

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра «Физика и химия»

И. О. ДЕЛИКАТНАЯ, Е. И. ДОЦЕНКО

ФИЗИКА

*Одобрено научно-методическими комиссиями
факультета «Управление процессами перевозок»
и военно-транспортного факультета в качестве
учебно-методического пособия для практических занятий*

Гомель 2018

УДК 53 (075.8)
ББК 22.3
Д29

Р е ц е н з е н т – д-р техн. наук, профессор *О. В. Холодилов* (БелГУТ).

Деликатная, И. О.

Д29 Физика : учеб.-метод. пособие для практических занятий / И. О. Деликатная, Е. И. Доценко ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2018. – 141 с.
ISBN 978-985-554-780-9

Приведены общие методические указания, вопросы для изучения теоретического материала по разделам программы курса физики, основная и дополнительная литература, сведения из теории, примеры решения задач, задачи и справочные таблицы.

Предназначено для студентов специальности «Транспортная логистика (по направлениям)» и «Управление подразделениями транспортных войск (по направлениям)».

УДК 53 (075.8)
ББК 22.3

ISBN 978-985-554-780-9

© Деликатная И. О., Доценко Е. И., 2018
© Оформление. БелГУТ, 2018

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

При подготовке к практическим занятиям по изучаемой теме следует воспользоваться лекционным материалом, учебниками и методическими пособиями из списка рекомендуемой литературы, при решении практических заданий рекомендуется использовать некоторые физические постоянные и табличные данные, представленные в приложении.

Целью практических занятий является обобщение и закрепление имеющихся у студентов знаний по изучаемым темам.

Задачами практических занятий являются:

- контроль уровня усвоения студентами основных понятий и закономерностей по рассматриваемой теме;
- формирование умения применять полученные теоретические знания для решения задач;
- приобретение умения составлять таблицы при систематизации и обобщении знаний;
- формирование умения выделять признаки сходства в описании изучаемых явлений.

Контроль за подготовкой к практическим занятиям осуществляется устным и (или) письменным ответом на вопросы, а также выполнением тестовых заданий.

СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Раздел 1. Механика

Тема 1.1. Элементы кинематики и динамики поступательного движения.

Пространственно-временные представления. Система отсчета. Основные физические модели: материальная точка, система материальных точек, абсолютно твердое тело, сплошная среда. Скалярные и векторные физические величины. Основные кинематические характеристики движения частиц и тел. Скорость и ускорение. Кинемати-

ка вращательного движения твердого тела. Угловая скорость и угловое ускорение. Уравнение движения. Масса и импульс. Законы Ньютона. Сила трения. Упругие силы. Сила тяжести и вес. Неинерциальные системы отсчета. Силы инерции.

Тема 1.2. Законы сохранения в механике, работа и энергия.

Законы сохранения импульса как фундаментальный закон природы. Реактивное движение. Центр масс (центр инерции) механической системы и закон его движения. Система центра масс. Работа. Кинетическая энергия. Мощность. Потенциальная энергия. Консервативные и неконсервативные силы. Закон сохранения энергии в механике и его связь с однородностью пространства. Общезначимый закон сохранения энергии. Удар абсолютно упругих и неупругих тел.

Тема 1.3. Элементы динамики вращательного движения твердого тела.

Главные оси и главные моменты инерции твердого тела. Моменты инерции некоторых тел правильной формы. Теорема Штейнера. Вращательный момент (момент силы). Момент импульса твердого тела, вращающегося вокруг неподвижной оси. Уравнение движения твердого тела, вращающегося вокруг неподвижной оси. Закон сохранения момента импульса твердого тела. Кинетическая энергия вращения твердого тела. Работа и мощность при вращении твердого тела.

Раздел 2. Молекулярная физика и термодинамика

Тема 2.1. Основы молекулярной физики.

Статистический и термодинамический методы. Тепловое движение частиц. Макроскопические параметры. Уравнение состояния идеального газа. Статистические распределения. Средняя кинетическая энергия частицы. Скорости теплового движения частиц. Распределение Больцмана. Барометрическая формула.

Тема 2.2. Основы термодинамики.

Первое начало термодинамики. Степени свободы молекул. Внутренняя энергия. Теплоемкость многоатомных газов. Теплоемкость твердых тел. Второе начало термодинамики. Обратимые и необратимые тепловые процессы. Круговые процессы. Тепловые машины и холодильники. Цикл Карно. Максимальный КПД тепловой машины. Энтропия, ее связь с термодинамической вероятностью. Статистический смысл второго начала термодинамики.

Тема 2.3. Реальные газы и особенности жидкого и твердого состояний вещества.

Явления переноса. Диффузия, внутреннее трение, теплопроводность. Свойства разреженных газов. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Теоретические и опытные изотермы реального газа. Критические состояния. Фазовые превращения. Фазовые диаграммы. Поверхностное натяжение. Капиллярные явления. Кристаллические и аморфные тела. Тепловое расширение твердых тел. Теплоемкость твердых тел.

Раздел 3. Электричество и магнетизм

Тема 3.1. Электростатическое поле.

Дискретность заряда и закон его сохранения. Закон Кулона. Напряженность электрического поля. Принцип суперпозиции. Электрический диполь. Электрическая теорема Гаусса и ее применение к расчету полей. Потенциал электрического поля. Работа электростатического поля. Потенциал поля и его связь с напряженностью. Циркуляция вектора напряженности электростатического поля.

Тема 3.2. Электрическое поле в веществе.

Диэлектрики и проводники в электростатическом поле. Поляризованность. Электрическое смещение. Теорема Гаусса для электрического поля в веществе. Емкость. Конденсаторы. Энергия электрического поля и ее объемная плотность.

Тема 3.3. Постоянный электрический ток проводимости в металлах, электролитах, газах и вакууме.

Законы Ома и Джоуля-Ленца. Правила Кирхгофа. Работа и мощность тока. Электропроводность металлов. Носители тока в металлах. Вывод законов электрического тока. Электрический ток в вакууме и газах. Термоэлектронная эмиссия. Ионизация газов. Независимый и самостоятельный газы. Плазма и ее свойства.

Тема 3.4. Магнитное поле. Электромагнитная индукция и электромагнитное поле.

Магнитная индукция. Закон Ампера. Сила Лоренца. Закон Био-Савара-Лапласа. Магнитные поля простейших систем. Магнитное поле движущегося заряда. Закон полного тока для магнитного поля в вакууме. Движение заряженных частиц в электрическом и магнитном полях. Эффект Холла и его применение. Ускоритель заряженных частиц. Магнитные моменты атомов и молекул. Типы магнетиков.

Намагниченность. Напряженность магнитного поля. Магнитная проницаемость среды. Ферромагнетики, их свойства и применение. Природа ферромагнетизма. Поток вектора магнитной индукции. Теорема Гаусса для магнитного поля. Опыты и закон Фарадея. Правило Ленца. Вихревые токи. Самоиндукция. Индуктивность. Взаимная индукция. Трансформатор. Энергия магнитного поля. Основы теории Максвелла для электромагнитного поля. Вихревое электрическое поле.

Раздел 4. Колебания и волны

Тема 4.1. Гармонические колебания (механические и электромагнитные).

Характеристики гармонических колебаний. Пружинный, физический и математический маятник. Энергия колебаний. Колебательный контур. Сложение колебаний. Затухающие колебания. Автоколебания. Вынужденные колебания. Резонанс. Переменный ток. Резонанс напряжений. Резонанс токов. Мощность переменного тока.

Тема 4.2. Волновые процессы.

Продольные и поперечные волны. Уравнение бегущей волны. Фазовая скорость, длина волны, волновое число. Групповая скорость. Энергия волны. Элементы акустики. Эффект Доплера. Ультразвук и его применение. Электромагнитные волны. Энергия электромагнитной волны. Применение электромагнитных волн.

Раздел 5. Оптика

Тема 5.1. Геометрическая оптика.

Основные законы геометрической оптики. Полное отражение. Световоды. Тонкие линзы, изображение предметов с помощью линз. Интерференция света. Когерентность и монохроматичность световых волн. Интерференция света в тонких пленках. Интерферометры. Дифракция света. Принцип Гюйгенса-Френеля. Метод зон Френеля. Дифракционная решетка. Дифракция на кристаллах. Понятие о голографии.

Тема 5.2. Взаимодействие света с веществом.

Дисперсия света. Поглощение света. Эффект Доплера. Поляризация света. Закон Малюса. Двойное лучепреломление. Характеристики теплового излучения. Абсолютно черное тело. Законы теплового излучения. Гипотеза и формула Планка. Оптическая пирометрия.

Внешний фотоэффект и его законы. Давление света. Эффект Комптона и его теория. Дуализм свойств электромагнитного излучения.

Раздел 6. Физика атома и ядра

Тема 6.1. Строение и свойства атомных ядер.

Постулаты Бора. Теория водородоподобных атомов. Спектр атома водорода. Гипотеза де Бройля. Дифракция электронов. Соотношение неопределенностей. Волновая функция и ее статистический смысл. Характеристики ядра. Нуклоны. Ядерные силы. Энергия связи. Модели ядра.

Тема 6.2. Радиоактивность. Элементарные частицы.

Радиоактивное излучение и его виды. Закон радиоактивного распада. Деление ядер. Ядерный реактор. Термоядерные реакции. Элементарные частицы. Классификация и взаимопревращаемость частиц. Переносчики фундаментальных взаимодействий. Кварки. Современная физическая картина мира.

Практическое занятие № 1

КИНЕМАТИКА МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ

Цель: обобщение и закрепление теоретического материала по теме «Кинематика материальной точки» и рассмотрение методики решения задач по данной теме.

Требования к исходному уровню знаний и умений

Знать определения следующих физических понятий:

- механическое движение;
- механика как раздел физики;
- кинематика как раздел механики;
- материальная точка, система материальных точек;
- тело отсчета, система отсчета;
- кинематические уравнения движения точки;
- траектория;
- криволинейное и прямолинейное движения;
- длина пути;
- перемещение;
- поступательное движение;
- вращательное движение.

