между электроном и ядром. След-

довательно, стационарное уравнение Шредингера принимает вид

$$\Delta^2 \psi + \frac{2m}{\hbar^2} \left( E + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r} \right) \psi = 0.$$

- Главное квантовое число  $n$  – это номер энергетического уровня.
- Орбитальное  $l$  квантовое (или азимутальное) число определяет квантование момента импульса электрона в атоме при данном значении энергии  $E_n$   $M_l = \hbar\sqrt{l(l+1)}$ . При данном  $n$  квантовое число  $l$  может принимать  $n$  различных значений  $l = 0, 1, 2, \dots, n - 1$ .

- Параметр  $m$  носит название магнитного квантового числа и определяет квантование проекции момента импульса  $M_z$  на произвольную ось  $Z$   $M_z = \hbar m$ . При данном  $l$  квантовое число  $m$  может принимать  $2l + 1$  различных значений  $m = -l, -l + 1, -l + 2, \dots, -1, 0, +1, \dots, l - 1, l$ .

- Правило отбора является следствием выполнения закона сохранения момента импульса: фотон, обладая собственным моментом импульса, равным примерно  $\hbar$ , при испускании уносит из атома этот момент, а при поглощении привносит. В квантовой механике доказывается, что для орбитального квантового числа  $l$  действует правило отбора  $\Delta l = \pm 1$ . Это значит, что возможны только такие переходы, при которых  $l$  меняется на единицу.

- Физик-теоретик Вольфганг Паули предложил принцип заполнения уровней: в любом атоме не может быть двух электронов, находящихся в двух одинаковых стационарных состояниях, определяемых набором четырёх квантовых чисел: главного  $n$ , орбитального  $l$ , магнитного  $m$  и спинового  $m_s$ . С помощью принципа Паули удалось теоретически обосновать периодическую систему элементов Д. И. Менделеева.

### **Вариант 6.4**

**Задание 1.** Напишите стационарное уравнение Шредингера для линейного гармонического осциллятора.

**Задание 2.** Какими квантовыми числами определяется состояние электрона в центрально-симметричном силовом поле атома?

**Задание 3.** Каков физический смысл квантовых чисел и какие значения они могут принимать?

**Задание 4.** Сформулируйте принцип Паули.

**Задание 5.** Как определяется максимальное число электронов, находящихся в состояниях, определяемых главным квантовым числом?

**Задание 6.** Согласно модели Бора – Резерфорда электроны в атоме движутся по стационарным орбитам (рис. 6.5). При переходе электрона с одной орбиты на другую излучается или поглощается один фотон. В ультрафиолетовой области спектра такие переходы образуют серию Лаймана, в видимой – серию Бальмера, в инфракрасной – серию Пашена. Наименьшей частоте кванта в серии Бальмера соответствует переход:

- 1)  $n = 5 \rightarrow n = 3$ ; 2)  $n = 4 \rightarrow n = 2$ ;
- 3)  $n = 3 \rightarrow n = 2$ ; 4)  $n = 2 \rightarrow n = 1$ .

**Задание 7.** Волновая функция частицы в потенциальной яме с бесконечно высокими стенками шириной  $L$  имеет вид:  $\psi_n(x) = A \sin \times (n\pi x/L)$ , где  $n$  – номер энергетического уровня. Если импульс частицы  $p = (2\pi\hbar)/L$ , то частица находится на энергетическом уровне с номером:

- 1)  $n = 1$ ; 2)  $n = 2$ ; 3)  $n = 4$ ; 4)  $n = 8$ .

**Задание 8.** При переходах электрона в атоме с одного уровня на другой закон сохранения момента импульса накладывает определённые ограничения (правило отбора). В энергетическом спектре атома водорода разрешённым является переход

- 1)  $3d \rightarrow 1s$ ; 2)  $4s \rightarrow 2p$ ; 3)  $3s \rightarrow 1s$ ; 4)  $4f \rightarrow 2p$ .

**Задание 9.** Собственные функции электрона в атоме водорода  $\Psi_{nlm}(r, \theta, \varphi)$  зависят от трёх целочисленных параметров:  $n$  – главное квантовое число,  $l$  – орбитальное (азимутальное) квантовое число,  $m$  – магнитное квантовое число. Главное квантовое число  $n$  определяет:

- 1) энергию электрона в атоме водорода; 2) величину орбитального момента импульса электрона; 3) проекцию орбитального момента импульса электрона на некоторое направление; 4) величину собственного момента импульса электрона.

**Задание 10.** Среднее время жизни атома в возбуждённом состоянии 10 нс. Учитывая, что постоянная Планка  $\hbar = 6,6 \cdot 10^{-16}$  эВ·с, ширина энергетического уровня возбуждённого состояния атома будет менее

- 1)  $6,6 \cdot 10^{-8}$  эВ; 2)  $1,5 \cdot 10^{-10}$  эВ; 3)  $1,5 \cdot 10^{-13}$  эВ; 4)  $6,6 \cdot 10^{-13}$  эВ.

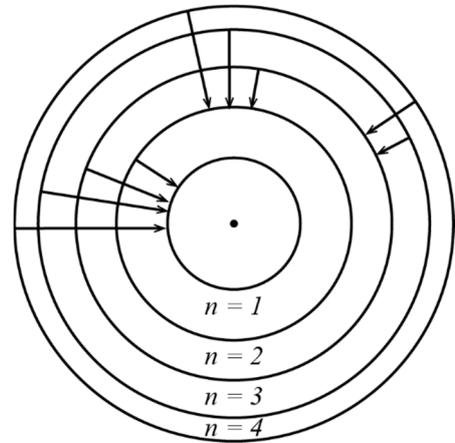


Рис. 6.5

### **Вопросы для самоконтроля**

1. В чем физический смысл волновой функции для атома водорода?
2. Чему равна плотность вероятности обнаружения электрона в основном состоянии водорода?
3. Сформулируйте принцип Паули.
4. Опишите опыт Штерна и Герлаха.
5. В чём состоит открытие Д. И. Менделеева?

## **6.5. Элементы квантовой статистики**

### **Теоретический материал**

Принцип неразличимости тождественных частиц. Бозоны и фермионы. Невырожденные и вырожденные системы. Элементарная ячейка фазового пространства. Плотность состояний. Понятие о квантовой статистике Бозе – Эйнштейна. Понятие о квантовой статистике Ферми – Дирака.

### **Основные формулы и определения**

▪ Распределение Бозе – Эйнштейна, которому подчиняются частицы, обладающие целочисленным (в частности, нулевым) спином,

имеет вид:  $\langle n_i \rangle = \frac{1}{e^{(E_i - \mu)/kT} - 1}$ , где  $\langle n_i \rangle$  – среднее число частиц, находя-

щихся в состоянии с номером  $i$ ;  $E_i$  – энергия частицы в этом состоянии;  $\mu$  – химический потенциал, определяемый из условия, что сумма всех  $\langle n_i \rangle$  равна полному числу  $N$  частиц в системе  $\sum \langle n_i \rangle = N$ . Частицы, подчиняющиеся этой статистике, называются бозонами. Таким образом, фотоны и фононы являются бозонами.

▪ Распределение Ферми – Дирака, которому подчиняются частицы с полуцелым спином, имеет вид:  $\langle n_i \rangle = \frac{1}{e^{(E_i - \mu)/kT} + 1}$ . Частицы,

подчиняющиеся этой статистике, называются фермионами. Для фермионов характерно то, что они никогда не занимают состояния, в котором уже находится частица. Имеющий размерность параметр  $\mu$  часто обозначают через  $E_F$  и называют уровнем Ферми, или энергией Ферми.

▪ Поведение электронного газа в сильной степени зависит от со-

отношения между температурой кристалла и температурой Ферми, равной  $E_F/k$ . Различают два предельных случая:

1.  $kT \ll E_F$ . В этом случае электронный газ называется вырожденным.

2.  $kT \gg E_F$ . В этом случае электронный газ называется невырожденным.

### **Вариант 6.5**

**Задание 1.** Дайте определение бозонам.

**Задание 2.** Дайте определение фермионам.

**Задание 3.** Что такое невырожденные и вырожденные системы.

**Задание 4.** Напишите выражение для квантовой статистики Бозе – Эйнштейна.

**Задание 5.** Напишите выражение для квантовой статистики Ферми – Дирака.

**Задание 6.** Определите концентрацию свободных электронов в металле при температуре  $T = 0$  К. Энергию Ферми  $\varepsilon$  принять равной 1 эВ.

1)  $4,57 \cdot 10^{27} \text{ м}^{-3}$ ; 2)  $2,55 \cdot 10^{27} \text{ м}^{-3}$ ; 3)  $1,57 \cdot 10^{27} \text{ м}^{-3}$ .

**Задание 7.** Определите число свободных электронов, которое приходится на один атом натрия при температуре  $T = 0$  К. Уровень Ферми  $\varepsilon_f$  для натрия равен 3,12 эВ. Плотность  $\rho$  натрия  $970 \text{ кг/м}^3$ .

1) 4,0; 2) 2,5; 3) 0,9.

**Задание 8.** Вычислите среднюю кинетическую энергию  $\langle \varepsilon \rangle$  электронов в металле при температуре  $T = 0$  К, если уровень Ферми  $\varepsilon_f = 7$  эВ.

1) 4,2 эВ; 2) 2,5 эВ; 3) 1,9 эВ.

**Задание 9.** Оцените температуру  $T_{\text{кр}}$  вырождения для калия, если принять, что на каждый атом приходится по одному свободному электрону. Плотность  $\rho$  калия  $860 \text{ кг/м}^3$ .

1) 43,2 кК; 2) 31,2 кК; 3) 1,9 кК.

**Задание 10.** Определите максимальную скорость  $v_{\text{max}}$  электронов в металле при  $T = 0$  К, если уровень Ферми  $\varepsilon_f = 5$  эВ.

1) 4,12 Мм/с; 2) 1,32 Мм/с; 3) 21,9 Мм/с.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Дайте определение бозонам и фермионам.

2. В чём различие между вырожденными и невырожденными системами?
3. Что такое плотность состояний?
4. Какие основные особенности статистики Бозе – Эйнштейна?
5. Как формулируется определение статистики Ферми – Дирака?

## 6.6. Тепловые свойства твёрдых тел

### *Теоретический материал*

Классическая теория теплоёмкости твёрдых тел. Закон Дюлонга и Пти. Фононы. Распределение фононов по энергиям. Теплоёмкость кристаллической решётки как теплоёмкость фононного газа в твёрдом теле. Распределение фононного газа в твёрдом теле. Распределение электронов проводимости в металле по энергиям при абсолютном нуле температуры. Энергия Ферми. Влияние температуры на распределение электронов проводимости. Уровень Ферми. Внутренняя энергия и теплоёмкость электронного газа в металле.

### *Основные формулы и определения*

- Закон Дюлонга и Пти: теплоёмкость моля химически простых тел в кристаллическом состоянии одинакова и равна  $C = 3R$ . Этот закон выполняется достаточно хорошо только при сравнительно высоких температурах ( $kT \gg \hbar\omega$ ). При низких температурах ( $kT \ll \hbar\omega$ ) теплоёмкость кристаллов убывает, стремясь к нулю при приближении к 0 К.
- Распределение Ферми по энергиям для свободных электронов в металле:

при  $T \neq 0$   $dn(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m}{\hbar^2}\right)^{3/2} \frac{E^{1/2} dE}{e^{(E-E_F)/kT} + 1}$ ; при  $T = 0$   $dn(E) = \frac{1}{2\pi^2} \times \left(\frac{2m}{\hbar^2}\right)^{3/2} E^{1/2} dE$  (при  $E < E_F$ ), где  $dn(E)$  – концентрация электронов, энергия которых заключена в интервале значений от  $E$  до  $E + dE$ ;  $m$  и  $E$  – масса и энергия электрона;  $E_F$  – уровень (или энергия) Ферми.

- Уровень Ферми в металле при  $T = 0$ :  $E_F = \frac{\hbar^2}{2m} (3\pi^2 n)^{2/3}$ .
- Температура  $T_{кр}$  вырождения  $T_{кр} = \frac{2\pi\hbar^2}{3km} n^{2/3}$ .

### **Вариант 6.6**

**Задание 1.** Сформулируйте закон Дюлонга и Пти.

**Задание 2.** Дайте определение фонону.

**Задание 3.** Сформулируйте распределение Ферми по энергиям электронов в металле.

**Задание 4.** Как определяется уровень Ферми?

**Задание 5.** Дайте определение электронного газа в металле.

**Задание 6.** Вычислите удельную теплоёмкость  $C$  кристалла алюминия по классической теории теплоёмкости.

1) 850 Дж/(кг·К); 2) 925 Дж/(кг·К); 3) 350 Дж/(кг·К).

**Задание 7.** Пользуясь классической теорией, вычислите удельную теплоёмкость  $C$  кристалла NaCl.

1) 825 Дж/(кг·К); 2) 925 Дж/(кг·К); 3) 350 Дж/(кг·К).

**Задание 8.** Найдите частоту  $\nu$  колебаний атомов серебра по теории теплоёмкости Эйнштейна, если характеристическая температура  $\theta_E$  серебра равна 165 К.

1) 3,44 ТГц; 2) 55,44 ТГц; 3) 6,34 ТГц.

**Задание 9.** Определите максимальную частоту  $\omega_{\max}$  собственных колебаний в кристалле золота по теории Дебая. Характеристическая температура  $\theta_D$  равна 180 К.

1)  $2,44 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$ ; 2)  $2,36 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$ ; 3)  $5,34 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$ .

**Задание 10.** Вычислите максимальную частоту  $\omega_{\max}$  Дебая, если известно, что молярная теплоёмкость  $C_m$  серебра при  $T = 20 \text{ К}$  равна 1,7 Дж/(моль·К).

1)  $2,75 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$ ; 2)  $2,36 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$ ; 3)  $1,34 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$ .

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Что такое фононный газ?
2. Дайте определение электронам проводимости.
3. Как определяется уровень Ферми в металле при  $T = 0 \text{ К}$ ?
4. Что такое электронный газ?

## 6.7. Зонная теория твёрдых тел

### *Теоретический материал*

Расщепление энергетических уровней атомов при образовании кристалла. Энергетические зоны в кристаллах. Распределение электронов по энергетическим зонам. Валентная зона и зона проводимости. Металлы, диэлектрики, полупроводники. Собственная проводимость полупроводников. Электроны проводимости и дырки. Примесная проводимость полупроводников. Электронный и дырочный полупроводники.

### *Основные формулы и определения*

- Зонная структура энергетических уровней получается непосредственно из решения уравнения Шрёдингера для электрона, движущегося в периодическом силовом поле. Спектр разрешённых значений энергии валентных электронов в кристалле распадается на ряд разрешённых и запрещённых зон. Ширина зон не зависит от размеров кристалла. Таким образом, чем больше атомов содержит кристалл, тем теснее располагаются уровни в зоне. Ширина разрешённых зон имеет величину порядка нескольких электронвольт.

- Существование энергетических зон позволяет объяснить с единой точки зрения существование металлов, полупроводников и диэлектриков.

- Разрешённую зону, возникшую из того уровня, на котором находятся валентные электроны в основном состоянии атома, мы будем называть валентной зоной. Частичное заполнение валентной зоны (в случае металла её называют также зоной проводимости) наблюдается в тех случаях, когда на последнем занятом уровне в атоме находится только один электрон. Для того чтобы увеличить энергию электрона, необходимо сообщить ему количество энергии, не меньшее, чем ширина запрещённой зоны  $\Delta E$ . Если ширина  $\Delta E$  невелика (порядка нескольких десятых электронвольта), энергия теплового движения оказывается достаточной для того, чтобы перевести часть электронов в верхнюю свободную зону. Эти электроны будут находиться в условиях, аналогичных тем, в которых находятся валентные электроны в металле. Свободная зона окажется для них зоной проводимости. Одновременно станет возможным переход электронов валентной зоны на её освободившиеся верхние уровни. Такое вещество называется электронным полупроводником.

▪ Если ширина запрещённой зоны  $\Delta E$  велика (порядка нескольких электронвольт), тепловое движение не сможет забросить в свободную зону заметное число электронов. В этом случае кристалл оказывается диэлектриком.

▪ Собственная проводимость полупроводников возникает в результате перехода электронов с верхних уровней валентной зоны в зону проводимости. При этом в зоне проводимости появляется некоторое число носителей тока – электронов, занимающих уровни вблизи зоны; одновременно в валентной зоне освобождается такое же число мест на верхних уровнях, в результате чего появляются дырки.

▪ Примесная проводимость возникает, если некоторые атомы данного полупроводника заменить в узлах кристаллической решётки атомами, валентность которых отличается на единицу от валентности основных атомов.

### **Вариант 6.7**

**Задание 1.** Дайте определение валентной зоне и зоне проводимости.

**Задание 2.** Как распределяются электроны по энергетическим зонам?

**Задание 3.** Какие отличия в зонной структуре проводника, полупроводника и изолятора?

**Задание 4.** Дайте определение электронам проводимости и дыркам.

**Задание 5.** В чём заключается механизм собственной и примесной проводимости полупроводников?

**Задание 6.** Определите уровень Ферми  $\varepsilon_f$  в собственном полупроводнике, если  $\Delta E_0$  активации равна 0,1 эВ. За нулевой уровень отсчёта кинетической энергии электронов принять низший уровень зоны проводимости.

1) 0,75; 2) –0,05; 3) –0,01.

**Задание 7.** Собственный полупроводник (германий) имеет при некоторой температуре удельное сопротивление  $\rho = 0,48$  Ом·м. Определите концентрацию  $n$  носителей заряда, если подвижности  $b_n$  и  $b_p$  электронов и дырок соответственно равны 0,36 и 0,16 м<sup>2</sup>/(В·с).

1)  $2,5 \cdot 10^{19}$  м<sup>-3</sup>; 2)  $1,4 \cdot 10^{19}$  м<sup>-3</sup>; 3)  $5,3 \cdot 10^{19}$  м<sup>-3</sup>.

**Задание 8.** Удельная проводимость  $\gamma$  кремния с примесями равна 112 См/м. Определите подвижность  $b_p$  дырок, если постоянная Холла  $R_H = 3,66 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/Кл. Принять, что полупроводник обладает только дырочной проводимостью.

1)  $3,5 \cdot 10^{-2}$  м<sup>2</sup>/(В·с); 2)  $2,4 \cdot 10^{-2}$  м<sup>2</sup>/(В·с); 3)  $4,3 \cdot 10^{-2}$  м<sup>2</sup>/(В·с).

**Задание 9.** Удельная проводимость  $\gamma$  кремния с примесями равна 112 См/м. Определите концентрацию  $n_p$  дырок, если постоянная Холла  $R_H = 3,66 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{Кл}$ . Принять, что полупроводник обладает только дырочной проводимостью.

1)  $2,5 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ ; 2)  $2,0 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ ; 3)  $3,3 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ .

**Задание 10.** Полупроводник в виде тонкой пластины шириной  $l = 1 \text{ см}$  и длиной  $L = 10 \text{ см}$  помещён в однородное магнитное поле с индукцией  $B = 0,2 \text{ Тл}$ . Вектор магнитной индукции перпендикулярен плоскости пластины. К концам пластины (по направлению  $L$ ) приложено постоянное напряжение  $U = 300 \text{ В}$ . Определите холловскую разность потенциалов  $U_H$  на гранях пластины, если постоянная Холла  $R_H = 0,1 \text{ м}^3/\text{Кл}$ , удельное сопротивление  $\rho = 0,5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

1) 2,5 В; 2) 2,0 В; 3) 1,2 В.

### ***Вопросы для самоконтроля***

1. В чем отличие механизма собственной и примесной проводимости полупроводников?
2. Каков физический смысл понятия уровня Ферми?
3. Что такое  $p$ - $n$  переход?
4. Объясните физические процессы, происходящие при образовании  $p$ - $n$  перехода.

## **6.8. Атомное ядро. Радиоактивность. Ядерные реакции**

### ***Теоретический материал***

Заряд, масса и размер атомного ядра. Зарядовое и массовое числа. Момент импульса ядра и его магнитный момент. Состав ядра. Нуклоны. Изотопы. Взаимодействие нуклонов и понятие о свойствах и природе ядерных сил. Дефект массы и энергия связи ядра. Закон радиоактивного распада. Правило смещения.  $\alpha$  – распад.  $\beta$  – распад.  $\gamma$  – излучение. Ядерные реакции и законы сохранения. Реакция синтеза атомных ядер.

### ***Основные формулы и определения***

- Атомное ядро атома любого химического элемента состоит из положительно заряженных протонов и не имеющих электрического заряда нейтронов. Протон и нейтрон являются двумя зарядовыми

состояниями ядерной частицы, которая называется нуклоном. Количество протонов в ядре (заряд ядра  $Ze$ ) совпадает с атомным номером соответствующего химического элемента в периодической системе Менделеева,  $N/Z \approx 1$ . Количество нейтронов в ядре обозначается  $N$ .

- Массовым числом ядра  $A$  называется общее число нуклонов в ядре:  $A = Z + N$ . Символ для обозначения ядра:  ${}_Z X^A$ , где  $X$  – обозначение данного элемента в периодической системе Менделеева. Ядра, имеющие один и тот же  $Z$  при разных  $A$ , называются изотопами. Изотопы ядер данного химического элемента имеют разное число нейтронов в ядре.

- Масса атомного ядра практически совпадает с массой всего атома, ибо масса электронов в атоме мала. Массовые числа нейтрона и протона одинаковы и равны единице.

- Орбитальный магнитный момент электрона  $\mu = \frac{evr}{2}$ , где  $v$  – скорость движения электрона. Орбитальный механический момент импульса  $\vec{M} = m[\vec{r} \times \vec{v}]$  образует с направлением движения электрона правовинтовую систему. Следовательно, векторы  $\vec{\mu}$  и  $\vec{M}$ .

- Энергией связи нуклона в ядре называется физическая величина, равная той работе, которую нужно совершить для удаления данного нуклона из ядра без сообщения ему квантовой энергии.  $\Delta E_{\text{св}} = [Zm_p + (A - Z)m_n - M_{\text{я}}]c^2$ , где  $Z$  – число протонов в ядре с массой  $m_p$  каждый;  $(A - Z)$  – число нейтронов в ядре;  $m_n$  – масса нейтрона;  $M_{\text{я}}$  – масса ядра.

- Мерой энергии связи атомного ядра является дефект массы. Дефектом массы  $\Delta m$  называется разность между суммарной массой всех нуклонов ядра в свободном состоянии и массой ядра  $\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - M_{\text{я}}$ .

- Атомные ядра, как и атомы, имеют дискретные, квантованные значения энергии  $E$ . Если ядро имеет наименьшую возможную энергию, равную энергии связи  $\Delta E_{\text{св}}$ , то оно находится в основном энергетическом состоянии.

- Самопроизвольный распад атомных ядер подчиняется закону радиоактивного распада  $N = N_0 e^{-\lambda t}$ , где  $N_0$  – число ядер в данном объёме вещества в начальный момент времени  $t = 0$ ;  $N$  – число ядер в том же объёме к моменту времени  $t$ ;  $\lambda$  – постоянная распада, имеющая смысл

вероятности распада ядра за 1 с и равная доле ядер, распадающихся в единицу времени.

▪ Характеристикой устойчивости ядер относительно распада считается период полураспада  $T_{1/2}$  – время, в течение которого первоначальное количество ядер данного радиоактивного вещества распадается наполовину. Связь  $\lambda$  и  $T_{1/2}$ :  $T_{1/2} = \ln 2 / \lambda = 0,693 \tau$ .

▪ Превращения атомных ядер, которые сопровождаются испусканием  $\alpha$ - и  $\beta$ -лучей, называются соответственно  $\alpha$ - и  $\beta$ -распадом. Распадающееся ядро называется материнским, ядро продукта распада – дочерним.

▪ Правила смещения ядер при радиоактивных распадах:

при  $\alpha$ -распаде  ${}_Z X^A \rightarrow {}_{Z-2} Y^{A-4} + {}_2 He^4$ ,

при  $\beta$ -распаде  ${}_Z X^A \rightarrow {}_{Z+1} Y^A + {}_{-1} e^0$ .

Здесь  $X$  – символ химического элемента, соответствующего материнскому ядру;  $Y$  – то же для дочернего ядра.

Альфа-распад уменьшает массовое число ядра на 4, а заряд ядра на 2 элементарных положительных заряда, т. е. перемещает химический элемент на две клетки влево в периодической системе Менделеева.

При бета-распаде массовое число не изменяется, а заряд ядра увеличивается. Химический элемент перемещается на одну клетку вправо в периодической системе Менделеева.

### **Вариант 6.8**

**Задание 1.** Заряд, масса и размер атомного ядра.

**Задание 2.** Напишите момент импульса ядра и его магнитный момент.

**Задание 3.** Каков состав ядра?

**Задание 4.** Дайте определение изотопам.

**Задание 5.** Напишите закон радиоактивного распада.

**Задание 6.** Ядро урана  ${}^{235}\text{U}$ , захватив нейтрон, делится на два осколка:  ${}^{140}\text{Cs}$  и  ${}^{94}\text{Rb}$ . Сколько нейтронов выделяется в такой ядерной реакции деления?

1) 0; 2) 1; 3) 2; 4) 3.

**Задание 7.** При радиоактивном распаде ядра урана  ${}^{238}\text{U}$  и конечном превращении его в стабильное ядро свинца  ${}^{198}\text{Pb}$  должно произойти ...  $\alpha$ -распадов и ...  $\beta$ -распадов

1) 10 и 8; 2) 8 и 10; 3) 10 и 9; 4) 10 и 10.

**Задание 8.** Нуклоны – частицы, для которых верны следующие утверждения:

- 1) протон обладает зарядом, равным  $e^+$ ;
- 2) спин нейтрона меньше спина протона;
- 3) масса нуклонов практически одинаковы;
- 4) массы нуклона равна массе электрона.

1) 1 и 3; 2) 1 и 4; 3) 2 и 3; 4) 2 и 4.

**Задание 9.** Какая доля радиоактивных ядер останется нераспавшейся через интервал времени, равный двум периодам полураспада?

- 1) 25 %; 2) 50 %; 3) 75 %; 4) 33 %.

**Задание 10.** Масса покоя ядра  ${}^4\text{He}$  равна  $m = 6,64 \cdot 10^{-27}$  кг. Энергия связи ядра гелия равна

- 1)  $8,6 \cdot 10^{-9}$  Дж; 2)  $7,0 \cdot 10^{-10}$  Дж; 3)  $6,2 \cdot 10^{-11}$  Дж; 4)  $4,7 \cdot 10^{-12}$  Дж.

### ***Вопросы для самоконтроля***

1. Опишите модели ядра.
2. Чем отличаются изотопы?
3. Как определяется энергия связи ядра?
4. Как формулируется закон радиоактивного распада?
5. Какие существуют виды радиоактивных распадов? Опишите их особенности.

## **6.9. Элементарные частицы**

### ***Теоретический материал***

Классификация элементарных частиц. Взаимная превращаемость элементарных частиц. Четыре типа фундаментальных взаимодействий: сильные, электромагнитные, слабые и гравитационные.

### ***Основные формулы и определения***

■ Под элементарными частицами можно понимать такие микро-частицы, внутреннюю структуру которых на современном уровне развития физики нельзя представить как объединение других частиц. Элементарные частицы подразделяют на четыре класса: к первому классу относится только одна частица – фотон; второй класс образуют лептоны; третий – мезоны; четвёртый – барионы (см. таблицу).

Вид взаимодействия	Константа взаимодействия	Время жизни, с
Сильное	10	$10^{-23}$
Электромагнитное	$10^{-2}$	$10^{-16}$
Слабое	$10^{-14}$	$10^{-8}$
Гравитационное	$10^{-39}$	—

▪ Краткая характеристика классов частиц:

1. Фотоны  $\gamma$  (кванты электромагнитного поля) участвуют в электромагнитных взаимодействиях, но не обладают сильным и слабым взаимодействием.

2. Лептоны обладают слабым взаимодействием. К их числу относятся частицы, не обладающие сильным взаимодействием: мюоны, электроны, электронные нейтрино и мюонные нейтрино. Все лептоны имеют спин, равный  $\frac{1}{2}$ , и, следовательно, являются фермионами. Те из них, которые имеют электрический заряд, обладают также электромагнитным взаимодействием.

3. Мезоны – сильно взаимодействующие нестабильные частицы. В отличие от лептонов мезоны обладают не только слабым (и, если они заряжены, электромагнитным), но также и сильным взаимодействием, проявляющимся при взаимодействии их между собой. Спин всех мезонов равен нулю, так что они являются бозонами.