Знать определение, уметь записать формулы, которыми они определяются, указать единицы измерения и направление (для векторных) следующих физических величин:

- средняя скорость;
- мгновенная скорость;
- средняя путевая скорость;
- мгновенное ускорение;
- тангенциальное ускорение;
- нормальное ускорение;
- угловое ускорение;
- период вращения;
- частота вращения.

Уметь записать основные уравнения кинематики для равноускоренного поступательного и вращательного движения.

Уметь записать формулы, связывающие кинематические величины, характеризующие поступательное и вращательное движение.

Сведения из теории

Положение материальной точки в пространстве задается 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 движения

$$\langle \vec{v} \rangle = \Delta \vec{r} / \Delta t,$$

где $\Delta \vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$ – перемещение материальной точки в интервале времени $\Delta t = t_2 - t_1$.

Средняя путевая скорость

$$\langle v_n \rangle = \Delta s / \Delta t,$$

где Δs – путь, пройденный точкой за интервал времени Δt .

Мгновенная скорость

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{i}v_x + \vec{j}v_y + \vec{k}v_z,$$

где $v_x = \partial x / \partial t$; $v_y = \partial y / \partial t$; $v_z = \partial z / \partial t$ – проекции скорости \vec{v} на оси координат.

Абсолютная величина скорости

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}.$$

Ускорение

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{i}a_x + \vec{j}a_y + \vec{k}a_z,$$

где $a_x = \partial v_x / \partial t$; $a_y = \partial v_y / \partial t$; $a_z = \partial v_z / \partial t$ – проекции ускорения \vec{a} на оси координат.

Абсолютная величина ускорения

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}.$$

При произвольном (криволинейном движении) ускорение можно представить как сумму нормального \vec{a}_n и тангенциального \vec{a}_τ ускорений:

$$\vec{a} = \vec{a}_n + \vec{a}_\tau.$$

Абсолютная величина этих ускорений

$$a_n = v^2 / R, \quad a_\tau = dv / dt, \quad a = \sqrt{a_n^2 + a_\tau^2},$$

где R – радиус кривизны в данной точке траектории.

Классификация движения, в соответствии с параметрами a_τ и a_n :

- 1) $a_\tau = 0$, $a_n = 0$ – прямолинейное равномерное движение;
- 2) $a_\tau = a = \text{const}$, $a_n = 0$ – прямолинейное равнопеременное движение.

При таком виде движения

$$a_\tau = a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1}.$$

Если начальный момент времени $t_1 = 0$, а начальная скорость $v_1 = v_0$, то, приняв $t_2 = t$ и $v_2 = v$, получим $a = \frac{v - v_0}{t}$, откуда $v = v_0 + at$.

Проинтегрировав эту формулу в пределах от нуля до произвольного момента времени t , найдем, что длина пути, пройденного точкой, в случае равнопеременного движения

$$s = \int_0^t v dt = \int_0^t (v_0 + at) dt = v_0 t + \frac{at^2}{2};$$

3) $a_t = f(t)$, $a_n = 0$ – прямолинейное движение с переменным ускорением;

4) $a_t = 0$, $a_n = \text{const}$. При $a_t = 0$ скорость изменяется только по направлению. Из формулы $a_n = \frac{v^2}{r}$ следует, что радиус кривизны должен быть постоянным. Следовательно, движение по окружности является равномерным;

5) $a_t = 0$, $a_n \neq 0$ – равномерное криволинейное движение;

6) $a_t = \text{const}$, $a_n \neq 0$ – криволинейное равнопеременное движение;

7) $a_t = f(t)$, $a_n \neq 0$ – криволинейное движение с переменным ускорением.

Кинематические уравнения движения материальной точки вдоль оси x :

а) при равномерном движении –

$$x = x_0 + vt, \quad v = \text{const}, \quad a_x = 0;$$

б) при равнопеременном движении –

$$x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}, \quad v_x = v_{0x} + a_x t, \quad a_x = \text{const}.$$

При вращательном движении положение твердого тела определяется углом поворота (угловым перемещением) φ . Кинематическое уравнение вращательного движения в общем виде

$$\varphi = f(t),$$

Средняя угловая скорость

$$\langle \omega \rangle = \Delta\varphi / \Delta t,$$

где $\Delta\varphi$ – изменение угла поворота за интервал времени Δt .

Мгновенная угловая скорость

$$\omega = d\varphi / dt.$$

Угловое ускорение

$$\varepsilon = d\omega / dt.$$

Кинематическое уравнение вращения тела:

а) при равномерном вращении ($\omega = \text{const}$, $\varepsilon = 0$) –

$$\varphi = \varphi_0 + \omega t ,$$

где φ_0 – начальное угловое перемещение; t – время;

б) при равнопеременном вращении ($\varepsilon = \text{const}$) –

$$\varphi = \varphi_0 + \omega_0 t + \varepsilon t^2 / 2, \quad \omega = \omega_0 + \varepsilon t,$$

где ω_0 – начальная угловая скорость; t – время;

в) частота вращения

$$n = N / t \quad \text{или} \quad n = 1 / T,$$

где N – число оборотов, совершаемых телом за время t ; T – период вращения (время одного полного оборота).

Связь между линейными и угловыми величинами, характеризующими движение материальной точки, принадлежащей вращающемуся телу:

а) длина пути, пройденного точкой по дуге окружности радиусом R при повороте тела на угол φ ,

$$s = \varphi R ;$$

б) линейная скорость точки

$$v = \omega R, \quad \vec{v} = \omega \vec{R} ;$$

в) тангенциальное ускорение точки

$$a_\tau = \varepsilon R, \quad \vec{a}_\tau = \varepsilon \vec{R} ;$$

г) нормальное ускорение точки

$$a_n = \omega^2 R, \quad \vec{a}_n = -\omega^2 \vec{R} .$$

Задания для практической части занятия

1 Материальная точка движется по окружности радиуса $R = 1,5$ м. Уравнение движения точки $\varphi = At + Bt^3$, где $A = 0,4$ рад/с, $B = 0,1$ рад/с³. Определить тангенциальное a_τ , нормальное a_n и полное a ускорения точки в момент времени $t = 3$ с.

2 Автомобиль движется со скоростью 20 м/с. На протяжении 30 м производится торможение, после чего скорость уменьшается до 10 м/с. Считая движение автомобиля равнозамедленным, найти ускорение и время торможения.

3 С балкона бросили мяч вертикально вверх с начальной скоростью $v_0 = 5$ м/с. Через $t = 3$ с мяч упал на землю. Определить высоту балкона над землей и скорость мяча в момент падения.

4 Колесо радиусом $R = 20$ см вращается с постоянным угловым ускорением $\varepsilon = 3 \text{ рад/с}^2$. Найти для точек на ободе колеса к концу второй секунды после начала движения: 1) угловую и линейную скорости; 2) тангенциальное, нормальное и полное ускорения.

5 Велосипедное колесо вращается с частотой $n = 3 \text{ с}^{-1}$. Под действием сил трения оно остановилось через интервал времени $\Delta t = 1$ мин. Определить угловое ускорение ε и число оборотов N , которое сделает колесо за это время.

6 Тело брошено со скоростью $v_0 = 15 \text{ м/с}$ под углом $\alpha = 30^\circ$ к горизонту. Пренебрегая сопротивлением воздуха, определите: 1) высоту подъема тела; 2) дальность полета (по горизонтали) тела; 3) время его движения.

7 Тело брошено под углом α к горизонту. Пренебрегая сопротивлением воздуха, определите этот угол, если максимальная высота подъема меньше дальности полета в 4,5 раза.

8 Тело брошено со скоростью $v_0 = 20 \text{ м/с}$ под углом $\alpha = 30^\circ$ к горизонту. Пренебрегая сопротивлением воздуха, определите для момента времени $t = 1,5$ с после начала движения: 1) нормальное ускорение; 2) тангенциальное ускорение.

9 Тело брошено горизонтально со скоростью $v_0 = 15 \text{ м/с}$. Пренебрегая сопротивлением воздуха, определить радиус кривизны траектории тела через $t = 2$ с после начала движения.

10 Зависимость пройденного пути от времени задается уравнением $s = A - Bt + Ct^2 + Dt^3$ ($A = 6 \text{ м}$; $B = 3 \text{ м/с}$; $C = 2 \text{ м/с}^2$; $D = 1 \text{ м/с}^3$). Определите для тела в интервале времени от $t_1 = 1$ до $t_2 = 4$ с: 1) среднюю скорость; 2) среднее ускорение.

11 Зависимость пройденного пути от времени задается уравнением $s = A - Bt + Ct^2 + Dt^3$ ($A = 6 \text{ м}$; $B = 3 \text{ м/с}$; $C = 0,2 \text{ м/с}^2$; $D = 1 \text{ м/с}^3$). Определите время после начала движения, когда ускорение a тела станет равным $2,8 \text{ м/с}^2$.

12 Нормальное ускорение точки, движущейся по окружности радиусом $R = 4 \text{ м}$, задается уравнением $a_n = A + Bt + Ct^2$ ($A = 1 \text{ м/с}^2$, $B = 6 \text{ м/с}^3$; $C = 9 \text{ м/с}^4$). Определите: 1) тангенциальное ускорение точки; 2) путь, пройденный точкой за время $t_1 = 5$ с после начала движения; 3) полное ускорение для момента времени $t_2 = 1$ с.

13 Материальная точка движется вдоль прямой так, что её ускорение линейно растет и за первые 10 с достигает значения 5 м/с^2 . Определите в конце десятой секунды: 1) скорость точки; 2) пройденный точкой путь.

14 Якорь электродвигателя, имеющий частоту вращения $n = 50 \text{ с}^{-1}$, после выключения тока, сделав $N = 628$ оборотов, остановился. Определить угловое ускорение ϵ якоря.

15 Колесо автомашины вращается равномерно. За время $t = 2$ мин оно изменило частоту вращения от 240 до 60 мин^{-1} . Определите: 1) угловое ускорение колеса; 2) число полных оборотов, сделанных колесом за это время.

16 Точка движется по окружности радиусом $R = 15$ м с постоянным тангенциальным ускорением a_τ . К концу четвертого оборота после начала движения линейная скорость точки $v_1 = 15 \text{ см/с}$. Определите нормальное ускорение точки через $t_2 = 16$ с после начала движения.

17 Диск вращается вокруг неподвижной оси так, что зависимость угла поворота радиуса диска от времени задается уравнением $\varphi = At^2$ ($A = 0,5 \text{ рад/с}^2$). Определите к концу второй секунды после начала движения: 1) угловую скорость диска; 2) угловое ускорение диска; 3) для точки, находящейся на расстоянии 80 см от оси вращения, тангенциальное, нормальное и полное ускорения.

Практическое занятие № 2

ДИНАМИКА ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Цель: обобщение и закрепление теоретического материала по теме «Динамика поступательного движения» и рассмотрение решения задач по данной теме.

Требования к исходному уровню знаний и умений

Знать определения следующих физических понятий:

- динамика как раздел механики;
- абсолютно твердое тело;
- инерция;
- инерциальные системы отсчета;
- замкнутая система;
- деформации упругая и пластическая;
- внешнее трение, внутреннее трение;
- невесомость, перегрузка;
- неинерциальные системы отсчета.

Знать определения следующих физических величин, уметь записать формулы, которыми они определяются, указать единицы измерения и направление (для векторных физических величин):

- масса;
- сила, результирующая сила;
- импульс;
- центр инерции (центр масс) системы материальных точек;
- скорость центра инерции;
- сила тяжести;
- ускорение свободного падения;
- вес тела;
- сила упругости;
- напряжение;
- относительная деформация;
- модуль Юнга;
- силы трения, сила трения качения.

Знать формулировку, уметь записать формулы, определяющие следующие физические законы:

- I закон Ньютона;
- II закон Ньютона;
- III закон Ньютона;
- закон Гука;
- закон Амонта-Кулона;
- закон трения скольжения;
- закон всемирного тяготения.

Уметь записать уравнения движения материальной точки.

Уметь записать в векторном виде принцип независимости действия сил.

Сведения из теории

Первый закон Ньютона:

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = 0,$$

где $\sum_{i=1}^n \vec{F}_i$ – векторная сумма всех n сил, действующих на тело; \vec{F}_i – i -я сила, являющаяся одной из этих сил от первой до n -й, при $v = \text{const}$ или $a = 0$.

Второй закон Ньютона:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m},$$

где \vec{a} – ускорение; m – масса.

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

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i \quad \text{или} \quad m\vec{a} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i,$$

где $\sum_{i=1}^n \vec{F}_i$ – геометрическая сумма сил, действующих на материальную точку; $\vec{p} = m\vec{v}$ – импульс;

– в координатной (скалярной) форме –

$$ma_x = \sum F_{x_i}, \quad ma_y = \sum F_{y_i}, \quad ma_z = \sum F_{z_i}.$$

Третий закон Ньютона:

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2.$$

Знак « \leftrightarrow » в этом уравнении указывает на противоположную направленность векторов сил.

Напряжение:

$$\sigma = \frac{F}{S},$$

где F – модуль силы упругости, направленной по нормали к поверхности, действующей на единицу площади поперечного сечения тела.

Относительное изменение длины стержня (продольная деформация)

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l};$$

относительное поперечное растяжение (сжатие)

$$\varepsilon' = \frac{\Delta d}{d},$$

где d – диаметр стержня.

Деформации ε и ε' всегда имеют разные знаки (при растяжении Δl положительно, а Δd отрицательно, при сжатии Δl отрицательно, а Δd положительно). Из опыта вытекает взаимосвязь ε и ε' :

$$\varepsilon' = -\mu\varepsilon,$$

где μ – положительный коэффициент, зависящий от свойств материала и называемый коэффициентом Пуассона.

Для малых деформаций

$$\sigma = E\varepsilon,$$

где E – коэффициент пропорциональности, называемый модулем Юнга.

Сила упругости

$$F_{\text{упр}} = -kx,$$

где k – коэффициент упругости (жесткость); x – абсолютная деформация.

Сила трения

$$F_{\text{тр}} = \mu N,$$

где μ – коэффициент трения скольжения; N – сила нормального давления.

Закон трения скольжения:

$$F_{\text{тр}} = \mu_{\text{ист}}(N + Sp_0),$$

где $\mu_{\text{ист}}$ – истинный коэффициент трения скольжения; S – площадь контакта между телами; p_0 – добавочное давление, обусловленное силами межмолекулярного притяжения, которые быстро уменьшаются с увеличением расстояния между частицами.

Сила трения качения определяется по закону, установленному Кулоном:

$$F_{\text{тр}} = f_k \frac{N}{r},$$

где f_k – коэффициент трения качения, имеющий размерность длины; r – радиус катящегося тела.

Сила гравитационного взаимодействия

$$F_{\text{тр}} = G \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

где G – гравитационная постоянная; m_1 и m_2 – массы взаимодействующих тел, рассматриваемых как материальные точки; r – расстояние между ними.

Сила тяжести

$$\vec{P} = m\vec{g},$$

где \vec{g} – ускорение свободного падения.

Если тело расположено на высоте h от поверхности Земли, тогда

$$P = G \frac{mM}{(R_0 + h)^2},$$

где m – масса тела; M – масса Земли; R_0 – радиус Земли, то есть сила тяжести с удалением от поверхности Земли уменьшается.

Задания для практической части занятия

1 К нити подвешен груз массой $m = 1$ кг. Найти натяжение нити, если нить с грузом: 1) поднимается с ускорением $a = 5 \text{ м/с}^2$; 2) опускается с тем же ускорением.

2 Тело скользит равномерно по наклонной плоскости, угол наклона которой 30° . Определить коэффициент трения тела о плоскость.

3 Шар на нити подвешен к потолку трамвайного вагона. Вагон тормозится, и его скорость за время $t = 3$ с равномерно уменьшается от $v_1 = 18 \text{ км/ч}$ до $v_2 = 6 \text{ км/ч}$. На какой угол α отклонится при этом нить с шаром?

4 Трактор $m = 8$ т проходит по мосту со скоростью $v = 36 \text{ км/ч}$. Какова сила давления трактора на середину моста, если мост выпуклый и имеет радиус кривизны 200 м ?

5 К нити подвешен груз массой 500 г. Определите силу натяжения нити, если нить с грузом: 1) поднимать с ускорением 2 м/с^2 ; 2) опускать с ускорением 2 м/с^2 .

6 С вершины клина, длина которого 2 м и высота 1 м, начинает скользить небольшое тело. Коэффициент трения между телом и клином $\mu = 0,15$. Определите: 1) ускорение, с которым движется тело; 2) время прохождения тела вдоль клина; 3) скорость тела у основания клина.

7 Тело, съехав по наклонной плоскости с углом $\alpha = 37^\circ$ к горизонту и длиной 80 см, проходит по горизонтали путь 1 м. Определите коэффициент трения между телом и поверхностью, считая его постоянным.

8 На наклонной плоскости с углом наклона $\alpha = 30^\circ$ к горизонту находится брусок массой 2 кг, на который действует горизонтальная прижимающая сила. Определите коэффициент трения между бруском и наклонной плоскостью, если брусок начинает скользить при силе, равной 8 Н .

9 Грузы одинаковой массы ($m_1 = m_2 = 0,5$ кг) соединены нитью и перекинуты через невесомый блок, укрепленный на конце стола. Коэффициент трения груза m_1 о стол $\mu = 0,15$. Пренебрегая трением в блоке, определите: 1) ускорение, с которым движутся грузы; 2) силу натяжения нити.

10 Система грузов массами $m_1 = 0,5$ кг, $m_2 = 0,6$ кг, соединенных нитью и перекинутой через невесомый блок, укрепленный на конце стола, находится в лифте, движущемся вверх с ускорением $a = 4,9$ м/с². Определите силу натяжения нити, если коэффициент трения между грузом массой m_1 и опорой $\mu = 0,1$.

11 Две пружины жесткостью $k_1 = 0,3$ кН/м и $k_2 = 0,8$ кН/м соединены последовательно. Определить абсолютную деформацию x_1 первой пружины, если вторая деформирована на $x_2 = 1,5$ см.

12 Определить жесткость системы пружин при их последовательном и параллельном соединениях. Жесткость пружин $k_1 = 2$ кН/м и $k_2 = 6$ кН/м.

13 К проволоке диаметром $d = 2$ мм подвешен груз массой $m = 1$ кг. Определить напряжение σ , возникающее в проволоке.

14 К стальному стержню длиной $l = 3$ м и диаметром $d = 2$ см подвешен груз массой $m = 2,5$ т. Определить напряжение σ в стержне, относительное ε и абсолютное Δl удлинения стержня.

15 К вертикальной проволоке длиной $l = 5$ м и площадью поперечного сечения $S = 2$ мм² подвешен груз массой $m = 5,1$ кг. В результате проволока удлинилась на $\Delta l = 0,6$ мм. Найти модуль Юнга материала проволоки.

16 Проволока длиной $l = 2$ м и диаметром $d = 1$ мм натянута горизонтально. Когда к середине проволоки подвесили груз массой $m = 1$ кг, проволока растянулась настолько, что точка подвеса опустилась на $h = 4$ см. Определить модуль Юнга материала проволоки.

17 Свинцовая проволока подвешена в вертикальном положении за верхний конец. Какую наибольшую длину l может иметь проволока, не обрываясь под действием силы тяжести? Предел прочности свинца $\sigma_{\text{пр}} = 12,3$ МПа.

18 Гирия массой $m = 10$ кг, привязанная к проволоке, вращается с частотой $n = 2$ с⁻¹ вокруг вертикальной оси, проходящей через конец проволоки, скользя при этом без трения по горизонтальной поверхности. Длина проволоки $l = 1,2$ м, площадь её поперечного сечения $S = 2$ мм². Найти напряжение металла проволоки. Массой проволоки пренебречь.