4. Класс барионов объединяет в себе нуклоны (p, n) и нестабильные частицы с массой, большей массы нуклонов, получивших название гиперонов. Все барионы обладают сильным взаимодействием и, следовательно, активно взаимодействуют с атомными ядрами. Спин всех барионов равен  $\frac{1}{2}$ , так что барионы являются фермионами. При распаде бариона наряду с другими частицами обязательно образуется барион. Эту закономерность называют одним из проявлений закона сохранения барионного заряда.

### **Вариант 6.9**

**Задание 1.** Что такое элементарная частица?

**Задание 2.** Дайте классификацию элементарных частиц.

**Задание 3.** Поясните закон сохранения лептонного заряда.

**Задание 4.** Что такое аннигиляция?

**Задание 5.** В чём основные отличия фундаментальных взаимодействий?

**Задание 6.** Установите соответствие между характерным временем взаимодействия и видом фундаментального взаимодействия.

- |                  |                      |
|------------------|----------------------|
| 1) $10^{-20}$ с; | а) сильное;          |
| 2) $10^{-23}$ с; | б) слабое;           |
| 3) $10^{-20}$ с. | в) электромагнитное; |
|                  | г) гравитационное.   |

**Задание 7.** В порядке возрастания интенсивности фундаментальные взаимодействия располагаются следующим образом:

- 1) электромагнитное, гравитационное, слабое, сильное;
- 2) гравитационное, слабое, электромагнитное, сильное;
- 3) электромагнитное, слабое, гравитационное, сильное;
- 4) слабое, сильное, гравитационное, электромагнитное.

**Задание 8.** Установите соответствие между группами элементарных частиц и характерными типами фундаментальных взаимодействий:

- |             |                      |
|-------------|----------------------|
| 1) фотоны;  | а) электромагнитное; |
| 2) лептоны; | б) слабое;           |
| 3) андроны. | в) сильное;          |
|             | г) гравитационное.   |

**Задание 9.** Распад мюона по схеме  $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_e + \nu_\mu$  не может идти из-за нарушения закона сохранения;

- |                       |                          |
|-----------------------|--------------------------|
| 1) барионного заряда; | 2) электрического заряда |
| 3) спина;             | 4) лептонного заряда.    |

**Задание 10.** Существуют три разновидности радиоактивного  $\beta$ -распада: электронный  $\beta^-$ -распад, позитронный  $\beta^+$ -распад и К-захват. К-захват – это ядерное превращение, происходящее по схеме:

- 1)  ${}_0^1\text{n} \rightarrow {}_1^1\text{p} + {}_{-1}^0\text{e} + \nu_e$ ;
- 2)  ${}_1^1\text{p} + {}_{-1}^0\text{e} \rightarrow {}_0^1\text{n} + \nu_e$ ;
- 3)  ${}_{+1}^0\text{e} + {}_{-1}^0\text{e} \rightarrow 2\gamma$ ;
- 4)  ${}_1^1\text{p} \rightarrow {}_0^1\text{n} + {}_{+1}^0\text{e} + \nu_e$ .

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Какие частицы относятся к элементарным?
2. Какова основная систематика элементарных частиц?
3. Какие типы фундаментальных взаимодействий вы знаете?
4. Дайте определения фундаментальных взаимодействий.

## Задачи для самостоятельного решения

6.1. Определите энергию  $\varepsilon$  фотона, испускаемого при переходе электрона в атоме водорода с третьего энергетического уровня на основной.

6.2. Определите первый потенциал возбуждения  $\phi_1$  атома водорода.

6.3. Вычислите длину волны де Бройля  $\lambda$  для электрона, прошедшего ускоряющую разность потенциалов  $U = 22,5$  В.

6.4. Вычислите длину волны де Бройля  $\lambda$  для протона, движущегося со скоростью  $V = 0,6c$  ( $c$  – скорость света в вакууме).

6.5. Оцените с помощью соотношения неопределённостей минимальную кинетическую энергию  $T_{\min}$  электрона, движущегося внутри сферической области диаметром  $d = 0,1$  нм.

6.6. Определите относительную неопределённость  $\Delta p/p$  импульса движущейся частицы, если допустить, что неопределённость её координаты равна длине волны де Бройля.

6.7. Электрон находится в прямоугольном потенциальном ящике с непроницаемыми стенками. Ширина ящика  $l = 0,2$  нм, энергия электрона в ящике  $E = 37,8$  эВ. Определите номер  $n$  энергетического уровня и модуль волнового вектора  $\vec{k}$ .

6.8. Частица в потенциальном ящике находится в основном состоянии. Какова вероятность обнаружения частицы в средней трети ящика, в крайней трети ящика?

6.9. Вычислите энергию связи  $E_{\text{св}}$  ядра дейтерия  ${}^2_1\text{H}$  и трития  ${}^3_1\text{H}$ .

6.10. Вычислите энергетический эффект  $Q$  реакции  ${}^9_4\text{Be} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + {}^1_0\text{n}$ .

6.11. Вычислите энергетический эффект  $Q$  реакции  ${}^6_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + {}^4_2\text{He}$ .

6.12. Определите число  $N$  атомов радиоактивного препарата йода  ${}^{131}_{53}\text{I}$  массой  $m = 0,5$  мкг, распавшихся в течение времени: 1)  $t_1 = 1$  мин; 2)  $t_2 = 7$  сут.

6.13. Определите активность  $A$  радиоактивного препарата  ${}^{98}_{38}\text{Sr}$  массой  $m = 0,1$  мкг.

6.14. Постоянная распада  $\lambda$  рубидия  ${}^{89}\text{Rb}$  равна  $0,00077 \text{ с}^{-1}$ . Определите его период полураспада  $T_{1/2}$ .

6.15. Какая часть начального количества атомов распадётся за один год в радиоактивном изотопе тория  ${}^{228}\text{Th}$ .

6.16. Определите теплоту  $Q$ , необходимую для нагревания кристалла меди массой  $m = 100$  г от  $T_1 = 10$  К до  $T_2 = 20$  К. Характеристическая температура Дебая для меди  $\Theta_D = 320$  К. Считать условие  $T_2 \ll \Theta_D$  выполненным.

6.17. Выразите среднюю квадратичную скорость  $\langle V_{\text{кв}} \rangle$  через максимальную скорость  $V_{\text{max}}$  электронов в металле при температуре 0 К.

6.18. Металл находится при температуре 0 К. Определите относительное число электронов, энергии которых отличаются от энергии Ферми не более чем на 2 %.

6.19. Сравните длины волн де Бройля для электрона и протона, имеющих одинаковую скорость.

6.20. Частица массой  $m$  находится в одномерной, бесконечно глубокой потенциальной яме прямоугольной формы (рис. 6.6). а) Запишите уравнение Шредингера для частицы и напишите общее решение этого уравнения; б) запишите граничные условия и выберите систему отвечающих им собственных решений; в) определите нормировочный коэффициент для найденных функций и покажите, что он не зависит от номера состояния  $n$ .

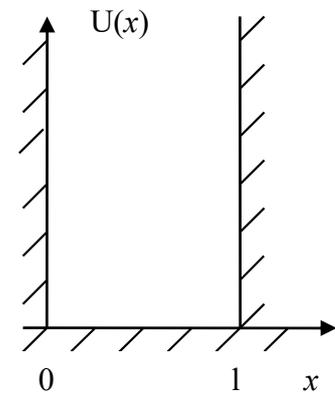


Рис. 6.6

6.21. Запишите обозначения состояний атома водорода, в которых может находиться электрон, имеющий главное квантовое число  $n = 4$ .

6.22. Сколько электронов в атоме могут иметь одинаковые квантовые числа: а)  $n, l, m_l, m_s$ ; б)  $n, l, m_l$ ; в)  $n, l$ ; г)  $n$ .

6.23. Какую группу электронов в атоме называют: а) подоболочкой; б) оболочкой? Укажите максимально возможное число электронов в оболочке и подоболочке.

6.24. Какое число электронов в атоме образует замкнутую оболочку с квантовым числом  $n = 1, 2, 3, 4, 5$ ?

6.25. Оцените собственное время жизни  $\tau$  нестабильной частицы, если ширина  $\Delta E$  уровня её собственной энергии составляет: а) 10 кэВ; б) 1 МэВ; в) 100 МэВ.

## Контрольное задание № 6

### *Таблица вариантов задач по разделу «Элементы квантовой механики и атомной физики. Физика твёрдого тела»*

Вариант	Номер задачи				
1	6.1	6.11	6.21	6.6	6.16
2	6.2	6.12	6.22	6.7	6.17
3	6.3	6.13	6.23	6.8	6.18
4	6.4	6.14	6.24	6.9	6.19
5	6.5	6.15	6.25	6.10	6.20
6	6.6	6.16	6.1	6.11	6.21
7	6.7	6.17	6.2	6.12	6.22
8	6.8	6.18	6.3	6.13	6.23
9	6.9	6.19	6.4	6.14	6.24
10	6.10	6.20	6.5	6.15	6.25
11	6.1	6.11	6.21	6.6	6.16
12	6.2	6.12	6.22	6.7	6.17
13	6.3	6.13	6.23	6.8	6.18
14	6.4	6.14	6.24	6.9	6.19
15	6.5	6.15	6.25	6.10	6.20
16	6.6	6.16	6.1	6.11	6.21
17	6.7	6.17	6.2	6.12	6.22
18	6.8	6.18	6.3	6.13	6.23
19	6.9	6.19	6.4	6.14	6.24
20	6.10	6.20	6.5	6.15	6.25

## СПИСОК ПРИМЕРНЫХ ТЕМ РЕФЕРАТОВ

1. Лазеры: их строение и применение.
2. Принцип работы и область применения лазеров.
3. Тепловые двигатели.
4. История развития ядерной физики.
5. Атомное ядро.
6. Электромагнитные волны.
7. Люминесцентные методы измерения температуры.