19 Радиус Земли в $n = 3,66$ раза больше радиуса Луны; средняя плотность Земли в $k = 1,66$ раза больше средней плотности Луны. Определить ускорение свободного падения $g_л$ на поверхности Луны, если на поверхности Земли ускорение свободного падения считать известным.

20 Радиус малой планеты $R = 250$ км, средняя плотность $\rho = 3$ г/см³. Определить ускорение свободного падения g на поверхности планеты.

21 Период вращения искусственного спутника Земли равен 2 ч. Считая орбиту спутника круговой, найти, на какой высоте h над поверхностью Земли движется спутник.

22 Стационарный искусственный спутник движется по окружности в плоскости земного экватора, оставаясь над одним и тем же пунктом земной поверхности. Определить угловую скорость ω спутника и радиус его орбиты R .

23 Диск радиусом $R = 40$ см вращается вокруг вертикальной оси. На краю диска лежит кубик. Принимая коэффициент трения равным 0,4, найти частоту вращения, при которой кубик соскользнет с диска.

24 Самолет описывает петлю Нестерова радиусом $R = 200$ м. Во сколько раз сила, с которой летчик давит на сиденье в нижней точке, больше силы тяжести летчика, если скорость самолета 100 м/с.

25 Грузик, привязанный к шнуру длиной $l = 50$ см, описывает окружность в горизонтальной плоскости. Определите период обращения, если нить отклонилась на угол 60° от вертикали.

Практическое занятие № 3

РАБОТА И ЭНЕРГИЯ

Цель: обобщение и закрепление теоретического материала по теме «Реактивное движение. Уравнение движения тела переменной массы. Энергия, работа, мощность» и рассмотрение решения задач по данной теме.

Требования к исходному уровню знаний и умений

Знать определения следующих физических понятий:

- реактивное движение;
- энергия;
- работа силы;

- кинетическая энергия;
- потенциальные поля;
- консервативные силы;
- диссипативные силы;
- потенциальная энергия.

Знать определения следующих физических величин, уметь записать формулы, которыми они определяются, указать единицы измерения и направление (для векторных физических величин):

- реактивная сила;
- элементарная работа силы;
- мощность;
- кинетическая энергия механической системы;
- потенциальная энергия силового поля;
- потенциальная энергия упругодеформированного тела;
- потенциальная энергия гравитационного взаимодействия;
- полная механическая энергия системы.

Знать формулировку, уметь записать формулы, определяющие следующие физические законы:

- закон движения центра масс.

Уметь записать уравнения движения тела переменной массы и формулу Циолковского.

Уметь графически представить работу силы.

Сведения из теории

Уравнение движения тела переменной массы

$$m\vec{a} = \vec{F} + \vec{F}_p,$$

где m – масса ракеты; $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$ – ускорение; v – скорость ракеты;

$\vec{F}_p = -\vec{u} \frac{dm}{dt}$ – реактивная сила; \vec{u} – скорость истечения газов относительно ракеты. Если вектор \vec{u} противоположен \vec{v} по направлению, то ракета ускоряется, а если совпадает с \vec{v} , то тормозится.

Формула Циолковского:

$$v = u \ln \frac{m_0}{m},$$

где m_0 – стартовая масса ракеты.

Работа силы:

а) постоянной – $A = F \Delta r \cos \alpha$;

б) переменной – $A = \int F(r) \cos \alpha dr$,

где α – угол между направлениями силы \vec{F} и перемещением $\Delta \vec{r}$.

Мощность:

а) средняя – $\langle N \rangle = A / \Delta t$;

б) мгновенная – $N = dA / dt$ или $N = Fv \cos \alpha$.

Кинетическая энергия материальной точки (или тела, движущегося поступательно)

$$T = \frac{m v^2}{2}; \quad T = \frac{p^2}{2m}.$$

Кинетическая энергия системы из n материальных точек

$$T = \sum_{i=1}^n \frac{m_i v_i^2}{2},$$

где v_i – скорость i -й материальной точки массой m_i

Потенциальная энергия упруго деформированного тела

$$\Pi = \frac{kx^2}{2}.$$

Потенциальная энергия гравитационного взаимодействия

$$\Pi = -G \frac{m_1 m_2}{r}.$$

Сила, действующая на данное тело в данной точке поля, и потенциальная энергия связаны соотношением

$$\vec{F} = -\text{grad}\Pi \quad \text{или} \quad \vec{F} = -\left(\vec{i} \frac{\partial \Pi}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial \Pi}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial \Pi}{\partial z} \right).$$

Потенциальная энергия тела, находящегося в однородном поле силы тяжести,

$$\Pi = mgh,$$

где h – высота тела над уровнем, принятым за нулевой для отсчета потенциальной энергии. Эта формула справедлива при $h \ll R_3$ (R_3 – радиус Земли).

Задания для практической части занятия

1 Лифт массой 1 т начинает подниматься с ускорением $0,3 \text{ м/с}^2$. Определить работу силы тяги подъема лифта за первые 5 с движения.

2 Тело массой $m = 5 \text{ кг}$ поднимают с ускорением $a = 2 \text{ м/с}^2$. Определить работу силы в течение первых 5 секунд.

3 Вычислить работу, совершаемую при равноускоренном подъеме груза массой $m = 100 \text{ кг}$ на высоту $h = 4 \text{ м}$ за время $t = 2 \text{ с}$.

4 Автомобиль движется со скоростью 60 км/ч. Коэффициент трения между шинами и дорогой 0,75. Определить минимальное расстояние, на котором машина может быть остановлена.

5 Верхний конец стального стержня длиной $l = 5 \text{ м}$ с площадью поперечного сечения $S = 4 \text{ см}^2$ закреплен неподвижно, к нижнему подвешен груз массой $m = 2 \cdot 10^3 \text{ кг}$. Определить: 1) нормальное напряжение σ материала стержня; 2) абсолютное x и относительное ε удлинения стержня; 3) потенциальную энергию P растянутого стержня.

6 Нагруженная песком железнодорожная платформа с начальной массой m_0 начинает движение из состояния покоя под воздействием постоянной силы тяги F . Через отверстие в дне платформы высыпается песок с постоянной скоростью μ (кг/с). Определите $v(t)$, т.е. зависимость скорости платформы от времени.

7 Ракета, масса которой в начальный момент времени $m_0 = 2 \text{ кг}$, запущена вертикально вверх. Относительная скорость выхода продуктов сгорания $u = 150 \text{ м/с}$, расход горючего $\mu = 0,2 \text{ кг/с}$. Пренебрегая сопротивлением воздуха, определите ускорение a ракеты через $t = 3 \text{ с}$ после начала её движения.

8 Ракета, масса которой в начальный момент времени $m_0 = 300 \text{ г}$, начинает выбрасывать продукты сгорания с относительной скоростью $u = 200 \text{ м/с}$. Расход горючего $\mu = 0,21 \text{ кг/с}$. Пренебрегая сопротивлением воздуха, определите: 1) за какой промежуток времени скорость ракеты станет равной $v_1 = 50 \text{ м/с}$; 2) скорость v_2 , которой достигнет ракета, если масса заряда $m_0 = 0,2 \text{ кг}$.

9 Материальная точка массой $m = 1 \text{ кг}$ двигалась под действием некоторой силы согласно уравнению $s = A - Bt + Ct^2 - Dt^3$ ($A = 6 \text{ м}$; $B = 3 \text{ м/с}$; $C = 5 \text{ м/с}^2$; $D = 1 \text{ м/с}^3$). Определить мощность, затрачиваемую на движение точки в момент времени $t = 1 \text{ с}$.

10 Груз массой $m = 100 \text{ кг}$ поднимают вдоль наклонной плоскости с ускорением $a = 0,5 \text{ м/с}^2$. Длина наклонной плоскости $l = 3 \text{ м}$,

угол α её наклона к горизонту равен 30° , коэффициент трения $\mu = 0,2$. Определить работу, совершаемую подъемным устройством, среднюю мощность подъемного устройства.

11 Тело массой $m = 0,4$ кг скользит с наклонной плоскости высотой $h = 10$ см и длиной $l = 1$ м. Коэффициент трения на всем пути $\mu = 0,04$. Определите кинетическую энергию тела у основания плоскости; путь пройденный телом на горизонтальном участке до остановки.

12 Материальная точка массой $m = 20$ г движется по окружности радиусом $R = 10$ см с постоянным тангенциальным ускорением. К концу пятого оборота после начала движения кинетическая энергия материальной точки оказалась равной $6,3$ мДж. Определите тангенциальное ускорение.

13 Пружина жесткостью $k = 10$ кН/м сжата силой $F = 200$ Н. Определить работу внешней силы, дополнительно сжимающей эту пружинку ещё на 1 см.

14 Пружина жесткостью $k = 1$ кН/м была сжата на 4 см. Какую нужно совершить работу, чтобы сжатие пружины увеличить до 18 см.

15 Стальной стержень длиной $l = 2$ м и площадью поперечного сечения $S = 2$ см² растягивается силой 10 кН. Найти потенциальную энергию $П$ растянутого стержня и объемную плотность w энергии.

16 Зависимость потенциальной энергии $П$ тела в центральном силовом поле от расстояния r до центра поля задается функцией

$П r = \left(\frac{A}{r^2} - \frac{B}{r} \right)$ ($A = 6$ мкДж·м², $B = 0,3$ мДж·м). Определите, при

каких значениях r максимальное значение принимают: 1) потенциальная энергия тела; 2) сила, действующая на тело.

Практическое занятие № 4

ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В МЕХАНИКЕ

Цель: обобщение и закрепление теоретического материала по теме «Закон сохранения импульса. Центр масс. Закон сохранения механической энергии. Удар абсолютно упругих и неупругих тел» и рассмотрение методики решения задач по данной теме.

Требования к исходному уровню знаний и умений

Знать определения следующих физических понятий:

- механическая система;
- внешние силы, внутренние силы;
- замкнутая система;
- центр инерции;
- консервативные системы;
- однородность времени;
- однородность пространства;
- диссипация энергии;
- упругий и неупругий удар.

Знать определения следующих физических величин, уметь записать формулы, которыми они определяются, указать единицы измерения и направление (для векторных физических величин):

- центр масс;
- коэффициент восстановления для соударяющихся тел.

Знать формулировку, уметь записать формулы, определяющие следующие физические законы:

- сохранения импульса;
- движения центра масс;
- сохранения механической энергии;
- сохранения и превращения энергии;
- сохранения импульса для упругого удара;
- сохранения импульса для неупругого удара;
- сохранения кинетической энергии для упругого удара.

Уметь записать изменение кинетической энергии для неупругого удара.

Сведения из теории

Закон сохранения импульса:

$$\sum_{i=1}^n \vec{P}_i = \text{const} \quad \text{или} \quad \sum_{i=1}^n m_i \vec{v}_i = \text{const},$$

где n – число материальных точек (тел), входящих в систему.

Радиус-вектор центра масс (или центра инерции) системы материальных точек

$$r_C = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \vec{r}_i}{m},$$

где m_i и \vec{r}_i – соответственно масса и радиус-вектор i -й материальной точки; n – число материальных точек в системе; $m = \sum_{i=1}^n m_i$ – масса системы.

Координаты центра масс системы материальных точек:

$$x_c = \frac{\sum m_i x_i}{\sum m_i}, \quad y_c = \frac{\sum m_i y_i}{\sum m_i}, \quad z_c = \frac{\sum m_i z_i}{\sum m_i},$$

где m_i – масса i -й материальной точки; x_i, y_i, z_i – ее координаты.

Скорость центра масс

$$v_c = \frac{dr_c}{dt} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \frac{d\vec{r}_i}{dt}}{m} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \vec{v}_i}{m}.$$

Учитывая, что $\vec{p}_i = m_i \vec{v}_i$, а $\sum_{i=1}^n \vec{p}_i$ есть импульс \vec{p} системы, можно записать:

$$\vec{p} = m \vec{v}_c,$$

т. е. импульс системы равен произведению массы системы на скорость ее центра масс.

Закон движения центра масс:

$$m \frac{d\vec{v}_c}{dt} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n.$$

Закон сохранения энергии в механике (для замкнутых консервативных систем):

$$T + \Pi = \text{const}.$$

Коэффициент восстановления соударяющихся тел

$$\varepsilon = \frac{v'_n}{v_n},$$

где v_n и v'_n – нормальные составляющие относительной скорости тел до и после удара.

Если для сталкивающихся тел $\varepsilon = 0$, то такие тела называются абсолютно неупругими, если $\varepsilon = 1$ – абсолютно упругими.

Для абсолютно упругого удара выполняются закон сохранения импульса:

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{v}'_1 + m_2 \vec{v}'_2$$

и закон сохранения кинетической энергии:

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_1 v_1'^2}{2} + \frac{m_2 v_2'^2}{2},$$

где m_1 и m_2 – массы соударяющихся тел; \vec{v}_1 и \vec{v}_2 – скорости тел до удара, \vec{v}'_1 и \vec{v}'_2 – после удара.

Закон сохранения импульса для абсолютно неупругого удара:

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = (m_1 + m_2) \vec{v},$$

где v – скорость движения шаров после удара.

Задания для практической части занятия

1 Охотник стреляет с легкой надувной лодки, находящейся в покое. Какую скорость приобретает лодка в момент выстрела, если масса охотника с лодкой 70 кг, масса дроби 35 г, начальная скорость дроби 320 м/с? Ствол ружья во время выстрела направлен под углом 60° к горизонту. Сопротивлением воды пренебречь.

2 Ракета установлена на поверхности Земли и запускается вертикально. При какой минимальной скорости, сообщенной ракете, она удалится от поверхности на расстояние, равное радиусу Земли?

3 При выстреле из орудия снаряд получил начальную скорость 300 м/с и летит вертикально вверх. На какой высоте над местом выстрела его кинетическая энергия будет равна потенциальной? Сопротивлением воздуха пренебречь.

4 Два шара массами $m_1 = 1$ кг и $m_2 = 0,5$ кг движутся навстречу друг другу со скоростями $v_1 = 4$ м/с и $v_2 = 1$ м/с. Определить скорость шаров после прямого, неупругого удара и кинетические энергии шаров до и после удара.

5 Снаряд массой $m = 5$ кг, вылетевший из орудия, в верхней точке траектории имеет скорость $v = 300$ м/с. В этой точке он разорвался на два осколка, причем больший осколок массой $m_1 = 3$ кг полетел в обратном направлении со скоростью $v_1 = 100$ м/с. Определите скорость второго, меньшего, осколка.

6 Снаряд, вылетевший из орудия со скоростью v_0 , разрывается на два одинаковых осколка в верхней точке траектории на расстоянии l

(горизонтали). Один из осколков полетел в обратном направлении со скоростью движения снаряда до разрыва. Пренебрегая сопротивлением воздуха, определите, на каком расстоянии (по горизонтали) от орудия упадет второй осколок.

7 На железнодорожной платформе, движущейся по инерции со скоростью $v_0 = 3$ км/ч, укреплено орудие. Масса платформы с орудием $M = 10$ т. Ствол орудия направлен в сторону движения платформы. Снаряд массой $m = 10$ кг вылетает из ствола под углом $\alpha = 60^\circ$ к горизонту. Определите скорость снаряда (относительно Земли), если после выстрела скорость платформы уменьшилась в 2 раза.

8 Платформа с песком общей массой $M = 2$ т стоит на рельсах на горизонтальном участке пути. В песок попадает снаряд массой $m = 8$ кг и застревает в нем. Пренебрегая трением, определите, с какой скоростью будет двигаться платформа, если в момент попадания скорость снаряда $v = 450$ м/с, а ее направление – сверху вниз под углом $\alpha = 30^\circ$ к горизонту.

9 Определите положение центра масс системы, состоящей из четырех шаров, массы которых равны соответственно m , $2m$, $3m$ и $4m$, в следующих случаях: а) шары расположены на одной прямой; б) шары расположены по вершинам квадрата центр системы координат m ; в) шары расположены по четырем смежным вершинам куба. Во всех случаях расстояние между соседними шарами равно 15 см.

10 Определите координаты центра масс системы, состоящей из четырех шаров массами m , $2m$, $3m$ и $4m$, которые расположены в вершинах и центре равностороннего треугольника со стороной $a = 20$ см.

11 В пружинном пистолете для сжатия пружины на $x_0 = 8$ см надо затратить силу $F = 4$ Н. Определите скорость вылета пули массой $m = 100$ г, если пружину сжать на $x = 5$ см.

12 Пуля массой $m = 15$ г, летящая с горизонтальной скоростью $v = 0,5$ км/с, попадает в баллистический маятник $M = 6$ кг и застревает в нем. Определите высоту h , на которую поднимется маятник, откатнувшись после удара.

13 Пуля массой $m = 15$ г, летящая горизонтально, попадает в баллистический маятник длиной $l = 1$ м и массой $M = 1,5$ кг и застревает в нем. Маятник в результате этого отклонился на угол $\alpha = 30^\circ$. Определите скорость пули.

14 Пренебрегая трением, определите наименьшую высоту h , с которой должна скатываться тележка с человеком по желобу, переходя

дядеу в петлю радиусом $R = 6$ м, и не оторваться от него в верхней точке петли.

15 Шарик массой $m_1 = 20$ г, движущийся горизонтально, столкнулся с шаром массой $m_2 = 1$ кг, висащем на прямом недеформируемом и невесомом стержне длиной $l = 1$ м. Считая удар упругим, определить скорость шарика v_1 , если угол отклонения стержня после удара $\alpha = 22^\circ$.

16 Металлический шарик падает вертикально на мраморный пол с высоты $h_1 = 80$ см и отскакивает от него на высоту $h_2 = 72$ см. Определить коэффициент восстановления материала шарика.

Практическое занятие № 5

ВРАЩАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Цель: обобщение и закрепление теоретического материала по теме «Вращательное движение твердого тела» и рассмотрение методики решения задач по данной теме.

Требования к исходному уровню знаний и умений

Знать определения следующих физических понятий:

- момент инерции тела;
- момент импульса твердого тела;
- оси свободного вращения;
- главные оси инерции тела;
- гироскопический эффект.

Знать определения следующих физических величин, уметь записать формулы, которыми они определяются, указать единицы измерения и направление (для векторных физических величин):

- момент инерции системы (тела) относительно данной оси;
- кинетическая энергия вращающегося тела;
- момент силы относительно неподвижной точки;
- момент силы относительно неподвижной оси;
- плечо силы;
- момент импульса относительно неподвижной точки;
- моментом импульса относительно неподвижной оси.

Знать формулировку, уметь записать формулы, определяющие следующие физические законы:

- закон сохранения момента импульса.

Знать формулировку, уметь записать формулу теоремы Штейнера.

Уметь записать уравнение динамики вращательного движения твердого тела относительно неподвижной оси.

Сведения из теории

Момент инерции материальной точки

$$I = mr^2,$$

где m – масса точки; r – ее расстояние от оси вращения.

Момент инерции твердого тела

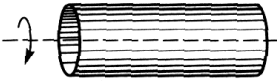

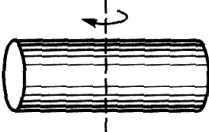
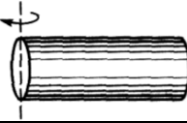

$$I = \sum_{i=1}^n \Delta m_i r_i^2,$$

в интегральной форме –

$$I = \int r^2 dm,$$

где r_i – расстояние элемента массы Δm_i от оси вращения.