8. Фазовые равновесия и фазовые переходы.
9. Специальная теория относительности А. Эйнштейна.
10. Физическая природа шаровой молнии.
11. Роль термодинамики в современной физике.
12. Корпускулярно-волновой дуализм.
13. Родоначалники авиации и внедрение реактивной техники.
14. Модель Большого Взрыва и хронология Вселенной.
15. Чёрные дыры.
16. История открытия сверхпроводимости.
17. Современное состояние экспериментальной физики.
18. Важнейшие этапы развития физики.
19. Русские учёные – лауреаты Нобелевской премии по физике.
20. История создания атомной бомбы в СССР.
21. Периодическая таблица элементов Д. И. Менделеева – важнейший этап в развитии физической науки.
22. Современные измерители нормального ускорения свободного падения.
23. Роль физики в подготовке к полёту человека в космос.
24. Эксперимент как основной элемент познания.
25. Применение законов физики в технике.
26. А. С. Попов – основоположник радио.
27. Атом. История изучения.
28. Вклад Э. К. Циолковского в развитие космонавтики.
29. Современные проблемы в физике.
30. Физика как основа технической грамотности инженера.

## ОТВЕТЫ К ЗАДАЧАМ

- 1.1.  $W_{\tau} = \frac{(av)}{v^2} \vec{V}$ ;  $W_n = W - \frac{(av)}{v^2} v$ .
- 1.2. 1,5 с; -6 м/с; -4 м/с<sup>2</sup>; 9,84 м/с<sup>2</sup>.
- 1.3. 0,235 с; 5,1 м/с; 0,286 м/с.
- 1.4. 6,28 м/с; -0,572 м/с.
- 1.5. 1 м/с; 3 м/с.
- 1.6. 2 шага; 4 шага.
- 1.7. 40 м/с.
- 1.8. -6 м/с; 4 м/с.
- 1.9. В 4 раза.
- 1.10. Центр масс прыгуна движется по параболической траектории.
- 1.11. 1,4 м/с<sup>2</sup>; 8,4 Н.
- 1.12. 3,27 м/с<sup>2</sup>; 1,31 Н; 1,96 Н.
- 1.13. У первого больше в 1,2 раза.
- 1.14. 3,55 м/с.
- 1.15. а) импульс тела не сохраняется; б) сохраняется проекция импульса на горизонтальное направление.
- 1.16. 0,195 рад/с.
- 1.17. 250 кг.
- 1.18. В 1,7 раза.
- 1.19. 1,05 ч.
- 1.20.  $3,64 \cdot 10^{-22}$  кг·м/с.
- 
- 2.1.  $2,33 \cdot 10^{-26}$  кг.
- 2.2.  $2,69 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup>;  $3,35 \cdot 10^{22}$  см<sup>-3</sup>;  $1,72 \cdot 10^{22}$  см<sup>-3</sup>;  $6,02 \cdot 10^{22}$  см<sup>-3</sup>.
- 2.3.  $32 \cdot 10^{-3}$  кг/моль.
- 2.4. 41,4 нПа; 13,8 мкПа.
- 2.5. 44,1.
- 2.6. 6,4 м<sup>3</sup>.
- 2.7. 1,69 МПа.
- 2.8.  $1,24 \cdot 10^{-20}$  Дж;  $6,2 \cdot 10^{-21}$  Дж.
- 2.9. 1,04 кДж/(кг·К); 743 Дж/(кг·К).
- 2.10. 877 Дж/(кг·К); 629 Дж/(кг·К).
- 2.11. 1,24 кДж/(кг·К); 902 Дж/(кг·К).
- 2.12. 910 Дж/(кг·К); 650 Дж/(кг·К).

- 2.13. 5 МДж; 0; 5 МДж.  
 2.14. 400 кДж; 160 кДж; 560 кДж.  
 2.15. 0; 126 кДж; 126 кДж.  
 2.16. 324 °С.  
 2.17. 28,1 кДж.  
 2.18. 3,62 мДж; 2,66 Па.  
 2.19. 4,42 мм.  
 2.20. -5,57 мм.  
 2.21. а) 0; б) 0; в) 1/2; г) 1/8.

2.22. а) Смещается вправо  $\sqrt{T}$ , высота максимума убывает  $1/\sqrt{T}$ ; относительное число определённых «быстрых» молекул не меняется;  
 б) смещается влево  $1/\sqrt{m}$ , высота максимума растёт  $\sqrt{m}$ , относительное число «быстрых» молекул не меняется (здесь  $v_0 = \sqrt{2kT/m}$ !).

- 3.1. 79 нКл.  
 3.2. 51 мН.  
 3.3. 2,25 мН.  
 3.4. 5,55 нКл/м.  
 3.5. 0,23 Н/м<sup>2</sup>.  
 3.6. 182 В.  
 3.7. 56,6 В.  
 3.8. 1,5 Ф.  
 3.9. 60 мкм/с; 10<sup>5</sup> м/с.  
 3.10. 1) 0, 36 нКл; 180 В; 120 В; 2) 0,6 нКл; 0,9 нКл; 300 В.  
 3.11.  $1,18 \cdot 10^7$  А/м<sup>2</sup>.  
 3.12. 14 В; 2 Ом.  
 3.13. 20 Кл.  
 3.14. 0,4 А.  
 3.15. 0,45 А.  
 3.16. 68 %.  
 3.17. 0,5 и 1,5 А.  
 3.18. 36 Вт.  
 3.19. 0,5 Дж.  
 3.20. 44,5 А/м.  
 3.21. 17,4 А/м.  
 3.22. 138 мкТл.  
 3.23. 6,28 мТл.

- 3.24. 50 мН.
- 3.25. 0,1 А м<sup>2</sup>.
- 3.26. 0,157 Н м.
- 3.27. 9,57 ММ/с.
- 3.28.  $2,8 \cdot 10^{10}$  с<sup>-1</sup>.
- 3.29.  $1,04 \cdot 10^6$  м/с.
- 3.30. 5 мВб.
- 3.31. 0,02 Дж.
- 3.32. 4 мТл.
- 3.33. 2,01 В.
- 3.34. 0,4 Кл.
- 3.35. 2 мВб; 8 Вб.
- 3.36. 6,28 мГн.
- 3.37. 6,75 А.
- 3.38. 10 Дж.

4.1.  $4$  с<sup>-1</sup>; 1,57 с;  $\pi/4$ ; 7,07 см.

4.2. 2,04 с; 4,07 рад.

4.3. 120° или 240°.

4.4.  $l_1 : l_2 = 4 : 9$ .

4.5. В нагруженной.

4.7.  $2x + y = 0$ .

4.8. 200°.

4.9.  $x_0 = A \sin \alpha$ ,  $\dot{x}_0 = A \omega_0 \cos \alpha$ .

4.10.  $x_m = \sqrt{2E/k}$ ,  $\dot{x}_m = \sqrt{2E/m}$ .

4.11. Свободное затухающее колебание;  $x(t) = |a_0| \exp(-\beta t)$  – амплитуда,  $\beta$  – коэффициент затухания,  $\omega'$  – частота,  $2\pi/\omega'$  – период свободных затухающих колебаний,  $\alpha$  – начальная фаза.

4.12.  $\varepsilon = 6$ .

4.13.  $q(t) = 10^{-4} \cos(500t)$  Кл;  $i(t) = 0,05 \cos(500t + \pi/2)$  А;  $u(t) = 100 \cos(500t)$  В.

4.14.  $U_{\max} = 100$  В;  $\omega = 500$  рад/с;  $T = 4\pi$  мс;  $\nu = 1/4\pi$  кГц;  $q_m = 10^{-4}$  Кл;  $L = 4$  Гн.

4.15.  $5 \cdot 10^{-8}$  Дж;  $5 \cdot 10^{-8}$  Дж.

4.16. 0,6 Дж.

4.17. 120 мкДж; 40 мкДж.

4.18.  $5 \cdot 10^{-5}$  Дж.

4.19.  $10^{-3}$  ВТ.

4.20. 61 Гц.

4.21. 12,7 А; 0,58 рад.

5.1. а)  $n = e_x$ ,  $\omega = kv$ ,  $\lambda = 2\pi/k$ ,  $\xi''_{xx} = \xi/v^2$ ; б)  $n = -(e_x + e_y)/\sqrt{2}$ ,  
 $\omega = \sqrt{2}kv$ ,  $\lambda = \sqrt{2}\pi/k$ ,  $\xi''_{xx} + \xi''_{yy} = \xi/v^2$ ; в)  $n = (e_x - e_y)/\sqrt{2}$ ,  $\omega = \sqrt{2}kv$ ,  
 $\lambda = \sqrt{2}\pi/k$ ,  $\xi''_{xx} + \xi''_{yy} = \xi/v^2$ ; г)  $n = -e_z$ ,  $\omega = kv$ ,  $\lambda = 2\pi/k$ ,  $\xi''_{zz} = \xi/v^2$ .

5.2. 550 мкм.

5.3. 0,113 мкм.

5.4. 125 мм.

5.5.  $1^\circ 12'$ .

5.6.  $41^\circ 50'$ .

5.7. 1,48.

5.9. 55 %.

5.10. 5; 6; 0,5 мкм.

5.11. 5 полос на 1 см.

5.12. 0,4 мкм.

5.13.  $20^\circ$ .

5.14. 0,002 мм.