Значения моментов инерции для некоторых тел (тела считаются однородными, m – масса тела) представлены в следующей таблице:

Тело	Положение оси вращения	Момент инерции
Полый тонкостенный цилиндр радиусом R	Ось симметрии 	$J = mR^2$
Сплошной цилиндр или диск радиусом R	Ось симметрии 	$J = \frac{1}{2}mR^2$
Прямой тонкий стержень длиной l	Ось перпендикулярна стержню и проходит через его середину 	$J = \frac{1}{12}ml^2$
Прямой тонкий стержень длиной l	Ось перпендикулярна стержню и проходит через его конец 	$J = \frac{1}{3}ml^2$
Шар радиусом R	Ось проходит через центр шара 	$J = \frac{2}{5}mR^2$

Теорема Штейнера. Момент инерции тела относительно произвольной оси

$$I = I_0 + ma^2,$$

где I_0 – момент инерции тела относительно оси, проходящей через центр инерции тела параллельно заданной оси; m – масса тела; a – расстояние между осями.

Момент силы \vec{F} , действующей на тело, относительно оси вращения:

$$M = F_{\perp} l,$$

где F_{\perp} – проекция силы \vec{F} на плоскость, перпендикулярную оси вращения; l – плечо силы \vec{F} (кратчайшее расстояние от оси вращения до линии действия силы).

Момент импульса вращающегося тела относительно оси

$$L = I\omega,$$

где I – момент инерции тела; ω – угловая скорость вращения тела.

Основное уравнение динамики вращательного движения твердого тела относительно неподвижной оси:

$$M = \frac{dL}{dt} \quad \text{или} \quad M = \frac{d(I\omega)}{dt}.$$

Если $I = \text{const}$, то

$$M = I\varepsilon,$$

где ε – угловое ускорение тела.

Закон сохранения момента импульса:

$$\sum_{i=1}^n L_i = \text{const},$$

где L_i – момент импульса тела с номером i , входящего в состав замкнутой системы тел.

Закон сохранения момента импульса для двух взаимодействующих тел:

$$I_1\omega_1 + I_2\omega_2 = I'_1\omega'_1 + I'_2\omega'_2,$$

где $I_1, I_2, \omega_1, \omega_2$ – моменты инерции и угловые скорости тел до взаимодействия; $I'_1, I'_2, \omega'_1, \omega'_2$ – те же величины после взаимодействия.

Работа постоянного момента силы M , действующего на вращающееся тело,

$$A = M\varphi,$$

где φ – угол поворота тела.

Мгновенная мощность, развиваемая при вращении тела

$$N = M\omega.$$

Кинетическая энергия вращающегося тела

$$T = I\omega^2 / 2.$$

Кинетическая энергия тела, катящегося по плоскости без скольжения,

$$T = mv^2 / 2 + I\omega^2 / 2,$$

где $mv^2 / 2$ – кинетическая энергия поступательного движения тела; v – скорость центра инерции тела; $I\omega^2 / 2$ – кинетическая энергия вращательного движения тела вокруг оси, проходящей через центр инерции.

Основные величины и уравнения, определяющие вращение тела вокруг неподвижной оси и его поступательное движение представлены в следующей таблице:

Поступательное движение		Вращательное движение	
Масса	m	Момент инерции	J
Скорость	$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}$	Угловая скорость	$\vec{\omega} = \frac{d\vec{\phi}}{dt}$
Ускорение	$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$	Угловое ускорение	$\vec{\varepsilon} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}$
Сила	\vec{F}	Момент силы	M_z или \vec{M}
Импульс	$\vec{p} = m\vec{v}$	Момент импульса	$L_z = J_z\omega$
Основное уравнение динамики	$\vec{F} = m\vec{a}$ $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$	Основное уравнение динамики	$M_z = J_z\varepsilon$ $\vec{M} = \frac{d\vec{L}}{dt}$
Работа	$dA = F_s ds$	Работа	$dA = M_z d\phi$
Кинетическая энергия	$T = \frac{mv^2}{2}$	Кинетическая энергия	$T = \frac{J_z\omega^2}{2}$

Задания для практической части занятия

1 Вал в виде сплошного цилиндра массой $m_1 = 10$ кг насажен на горизонтальную ось. На цилиндр намотан шнур, к свободному концу которого подвешена гиря массой $m_2 = 2$ кг. С каким ускорением будет опускаться гиря, если ее предоставить самой себе.

2 Платформа в виде диска радиусом $R = 1,5$ м и $m_1 = 180$ кг вращается по инерции около вертикальной оси с частотой $n = 10$ мин⁻¹. В центре платформы стоит человек массой $m_2 = 60$ кг. Какую линейную скорость относительно пола помещения будет иметь человек, если он перейдет на край платформы?

3 Определите момент инерции тонкого однородного стержня длиной $l = 1$ м и массой $m = 100$ г относительно оси, перпендикулярной стержню и проходящей через точку, отстоящую на $1/3$ его длины от конца стержня.

4 Определите момент инерции сплошного однородного диска радиусом $R = 40$ см и массой $m = 1$ кг относительно оси, проходящей через середину одного из радиусов перпендикулярно плоскости диска.

5 Физический маятник представляет собой стержень длиной $l = 1$ м и массой $m_1 = 1$ кг с прикрепленным к одному из его концов диском массой $m_2 = 0,5$ кг. Определите момент инерции такого маятника относительно оси, перпендикулярной плоскости в которой маятник совершает колебания и проходящей через точку, отстоящую на расстояние $l/3$ от конца стержня.

6 Шар радиусом $R = 10$ см и массой $m = 5$ кг вращается вокруг оси симметрии согласно уравнению $\varphi = A + Bt^2 + Ct^3$ ($A = 1$ рад, $B = 2$ рад/с²; $C = -0,5$ рад/с³). Определите момент сил для $t = 3$ с.

7 Вентилятор вращается с частотой $n = 600$ об/мин. После выключения он начал вращаться равнозамедленно и, сделав $N = 50$ оборотов, остановился. Работа A сил торможения равна 31,4 Дж. Определите момент сил торможения и момент инерции вентилятора.

8 Частота вращения маховика, момент инерции которого равен 120 кг·м², составляет $n = 240$ об/мин. После прекращения действия на него вращающего момента маховик под действием силы трения в подшипниках остановился за время $t = 3,14$ мин. Считая трение в подшипниках постоянным, определите момент сил трения.

9 Определите массу однородного сплошного диска, насаженного на ось, к ободу которого приложена постоянная касательная сила

$F = 40$ Н, если через $t = 5$ с после начала действия силы его кинетическая энергия составляла 2,5 кДж.

10 На однородный сплошной цилиндрический вал радиусом $R = 50$ см намотана легкая нить, к концу которой прикреплен груз массой $m = 6,4$ кг. Груз, разматывая нить, опускается с ускорением $a = 2$ м/с². Определите момент инерции вала, массу M вала.

11 Колесо радиусом $R = 30$ см и массой $m = 3$ кг скатывается без трения по наклонной плоскости длиной $l = 5$ м и углом наклона $\alpha = 25^\circ$. Определить момент инерции колеса, если его скорость в конце движения составляла 4,6 м/с.

12 С наклонной плоскости, составляющей угол $\alpha = 30^\circ$ с горизонтом, скатывается без скольжения шарик. Пренебрегая трением, определите время движения шарика по наклонной плоскости, если известно, что его центр масс при скатывании понизился на 30 см.

Практическое занятие № 6

МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Цель: обобщение и закрепление теоретического материала по теме «Основы молекулярной физики» и рассмотрение методики решения задач по данной теме.

Требования к исходному уровню знаний и умений

Знать определения следующих физических понятий:

- молекулярная физика;
- термодинамика;
- термодинамическая система;
- термодинамические параметры (параметры состояния);
- термодинамический процесс;
- идеальный газ;
- парциальное давление.

Знать определения следующих физических процессов:

- изотермический;
- изобарный;
- изохорный.

Знать определения следующих физических величин, уметь записать формулы, которыми они определяются, указать единицы измерения и значения.

- коэффициент объемного расширения;
- термический коэффициент давления газа;
- число Лошмидта.

Знать формулировку, уметь записать формулы, определяющие следующие физические законы:

- Бойля-Мариотта;
- Гей-Люссака;
- Шарля;
- объединенный газовый закон;
- Авогадро;
- Дальтона.

Уметь записать уравнение состояния идеального газа.

Уметь представить графики зависимости между параметрами состояния газа при постоянной температуре, давлении и объеме.

Сведения из теории

Количество однородного вещества (в молях)

$$\nu = \frac{N}{N_A} \quad \text{или} \quad \nu = \frac{m}{\mu},$$

где N – число молекул; N_A – постоянная Авогадро; m – масса; μ – молярная масса вещества.

Если система представляет собой смесь нескольких газов, то количество вещества системы

$$\nu = \nu_1 + \nu_2 + \dots + \nu_n = \frac{N_1}{N_A} + \frac{N_2}{N_A} + \dots + \frac{N_n}{N_A} = \frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2} + \dots + \frac{m_n}{\mu_n},$$

где ν_i , N_i , m_i , μ_i – соответственно количество вещества, число молекул, масса, молярная масса i -й компоненты смеси.

Закон Бойля – Мариотта (изотермический процесс – $t = \text{const}$, $m = \text{const}$):

$$pV = \text{const}.$$

Законы Гей-Люссака:

1) объем данной массы газа при постоянном давлении изменяется линейно с температурой:

$$V = V_0(1 + \alpha t) \quad \text{при} \quad p = \text{const}, \quad m = \text{const},$$

т. е. это изобарный процесс;

2) давление данной массы газа при постоянном объеме изменяется линейно с температурой:

$$p = p_0(1 + \alpha t), \text{ при } V = \text{const}, m = \text{const},$$

т.е. это изохорный процесс.

Второй газон Гей-Люссака еще называют законом Шарля.

В этих уравнениях t – температура по шкале Цельсия, p_0 и V_0 – давление и объем при 0°C , коэффициент $\alpha = 1/273,15 \text{ K}^{-1}$.

Термодинамическая температура

$$T = 273 + t.$$

Уравнение состояния идеального газа (уравнение Клапейрона – Менделеева)

$$pV = \frac{m}{\mu} RT = \nu RT,$$

где p – давление; V – объем; m – масса; μ – молярная масса газа; R – универсальная газовая постоянная; ν – количество вещества; T – термодинамическая температура.