5.15.  $600 \text{ мм}^{-1}$ .

5.16.  $k > 5$ , спектры не перекрываются.

5.17. 0,25; 0,80.

5.18.  $\lambda = 36(4k+1)^{-1}$  мкм, где  $11 \leq k \leq 22$ .

5.19. 4,5 мм.

5.20.  $4,75 \cdot 10^{-12} \text{ м/В}^2$ .

6.1. 12,1 эВ.

6.2. 10,2 В.

6.3. 0,258 нм.

6.4. 1,76 фм.

6.5. 15 эВ.

6.6. 0,16.

6.7. 2;  $3,14 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-1}$ .

6.8. 0,609; 0,195.

6.9. 2,22 МэВ; 8,47 МэВ.

6.10. 5,71 МэВ.

6.11. 4,03 МэВ.

6.12.  $1,38 \cdot 10^{11}$ ;  $1,04 \cdot 10^{15}$ .

6.13. 543 кБк.

6.14. 15 мин.

6.15.  $10^{-4}$ .

6.16. 3,48 Дж.

6.17.  $\sqrt{3/5} V_{\max}$ .

6.18. 0,03.

6.19.  $\lambda_e/\lambda_p = m_p/m_e = 1840$ .

6.20. а)  $-\frac{\hbar^2}{2m} \psi'' = E\psi (0 \leq x \leq 1)$ . Общее решение уравнения может

быть представлено в виде  $\psi(x) = A \cos kx + B \sin kx$ , где  $k = (2mE)^{1/2}/\hbar$ ;

б)  $\psi(0) = \psi(1) = 0$ . Решения, удовлетворяющие этим граничным усло-

виям,  $\psi_n(x) = B \sin(\frac{n\pi}{1}x)$ ; в)  $B = (2/l)^{1/2}$ .

6.21.  $4^2s_{1/2}$ ;  $4^2p_{1/2, 3/2}$ ;  $4^2d_{3/2, 5/2}$ ;  $4^2f_{5/2, 7/2}$ .

6.22. а) один электрон; б) два электрона; в)  $2(2l + 1)$ ;

г)  $\sum_{l=0}^{n-1} 2(2l + 1) = 2n^2$ .

6.23. а) подболочка образуется электронами с одинаковыми числами  $n$  и  $l$ . Максимально возможное число электронов в подболочке  $2(2l + 1)$ ; б) оболочка образуется электронами с одинаковым числом  $n$ .

Максимальное число электронов в оболочке  $2 \sum_{l=0}^{n-1} (2l + 1) = 2n^2$ .

6.24. Полное число электронов в оболочке с номером  $ng_n = 2n^2$ ;  
 $g_1 = 2$ ;  $g_2 = 8$ ;  $g_3 = 18$ ;  $g_4 = 32$ ;  $g_5 = 50$ .

6.25.  $\tau \sim \hbar/\Delta E$ : а)  $\tau \approx 0,7 \cdot 10^{-19}$  с;  $\tau \approx 0,7 \cdot 10^{-21}$  с;  $\tau \approx 0,7 \cdot 10^{-23}$  с.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учебное пособие для практических занятий по физике составлено в соответствии с программой курса общей физики для технических специальностей высших учебных заведений. Физика как фундаментальная дисциплина позволяет объективно оценить закономерности окружающего мира и расширить кругозор студентов. С этой целью предлагаются основные типы задач по всем разделам физики.

В качестве дополнения в конце книги приведены таблицы физических величин и единиц их измерения. Таблицы даны более широко, чем необходимо для решения разбираемых задач. Учебное пособие позволит самостоятельно осмыслить теоретический материал, провести самоконтроль полученных знаний, разнообразить подготовку студентов к учебным занятиям.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ан, А. Ф.* Основы современной физики : учеб. пособие / А. Ф. Ан, А. В. Самохин. – Муром : Изд.-полигр. центр МИ ВлГУ, 2008. – 165 с. – ISBN 978-5-8439-0149-3.
2. *Волькенштейн, В. С.* Сборник задач по общему курсу физики / В. С. Волькенштейн. – М. : Наука, 1979. – 351 с.
3. *Галкин, А. Ф.* Лекции по физике. В 4 ч. Ч. 1. Механика / А. Ф. Галкин ; Владим. гос. ун-т. – Владимир : Ред.-изд. Комплекс ВлГУ, 2004. – 68 с. – ISBN 5-89368-473-7.
4. *Он же.* Лекции по физике: В 4 ч. Ч. 2. Молекулярная физика и термодинамика / А. Ф. Галкин ; Владим. гос. ун-т. – Владимир : Ред.-изд. Комплекс ВлГУ, 2005. – 76 с. – ISBN 5-89368-543-1.
5. *Он же.* Лекции по физике. В 4 ч. Ч. 3. Электромагнетизм / А. Ф. Галкин ; Владим. гос. ун-т. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2006. – 104 с. – ISBN 5-89368-658-6.
6. *Он же.* Лекции по физике. В 4 ч. Ч. 4. Колебания, волны, оптика / А. Ф. Галкин ; Владим. гос. ун-т. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2007. – 100 с. – ISBN 5-89368-710-8.
7. *Галкин, А. Ф.* Лекции по физике. Квантовая и ядерная физика / А. Ф. Галкин, Н. С. Прокошева ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2016. – 87 с. – ISBN 978-5-9984-0654-6.
8. *Детлаф, А. А.*, Курс физики / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. М. : Высш. шк., 1987. – 607 с. – ISBN 978-5-8114-0630-2.
9. *Иродов, И. Е.* Основные законы электромагнетизма / И. Е. Иродов. – М. : Высш. шк., 1983. – 279 с.
10. *Калашников, Э. Г.* Электричество / Э. Г. Калашников. – М. : Наука, 1977. – 590 с.
11. *Кингсеп, А. С.* Курс общей физики. Основы физики. В 2 т. Т. 1. Механика. Электричество и магнетизм. Колебания и волны. Волновая оптика / А. С. Кингсеп, Г. Р. Локшин, О. А. Ольхов. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 704 с. – ISBN 978-5-9221-0753-2.
12. Методические указания для подготовки к проверке остаточных знаний / Владим. гос. ун-т ; сост. : А. Ф. Галкин, В. В. Дорожков, Н. С. Прокошева ; под ред. А. Ф. Галкина. – Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2009. – 60 с.

13. Методические указания, программа, вопросы и задачи по физике / Владим. гос. ун-т. ; сост.: В. Н. Кунин, А. Ф. Галкин. – Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2007. – 124 с.
14. Погрешности измерений : учеб. пособие / О. Я. Бутковский [и др.] ; под ред. А. А. Кузнецова ; Владим. гос. ун-т. – Владимир : ВлГУ, 1998. – 68 с. – ISBN 5-89368-064-2.
15. *Савельев, И. В.* Курс общей физики : учебник. В 3 т. Т. 1. Механика. Молекулярная физика / И. В. Савельев. – 12-е изд., стер. – СПб. : Лань, 2017. – 436 с. – ISBN 978-5-8114-0630-2.
16. *Он же.* Сборник вопросов и задач по общей физике / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1982. – 271 с.
17. Сборник качественных вопросов и задач по общей физике : учеб. пособие для втузов / Е. И. Бабаджан [и др.]. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. – 400 с. – ISBN 5-02-014473-8.
18. *Трофимова, Т. И.* Курс физики / Т. И. Трофимова. – М. : Высш. шк., 1990. – 470 с.
19. Учебное пособие для самостоятельной работы по физике / авт.-сост. : А. А. Кулиш, Л. В. Фуров ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Из-во ВлГУ, 2017. – 128 с. – ISBN 978-5-9984-0822-9.
20. Физика : метод. указания для подготовки к интернет-экзамену (тестовые задания) / Владим. гос. ун-т ; сост. : А. Ф. Галкин, В. В. Дорожков ; под ред. А. Ф. Галкина. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2011. – 38 с.
21. Физика : метод. указания и контрол. задания для студентов-заочников инженер.-техн. специальностей вузов / под ред. А. Г. Чертова – М. : Высш. шк., 1987. – 208 с.
22. Физика : метод. указания для подготовки студентов к тестированию / Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых ; сост. : А. Ф. Галкин [и др.]. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2013. – 244 с.
23. Физика. Программа, методические указания и задачи для студентов-заочников (с примерами решения) / Владим. гос. ун-т ; сост. : А. Ф. Галкин [и др.] ; под ред. А. А. Кулиша. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2002. – 128 с.
24. *Чертов, А. Г.* Задачник по физике / А. Г. Чертов, А. А. Воробьев. – М. : Высш. шк., 1988. – 527 с.

### *Интернет-ресурсы*

25. IPRbooks [Электронный ресурс] : электрон.- библиотечная система. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/> (дата обращения: 30.06. 2018).

26. Библиотех [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vlsu.bibliotech.ru> (дата обращения: 30.06. 2018).

27. Консультант студента [Электронный ресурс] : студен. электрон. б-ка. – Режим доступа: [www.studentlibrary.ru](http://www.studentlibrary.ru) (дата обращения: 30.06. 2018).

28. ЛАНЬ [Электронный ресурс] : электрон.- библиотечная система. – Режим доступа: <http://e.lanbook.com/> (дата обращения: 30.06. 2018).

29. Электронная библиотека ВлГУ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://e.lib.vlsu.ru/> (дата обращения: 30.06. 2018).

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### 1. Основные физические постоянные

Физическая постоянная	Обозначение	Значение
Нормальное ускорение свободного падения	$g$	$9,81 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$
Гравитационная постоянная	$G$	$6,67\cdot 10^{-11} \text{ кг}^{-1}\cdot\text{м}^3\cdot\text{с}^{-2}$
Скорость света в вакууме	$c$	$3,00\cdot 10^8 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$
Постоянная Авогадро	$N_A$	$6,02\cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Молярная газовая постоянная	$R$	$8,31 \text{ Дж}\cdot\text{моль}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$
Молярный объём идеального газа при нормальных условиях ( $P_0 = 1 \text{ атм}$ , $T_0 = 273 \text{ К}$ )	$V_m$	$22,4\cdot 10^{-3} \text{ м}^3\cdot\text{моль}^{-1}$
Постоянная Больцмана	$k = R/N_A$	$1,38\cdot 10^{-23} \text{ Дж}\cdot\text{К}^{-1}$
Заряд электрона абсолютная величина	$e$	$1,60\cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Постоянная Фарадея	$F = N_A e$	$9,65\cdot 10^7 \text{ Кл}\cdot\text{моль}^{-1}$
Масса покоя электрона	$m_e$	$9,11\cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 4\pi\cdot 10^{-7} \text{ Гн}\cdot\text{м}^{-1}$	$1,26\cdot 10^{-6} \text{ Гн}\cdot\text{м}^{-1}$
Электрическая постоянная	$\epsilon_0 = (\mu_0 c^2)^{-1} = (4\pi c^2)^{-1}\cdot 10^7 \text{ Ф}\cdot\text{м}^{-1}$	$8,85\cdot 10^{-12} \text{ Ф}\cdot\text{м}^{-1}$
Масса покоя протона	$m_p$	$1,67\cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Масса покоя $\alpha$ -частицы	$m_\alpha$	$6,64\cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Постоянная Стефана – Больцмана	$\sigma$	$5,67\cdot 10^{-8} \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{К}^{-4}$
Постоянная закона смещения Вина	$b$	$2,90\cdot 10^{-3} \text{ м}\cdot\text{К}$
Постоянная Планка	$h$ $\hbar$	$6,63\cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$ $1,05\cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$
Постоянная Ридберга	$R$	$1,10\cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$
Радиус Бора	$a$	$0,529\cdot 10^{-10} \text{ м}$
Комптоновская длина волны электрона	$\Lambda$	$2,43\cdot 10^{-12} \text{ м}$
Магнетон Бора	$\mu_B$	$0,927\cdot 10^{-23} \text{ А}\cdot\text{м}^2$
Энергия ионизации атома водорода	$E_i$	$2,18\cdot 10^{-18} \text{ Дж}$ (13,6 эВ)

## 2. Некоторые астрономические величины

Астрономическая величина	Значение
Средний радиус Земли	$R_3 = 6,37 \cdot 10^6$ м
Масса Земли	$M_3 = 5,98 \cdot 10^{24}$ кг
Радиус Солнца	$R_c = 6,96 \cdot 10^8$ м
Масса Солнца	$M_c = 1,99 \cdot 10^{30}$ кг
Радиус Луны	$R_{л} = 1,74 \cdot 10^6$ м
Масса Луны	$M_{л} = 7,35 \cdot 10^{22}$ кг
Среднее расстояние между Землёй и Солнцем	1 а. е. = $1,49 \cdot 10^{11}$ м
Среднее расстояние между Землёй и Луной	$R = 3,84 \cdot 10^8$ м

## 3. Единицы некоторых физических величин

Физическая величина	Значение
Ангстрем	1 Å = $10^{-10}$ м = $10^{-8}$ см
Радян	1 рад = $57^{\circ} 17' 44,8'' = 57,3^{\circ}$
Атмосфера	1 атм = $1,0133 \cdot 10^5$ Па
Миллиметр ртутного столба	1 мм рт. ст. = $1,3332 \cdot 10^5$ Па
Электронвольт	1 эВ = $1,6022 \cdot 10^{-19}$ Дж
Атомная единица массы	1 а. е. м. = $1,660 \cdot 10^{-27}$ кг

## 4. Основные единицы СИ и их связь с внесистемными единицами

### Длина

**Метр** (м, m) представляет собой расстояние, проходимое в вакууме плоской электромагнитной волной за  $1/299792458$  долю секунды:

$$1 \text{ а. е. (астрономическая единица)} = 1,49598 \cdot 10^{11} \text{ м};$$

$$1 \text{ св. год (световой год)} = 9,4605 \cdot 10^{15} \text{ м};$$

$$1 \text{ пк (парсек)} = 3,0857 \cdot 10^{16} \text{ м}.$$

### Масса

**Килограмм** (кг, kg) равен массе международного прототипа килограмма:

$$1 \text{ т (тонна)} = 10^3 \text{ кг},$$

$$1 \text{ а. е. м. (атомная единица массы)} = 1,6605655 \cdot 10^{-27} \text{ кг}.$$

### Время

**Секунда** (с, s) равна  $9\,192\,631\,770$  периодов излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133:

$$1 \text{ мин (минута)} = 60 \text{ с},$$

$$1 \text{ ч (час)} = 3\,600 \text{ с},$$

$$1 \text{ сут (сутки)} = 86\,400 \text{ с}.$$

### *Сила электрического тока*

**Ампер** (А, A) равен силе неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызвал бы на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную  $2 \cdot 10^{-7}$  Н.

### *Термодинамическая температура*

**Кельвин** (К, K) равен  $1/273,16$  части термодинамической температуры тройной точки воды:

$$\frac{t}{^{\circ}\text{C}} = \frac{T}{\text{K}} - 273,15.$$

### *Количество вещества*

**Моль** (моль, mol) равен количеству вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой 0,012 кг.

### *Сила света*

**Кандела** (кд, kd) равна силе света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой  $540 \cdot 10^{12}$  Гц, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет  $(1/683)$  Вт/ср.

## **5. Дополнительные единицы**

### *Плоский угол*

**Радиан** (рад, rad) равен углу между двумя радиусами окружности, длина дуги между которыми равна радиусу:

$$1^{\circ} (\text{угл. градус}) = (\pi/180) \text{ рад};$$

$$1' (\text{угл. минута}) = (\pi/10\ 800) \text{ рад};$$

$$1'' (\text{угл. секунда}) = (\pi/648\ 000) \text{ рад}.$$

### *Телесный угол*

**Стерadian** (ср, sr) равен телесному углу с вершиной в центре сферы, вырезающему на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, по длине равной радиусу сферы.

## 6. Производные единицы

Наименование величины	Единица измерения	Обозначение единицы измерения		Определение
		русское	латинское	
<i>Площадь</i>	квадратный метр	м <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	Квадратный метр равен площади квадрата со сторонами, длины которых равны 1 м
<i>Объём</i>	кубический метр	м <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	Кубический метр равен объёму куба с рёбрами, длины которых равны 1 м
<i>Частота</i>	герц	Гц	Hz	Герц равен частоте периодического процесса, при которой за время 1 с происходит один цикл периодического процесса
<i>Плотность (объёмная масса)</i>	килограмм на кубический метр	кг/м <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	Килограмм на кубический метр равен плотности однородного вещества, масса которого при объёме 1 м <sup>3</sup> равна 1 кг
<i>Скорость</i>	метр в секунду	м/с	m/c	Метр в секунду равен скорости прямолинейно и равномерно движущейся точки, при которой точка за время 1 с перемещается на расстояние 1 м
<i>Угловая скорость</i>	радиан в секунду	рад/с	rad/s	Радиан в секунду равен угловой скорости равномерно вращающегося тела, при которой за время 1 с совершается поворот тела относительно оси вращения на угол 1 рад
<i>Ускорение</i>	метр на секунду в квадрате	м/с <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	Метр на секунду в квадрате равен ускорению прямолинейно и равноускоренно движущейся точки, при котором за время 1 с скорость точки возрастает на 1 м/с

Наименование величины	Единица измерения	Обозначение единицы измерения		Определение
		русское	латинское	
<i>Сила</i>	ньютон	Н	N	Ньютон равен силе, сообщающей телу массой 1 кг ускорение $1 \text{ м/с}^2$ в направлении действия силы
<i>Давление (механическое напряжение)</i>	ньютон на квадратный метр	Н/м <sup>2</sup>	N/m <sup>2</sup>	Паскаль равен давлению (механическому напряжению), вызываемому силой 1 Н, равномерно распределённой по нормальной к ней поверхности площадью $1 \text{ м}^2$
<i>Работа, энергия, количество теплоты</i>	джоуль	Дж	J	Джоуль равен работе, совершаемой при перемещении точки приложения силы 1 Н на расстояние 1 м в направлении действия силы
<i>Мощность</i>	ватт	Вт	W	Ватт равен мощности, при которой совершается работа 1 Дж за время 1 с
<i>Количество электричества (электрический заряд)</i>	кулон	К	С	Кулон равен количеству электричества, проходящего через поперечное сечение при токе силой 1 А за время 1 с
<i>Электрическое напряжение, разность электрических потенциалов, электродвижущая сила</i>	вольт	В	V	Вольт равен электрическому напряжению на участке электрической цепи, при котором в участке проходит постоянный ток силой 1 А и затрачивается мощность 1 Вт
<i>Напряжённость электрического поля</i>	вольт на метр	В/м	V/m	Вольт на метр равен напряжённости однородного электрического поля, при которой между двумя точками, находящимися на одной линии напряжённости поля на расстоянии 1 м, создаётся разность потенциалов 1 В