Опытные газовые законы, являющиеся частными случаями уравнения состояния для изопроцессов:

а) закон Бойля – Мариотта (изотермический процесс – $T = \text{const}$, $m = \text{const}$) для двух состояний газа:

$$p_1V_1 = p_2V_2;$$

б) закон Гей-Люссака (изобарный процесс – $p = \text{const}$, $m = \text{const}$):

$$\frac{V}{T} = \text{const} \quad \text{или} \quad \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2};$$

в) закон Шарля (изохорный процесс – $V = \text{const}$, $m = \text{const}$):

$$\frac{p}{T} = \text{const} \quad \text{или} \quad \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2};$$

г) объединённый газовый закон ($m = \text{const}$):

$$\frac{pV}{T} = \text{const} \quad \text{или} \quad \frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2},$$

где p_1, V_1, T_1 – давление, объём и температура газа в начальном состоянии; p_2, V_2, T_2 – те же величины в конечном состоянии.

Закон Дальтона, определяющий давление смеси n идеальных газов:

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n,$$

где p_i – парциальное давление i -й компоненты смеси. Парциальным называется давление, которое производил бы этот газ, если бы только он один находился в сосуде, занятом смесью.

Молярная масса смеси n газов

$$\mu = \frac{m_1 + m_2 + \dots + m_n}{\nu_1 + \nu_2 + \dots + \nu_n},$$

где m_i и ν_i – масса и количество вещества i -го компонента смеси.

Концентрация молекул

$$n = \frac{N}{V} = \frac{\rho}{\mu} N_A,$$

где N – число молекул в системе; V – объем системы; ρ – плотность вещества; N_A – число Авогадро.

Формула справедлива для любого состояния вещества.

Нормальные условия – $p_0 = 1,013 \cdot 10^5$ Па,

$$T_0 = 273,15 \text{ К},$$

$$V_m = 22,41 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль}.$$

Зависимость давления газа от концентрации молекул и температуры

$$p = nkT,$$

где k – постоянная Больцмана.

Задания для практической части занятия

1 Найти количество вещества ν и число N молекул водорода массой $m = 0,5$ кг.

2 Баллон объемом 10 л содержит углекислый газ под давлением $p = 1,5$ МПа и температуре $T = 300$ К. Определить массу m газа.

3 Баллон объемом $V = 30$ л содержит смесь водорода и гелия при температуре $T = 300$ К и давлении $p = 828$ кПа. Масса m смеси равна 24 г. Определить массу m_1 водорода и массу m_2 гелия.

4 При нагревании идеального газа на $\Delta T = 2$ К при постоянном давлении объем его увеличился на $1/200$ первоначального объема. Найти первоначальную температуру T газа.

5 В баллоне объемом $V = 10$ л находится гелий под давлением $p_1 = 1$ МПа при температуре $T_1 = 300$ К. После того как из баллона был израсходован гелий массой $m = 10$ г, температура в баллоне понизилась до $T_2 = 290$ К. Определить давление p_2 гелия, оставшегося в баллоне.

6 В сосуде вместимостью 3 л находится кислород массой 10 г. Определите концентрацию и число молекул кислорода в сосуде.

7. В закрытом сосуде вместимостью $V = 20$ л находятся водород массой 6 г и гелий массой 12 г. Определите давление и молярную массу смеси, если её температура $T = 300$ К.

8 В сосуде вместимостью $V = 0,3$ л при температуре $T = 290$ К находится некоторый газ. На сколько понизится давление газа в сосуде, если из него из-за утечки выйдет $N = 10^{19}$ молекул?

9 В цилиндр длиной $l = 1,6$ м, заполненный воздухом при нормальном атмосферном давлении, начали медленно вдвигать поршень площадью $S = 200$ см². Определить силу, которая будет действовать на поршень, если его остановить на расстоянии 10 см от дна цилиндра.

10 В сосуде объемом $V = 15$ л содержится азот и водород при температуре $t = 23^\circ$ и давлении $p = 200$ кПа. Определить массы смеси и её компонентов, если массовая доля азота в смеси $w_1 = 0,7$.

11 Оболочка аэростата объемом $V = 1600$ м³, находящегося на поверхности Земли, на 7/8 заполнена водородом при давлении $p = 100$ кПа и температуре $T = 290$ К. Аэростат подняли на некоторую высоту, где давление $p_1 = 80$ кПа и температура $T_1 = 280$ К. Определите массу водорода, вышедшего из оболочки аэростата при его подъеме.

12 Колба объемом $V = 300$ см³, закрытая пробкой с краном, содержит разреженный воздух. Для измерения давления в колбе горлышко колбы погрузили на незначительную глубину и открыли кран, в результате чего в колбу вошла вода массой $m = 292$ г. Определить первоначальное давление в колбе, если атмосферное давление равно 100 кПа.

Практическое занятие № 7

ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ГАЗОВ

Цель: обобщение и закрепление теоретического материала по теме «Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов» и рассмотрение методики решения задач по данной теме.

Требования к исходному уровню знаний и умений

Знать определения следующих физических понятий:

- идеальный газ;
- эффективный диаметр молекулы;
- броуновское движение.

Знать определения следующих физических величин, уметь записать формулы, которыми они определяются, указать единицы измерения и значения.

- средняя квадратичная скорость молекул;
- наиболее вероятная скорость молекул;
- средняя скорость молекул;
- средняя кинетическая энергия поступательного движения одной молекулы идеального газа;
- средняя длина свободного пробега молекул;
- среднее число столкновений молекул.

Знать формулировку, уметь записать формулы, определяющие следующие физические законы:

- закон изменения давления с высотой;
- распределение Больцмана.

Уметь записать основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеальных газов.

Уметь записать и знать физический смысл барометрической формулы.

Сведения из теории

Давление газа, оказываемое им на стенку сосуда,

$$p = \frac{1}{3} n m_0 v^2,$$

где n – концентрация молекул; m_0 – масса одной молекулы; v – скорость молекул.

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеальных газов

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \langle v_{\text{кв}} \rangle^2 = \frac{2}{3} n \langle \varepsilon \rangle \quad \text{или} \quad pV = \frac{1}{3} m \langle v_{\text{кв}} \rangle^2 = \frac{2}{3} E,$$

где m – масса газа в объёме V ; $\langle v_{\text{кв}} \rangle$ – средняя квадратичная скорость молекул; $\langle \varepsilon \rangle$ – средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул; E – суммарная кинетическая энергия поступательного движения всех молекул.

Скорость молекул:

$$\text{– наиболее вероятная – } v_{\%0} = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}} = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}};$$

$$\text{– средняя квадратичная – } \langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}};$$

$$\text{– средняя арифметическая – } \langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}},$$

где m_0 – масса молекулы.

Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{3}{2} kT.$$

Средняя длина свободного пробега молекул газа

$$\langle l \rangle = \frac{\langle v \rangle}{\langle z \rangle} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n}.$$

Среднее число соударений, испытываемых молекулой газа за 1 с,

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

где d – эффективный диаметр молекулы; n – концентрация молекул; $\langle v \rangle$ – средняя арифметическая скорость молекулы.

Барометрическая формула

$$p_h = p_0 \exp\left[-\frac{\mu g(h-h_0)}{RT}\right],$$

где p_h и p_0 – давление газа на высоте h и h_0 .

Распределение Больцмана во внешнем потенциальном поле

$$n = n_0 \exp\left(-\frac{U}{kT}\right),$$

где n – концентрация частиц; n_0 – концентрация частиц в точках, в которых $U = 0$ (U – их потенциальная энергия).

Задания для практической части занятия

1 Найти среднюю кинетическую энергию $\langle \varepsilon_{\text{вр}} \rangle$ вращательного движения одной молекулы кислорода при температуре $T = 286 \text{ К}$, а также кинетическую энергию $W_{\text{вр}}$ вращательного движения всех молекул этого газа, если его масса 4 г.

2 Средняя длина свободного пробега $\langle l \rangle$ молекулы углекислого газа при нормальных условиях равна 40 нм. Определить среднюю арифметическую скорость $\langle v \rangle$ молекул и число z соударений, которые испытывает молекула в 1 с.

3 Во сколько раз и как изменится средняя скорость движения молекул при переходе от кислорода к водороду?

4 Определите кинетическую энергию $\langle \varepsilon_i \rangle$, приходящуюся в среднем на одну степень свободы молекулы азота, при температуре $T = 1000 \text{ К}$, а также $\langle \varepsilon_{\text{п}} \rangle$ – среднюю кинетическую энергию поступательного движения, $\langle \varepsilon_{\text{вр}} \rangle$ – вращательного движения и $\langle \varepsilon \rangle$ – среднее значение полной кинетической энергии молекулы.

5 Давление газа равно 1 мПа, концентрация его молекул 10^{10} см^{-3} . Определить температуру газа и среднюю энергию поступательного движения молекул газа.

6 Используя основное уравнение МКТ, определите давление, оказываемое газом на стенки сосуда, если его плотность $0,01 \text{ кг/м}^3$, а средняя квадратичная скорость молекул газа составляет 480 м/с.

7 Определите наиболее вероятную скорость молекул газа, плотность которого при давлении 40 кПа составляет $0,35 \text{ кг/м}^3$.

8 На какой высоте давление воздуха составляет 60 % от давления на уровне моря? Считайте, что температура воздуха везде одинакова и равна $10 \text{ }^\circ\text{C}$.

9 Пылинки, взвешенные в воздухе, имеют массу $m = 10^{-18} \text{ г}$. Во сколько раз уменьшится их концентрация при увеличении высоты на 10 м? Температура воздуха $T = 300 \text{ К}$.

10 Баллон вместимостью $V = 10 \text{ л}$ содержит водород массой 1 г. Определить среднюю длину свободного пробега молекул.

11 Определите плотность разреженного кислорода, если средняя длина свободного пробега молекул равна 1 см.