Наименование величины	Единица измерения	Обозначение единицы измерения		Определение
		русское	латинское	
<i>Электрическое сопротивление</i>	ом	Ом	$\Omega$	Ом равен электрическому сопротивлению участка электрической цепи, при котором постоянный ток силой 1 А вызывает падение напряжения 1 В
<i>Электрическая ёмкость</i>	фарад	Ф	F	Фарад равен электрической ёмкости конденсатора, при которой заряд 1 Кл создаёт на конденсаторе напряжение 1 В
<i>Поток магнитной индукции</i>	вебер	Вб	Wb	Вебер равен магнитному потоку, при убывании которого до нуля в сцеплённой с ним электрической цепи сопротивлением 1 Ом через поперечное сечение проводника проходит количество электричества 1 Кл
<i>Индуктивность</i>	генри	Гн	H	Генри равен индуктивности электрической цепи, с которой при силе постоянного тока в ней 1 А сцепляется магнитный поток 1 Вб
<i>Магнитная индукция</i>	тесла	Тл	T	Тесла равен магнитной индукции, при которой магнитный поток сквозь поперечное сечение площадью 1 м <sup>2</sup> равен 1 Вб
<i>Световой поток</i>	люмен	Лм	lm	Мощность оптического излучения по вызываемому им световому ощущению
<i>Яркость</i>	кандела на квадратный метр	кд/м <sup>2</sup>	Cd/m <sup>2</sup>	Яркость, поверхностно-пространственная плотность светового потока, исходящего от поверхности
<i>Освещённость</i>	люкс	лк	lx	Отношение светового потока, падающего на элемент поверхности, к площади этого элемента

## 7. Плотность твёрдых тел

Твёрдое тело	Плотность · 10 <sup>3</sup> , кг/м <sup>3</sup>	Твёрдое тело	Плотность · 10 <sup>3</sup> , кг/м <sup>3</sup>
Алюминий	2,70	Литий	0,53
Барий	3,50	Марганец	7,40
Ванадий	6,02	Медь	8,93
Вольфрам	19,3	Никель	8,90
Висмут	9,80	Платина	21,4
Железо	7,88	Свинец	11,3
Золото	19,3	Серебро	18,7
Каменная соль	2,20	Цезий	1,90
Латунь	8,55	Цинк	7,15

## 8. Плотность жидкостей

Жидкость	Плотность · 10 <sup>3</sup> , кг/м <sup>3</sup>	Жидкость	Плотность · 10 <sup>3</sup> , кг/м <sup>3</sup>
Вода (при 4 °С)	1,00	Ртуть	13,60
Глицерин	1,26	Сероуглерод	1,26
Керосин	0,81	Скипидар	0,87
Масло касторовое	0,96	Спирт	0,80
Масло оливковое	0,80	Эфир	0,70

## 9. Плотность газов

Газ	Плотность · 10 <sup>3</sup> , кг/м <sup>3</sup>	Газ	Плотность · 10 <sup>3</sup> , кг/м <sup>3</sup>
Азот	1,25	Воздух	1,29
Аргон	1,78	Гелий	0,18
Водород	0,09	Кислород	1,43

## 10. Упругие постоянные твёрдых тел

Вещество	Модуль Юнга $E$ , ГПа	Модуль сдвига $G$ , ГПа
Алюминий	69	24
Вольфрам	380	140
Железо (сталь)	200	76
Медь	98	44
Серебро	74	27

## 11. Эффективный диаметр молекул, динамическая вязкость и теплопроводность газов при нормальных условиях

Вещество	Эффективный диаметр $d$ , нм	Динамическая вязкость $\eta$ , мкПа·с	Теплопроводность $\lambda$ , мВт/(м·К)
Азот	0,38	16,6	24,3
Аргон	0,35	21,5	16,2
Водород	0,28	8,7	168,0
Воздух	–	17,2	24,1
Гелий	0,22	–	–
Кислород	0,36	19,8	24,4
Пары воды	–	8,3	15,8

## 12. Коэффициент поверхностного натяжения жидкостей

Жидкость	Коэффициент · 10 <sup>-3</sup> , Н/м	Жидкость	Коэффициент · 10 <sup>-3</sup> , Н/м
Вода	72	Ртуть	500
Мыльная пена	40	Спирт	22

## 13. Эффективный диаметр молекулы

Газ	Диаметр · 10 <sup>-10</sup> , м	Газ	Диаметр · 10 <sup>-10</sup> , м
Азот	3,0	Гелий	1,9
Водород	2,3	Кислород	2,7

## 14. Диэлектрическая проницаемость

Вещество	Проницаемость	Вещество	Проницаемость
Вода	81,0	Парафин	2,0
Масло трансформаторное	2,2	Стекло	7,0

## 15. Удельное сопротивление металлов

Металл	Удельное сопротивление, Ом·м	Металл	Удельное сопротивление, Ом·м
Железо	$9,8 \cdot 10^{-8}$	Гелий	$1,1 \cdot 10^{-6}$
Медь	$1,7 \cdot 10^{-8}$	Кислород	$1,6 \cdot 10^{-8}$

## 16. Энергия ионизации

Вещество	$E_i$ , Дж	$E_i$ , эВ
Водород	$2,18 \cdot 10^{-18}$	13,6
Гелий	$3,94 \cdot 10^{-18}$	24,6
Литий	$1,21 \cdot 10^{-17}$	75,6
Ртуть	$1,66 \cdot 10^{-18}$	10,4

## 17. Показатель преломления

Вещество	Показатель	Вещество	Показатель
Алмаз	2,42	Глицерин	1,47
Вода	1,33	Стекло	1,50

## 18. Работа выхода электронов

Металл	$A \cdot 10^{-19}$ , Дж	A, эВ
Калий	3,5	2,2
Литий	3,7	2,3
Платина	10,0	6,3
Рубидий	3,4	2,1
Серебро	7,5	4,7
Цезий	3,2	2,0
Цинк	6,4	4,0

## 19. Массы атомов лёгких изотопов

Изотоп	Символ	Масса, а. е. м.	Изотоп	Символ	Масса, а. е. м.
Нейтрон	${}_0^1\text{n}$	1,00867	Бериллий	${}_4^7\text{Be}$	7,01693
Водород	${}_1^1\text{H}$	1,00783		${}_4^9\text{Be}$	9,01219
	${}_1^2\text{H}$	2,01410	Бор	${}_5^{10}\text{B}$	10,01294
	${}_1^3\text{H}$	3,01605		${}_5^{11}\text{B}$	11,00930
Гелий	${}_2^3\text{He}$	3,01603	Углерод	${}_6^{12}\text{C}$	12,00000
	${}_2^4\text{He}$	4,00260		${}_6^{13}\text{C}$	13,00335
Литий	${}_3^6\text{Li}$	6,01513		${}_6^{14}\text{C}$	14,00324
	${}_3^7\text{Li}$	7,01601	Азот	${}_7^{14}\text{N}$	14,00307
			Кислород	${}_8^{16}\text{O}$	15,99491
				${}_8^{17}\text{O}$	16,99913

## 20. Масса и энергия покоя некоторых частиц

Частица	Масса покоя, $m_0$		Энергия покоя, $F_0$	
	кг	а. е. м.	Дж	МэВ
Электрон	$9,11 \cdot 10^{-31}$	0,00055	$8,16 \cdot 10^{-14}$	0,511
Протон	$1,672 \cdot 10^{-27}$	1,00728	$1,50 \cdot 10^{-10}$	938
Нейтрон	$1,675 \cdot 10^{-27}$	1,00867	$1,51 \cdot 10^{-10}$	939
Дейтрон	$3,35 \cdot 10^{-27}$	2,01355	$3,00 \cdot 10^{-10}$	1876
$\alpha$ -частица	$6,64 \cdot 10^{-27}$	4,00149	$5,96 \cdot 10^{-10}$	3733
Нейтральный $\pi$ -мезон	$2,41 \cdot 10^{-27}$	0,14498	$2,16 \cdot 10^{-10}$	135

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
Практическая работа № 1. МЕХАНИКА .....	4
Задачи для самостоятельного решения .....	18
Контрольное задание № 1. Таблица вариантов задач по разделу «Механика» .....	20
Практическая работа № 2. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА .....	21
Задачи для самостоятельного решения .....	36
Контрольное задание № 2. Таблица вариантов задач по разделу «Молекулярная физика и термодинамика» .....	38
Практическая работа № 3. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ .....	39
Задачи для самостоятельного решения .....	58
Контрольное задание № 3. Таблица вариантов задач по разделу «Электричество и магнетизм».....	62
Практическая работа № 4. КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ .....	63
Задачи для самостоятельного решения .....	76
Контрольное задание № 4. Таблица вариантов задач по разделу «Колебания и волны».....	78
Практическая работа № 5. ОПТИКА .....	79
Задачи для самостоятельного решения .....	90
Контрольное задание № 5. Таблица вариантов задач по разделу «Оптика» .....	92
Практическая работа № 6. ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ И АТОМНОЙ ФИЗИКИ. ФИЗИКА ТВЁРДОГО ТЕЛА .....	93
Задачи для самостоятельного решения .....	116
Контрольное задание № 6. Таблица вариантов задач по разделу Элементы квантовой механики и атомной физики. Физика твердого тела» .....	118
СПИСОК ПРИМЕРНЫХ ТЕМ РЕФЕРАТОВ .....	118
ОТВЕТЫ К ЗАДАЧАМ .....	120
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	125
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	126
ПРИЛОЖЕНИЕ .....	129

*Учебное издание*

Автор-составитель  
ФУРОВ Леонид Викторович

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ К ПРАКТИЧЕСКИМ РАБОТАМ ПО ФИЗИКЕ

Редактор А. П. Володина  
Технический редактор С. Ш. Абдуллаева  
Корректор О. В. Балашова  
Компьютерная верстка П. А. Некрасова, Ш. В. Абдуллаева  
Выпускающий редактор А. А. Амирсейидова

Подписано в печать 27.11.19.  
Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 8,14. Тираж 50 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.  
600000, Владимир, ул. Горького, 87.