12 Найти среднее число столкновений, испытываемых в течение 1 с молекулой кислорода при нормальных условиях.

13 Найти среднюю продолжительность свободного пробега молекул кислорода при температуре $T = 250 \text{ К}$ и давлении 100 Па.

Практическое занятие № 8

ПЕРВОЕ И ВТОРОЕ НАЧАЛА ТЕРМОДИНАМИКИ

Цель: обобщение и закрепление теоретического материала по теме «Первое и второе начала термодинамики. Термодинамика изопроцессов» и рассмотрение решения задач по данной теме.

Требования к исходному уровню знаний и умений

Знать определения следующих физических понятий:

- внутренняя энергия;
- степени свободы молекулы;
- равновесные и неравновесные процессы;
- адиабатный процесс;
- обратимый и необратимый термодинамические процессы;
- круговой процесс (или цикл);
- прямой и обратный цикл;
- приведенное количество теплоты;
- изоэнтروпийный процесс;
- термодинамическая вероятность состояния системы.

Знать определения следующих физических величин, уметь записать формулы, которыми они определяются, указать единицы измерения и значения.

- средняя энергия молекулы;
- внутренняя энергия для произвольной массы m газа;
- удельная теплоемкость вещества;
- молярная теплоемкость;
- теплоемкость при постоянном объеме;
- теплоемкость при постоянном давлении;
- показатель адиабаты (или коэффициент Пуассона);
- молярная теплоемкость твердых химических соединений;
- термический коэффициент полезного действия для кругового процесса;
- энтропия.

Знать формулировку, уметь записать формулы, определяющие следующие физические законы:

- закон равномерного распределения энергии по степеням свободы молекулы;

- первое начало термодинамики;
- закон Дюлонга и Пти;
- второе начало термодинамики (закон возрастания энтропии);
- третье начало термодинамики (теорема Нернста – Планка).

Уметь записать формулу полной работы, совершаемой газом при изменении его объема, и изобразить ее графически.

Уметь записать уравнение Майера и знать его физический смысл.

Уметь записать уравнение адиабатного процесса (уравнение Пуассона).

Уметь изобразить графически прямой или обратный цикл и записать, чему равна работа, совершаемая за этот цикл. Где каждый из циклов используется.

Уметь изобразить графически цикл Карно и назвать процессы, входящие в этот цикл.

Уметь записать и пояснить неравенство Клаузиуса.

Сведения из теории

Средняя полная кинетическая энергия молекулы

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{i}{2} kT,$$

где i – число степеней свободы молекулы.

Молярная теплоёмкость газа при постоянном объёме и постоянном давлении соответственно

$$C_{V\mu} = \frac{i}{2} R, \quad C_{p\mu} = \frac{i+2}{2} R,$$

где i – число степеней свободы; R – универсальная газовая постоянная.

Связь между удельной (c) и молярной (C_μ) теплоёмкостями:

$$C_\mu = c\mu,$$

где μ – молярная масса.

Уравнение Майера

$$C_{p\mu} - C_{V\mu} = R.$$

Внутренняя энергия идеального газа

$$U = \frac{m}{\mu} C_{V\mu} T.$$

Уравнение адиабатного процесса (уравнение Пуассона)

$$pV^\gamma = \text{const}, TV^{\gamma-1} = \text{const}, T^\gamma p^{1-\gamma} = \text{const},$$

где γ – показатель адиабаты,

$$\gamma = \frac{C_{p\mu}}{C_{v\mu}} = \frac{i+2}{i}.$$

Уравнение политропы

$$pV^n = \text{const},$$

где $\gamma = (C - C_p) / (C - C_v)$ – показатель политропы.

Работа, совершаемая газом при изменении его объёма, в общем случае вычисляется по формуле

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p \, dV,$$

где V_1 и V_2 – начальный и конечный объёмы газа.

Работа при изобарическом процессе ($p = \text{const}$)

$$A = p (V_2 - V_1),$$

изотермическом ($T = \text{const}$) –

$$A = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1},$$

адиабатном ($Q = \text{const}$) –

$$A = \frac{m}{\mu} C_{v\mu} (T_1 - T_2) = \frac{RT_1}{\gamma - 1} \frac{m}{\mu} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \right] = \frac{p_1 V_1}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \right] = \frac{p_1 V_1}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right],$$

политропном ($C = \text{const}$) –

$$A = \frac{m}{\mu} \frac{RT_1}{n-1} \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right),$$

где $T_1, T_2, V_1, V_2, p_1, p_2$ – соответственно, начальные и конечные температура, объём и давление газа.

Первое начало термодинамики

$$Q = \Delta U + A,$$

где Q – количество теплоты, сообщённое газу; ΔU – изменение его внутренней энергии; A – работа, совершённая газом против внешних сил.

Первое начало термодинамики при изобарическом процессе

$$Q = \Delta U + A = \frac{m}{\mu} C_{v\mu} \Delta T + \frac{m}{\mu} R \Delta T = \frac{m}{\mu} C_{p\mu} \Delta T,$$

изохорном ($A = 0$) –

$$Q = \Delta U = \frac{m}{\mu} C_{v\mu} \Delta T,$$

изотермическом ($\Delta U = 0$) –

$$Q = A = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1},$$

адиабатическом ($Q = 0$) –

$$A = -\Delta U = -\frac{m}{\mu} C_{v\mu} \Delta T.$$

Термический коэффициент полезного действия для кругового процесса (цикла)

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1},$$

где Q_1 – количество теплоты, полученное системой; Q_2 – количество теплоты, отданное системой; A – работа, совершаемая за цикл.

КПД цикла Карно

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1},$$

где T_1 – температура нагревателя; T_2 – температура холодильника.

Холодильный коэффициент машины, работающей по обратному циклу Карно,

$$\varepsilon = \frac{Q_{\text{отв}}}{A} = \frac{T_2}{T_1 - T_2},$$

где $Q_{\text{отв}}$ – количество теплоты, отведённое из холодильной камеры; A – совершённая работа; T_2 – температура более холодного тела (хо-

лодильной камеры); T_1 – температура более горячего тела (окружающей среды).

Изменение энтропии при равновесном переходе системы из состояния 1 в состояние 2

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T}.$$

Изменение энтропии идеального газа

$$\Delta S = \frac{m}{\mu} \left(C_{v\mu} \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{V_2}{V_1} \right).$$

Неравенство Клаузиуса:

$$\Delta S \geq 0.$$

Согласно Больцману, энтропия системы и термодинамическая вероятность связаны между собой следующим образом:

$$S = k \ln W,$$

где k – постоянная Больцмана.

Теорема Нернста – Планка:

$$\lim_{T \rightarrow 0} S = 0.$$

Задания для практической части занятия

1 Определить количество теплоты, поглощаемой водородом массой $m = 0,2$ кг при нагревании его от температуры $t_1 = 0$ °С до температуры $t_2 = 100$ °С при постоянном давлении. Найти также изменение внутренней энергии газа и совершаемую им работу.

2 Кислород объемом 1 л находится под давлением 1 МПа. Определите, какое количество теплоты необходимо сообщить газу, чтобы: 1) увеличить его объем вдвое в результате изобарного процесса; 2) увеличить его давление вдвое в результате изохорного процесса.

3 Некоторый газ массой 1 кг находится при температуре $T = 300$ К и под давлением $p_1 = 0,5$ МПа. В результате изотермического сжатия давление газа увеличилось в два раза. Работа, затраченная на сжатие, $A = 432$ кДж. Определите: 1) какой это газ; 2) первоначальный удельный объем газа.

4 Работа расширения некоторого двухатомного идеального газа составляет $A = 1$ кДж. Определите количество подведенной к газу теплоты, если процесс протекал: 1) изотермически; 2) изобарно.

5 При адиабатном расширении кислорода ($\nu = 2$ моль), находящегося при нормальных условиях, его объем увеличился в $n = 3$ раза. Определите: 1) изменение внутренней энергии газа; 2) работу расширения газа.

6 Азот массой $m = 1$ кг занимает при температуре $T_1 = 300$ К объем $V_1 = 0,5$ м³. В результате адиабатного сжатия давление газа увеличилось в 3 раза. Определите: 1) конечный объем газа; 2) его конечную температуру; 3) изменение внутренней энергии газа.

7 Идеальный двухатомный газ, содержащий количество вещества $\nu = 1$ моль, находится под давлением $p_1 = 250$ кПа и занимает объем $V_1 = 10$ л. Сначала газ нагревают до $T_2 = 400$ К. Далее изотермически расширяя, доводят его до первоначального давления. После этого путем изобарического сжатия возвращают газ в начальное состояние. Определить термический КПД цикла.

8 Нагреватель тепловой машины, работающий по обратному циклу Карно, имеет температуру $t_1 = 200$ °С. Определить температуру T_2 охладителя, если при получении от нагревателя количества теплоты $Q_1 = 1$ Дж машина совершает работу $A = 0,4$ Дж? Потери на трение и теплоотдачу не учитывать.

9 Определить изменение ΔS энтропии при изотермическом расширении кислорода массой $m = 10$ г от объема $V_1 = 25$ л до объема $V_2 = 100$ л.

10 Найти изменение ΔS энтропии при нагревании воды массой $m = 100$ г от температуры $t_1 = 0$ °С до температуры $t_2 = 100$ °С и последующем превращении воды в пар той же температуры (удельная теплоемкость $c = 4,18 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К), удельная теплота парообразования $\lambda = 22,6 \cdot 10^5$ Дж/кг)

11 Считая азот идеальным газом, определить его удельную теплоемкость: 1) для изохорного процесса; 2) для изобарного процесса.

12 Некоторый газ при нормальных условиях имеет удельный объем $0,7$ м³/кг. Определите удельные теплоемкости c_v и c_p этого газа.

13 Определите удельные теплоемкости c_v и c_p смеси углекислого газа массой $m_1 = 3$ г и азота массой $m_2 = 4$ г.

14 Определите показатель адиабаты для смеси газов, содержащей гелий массой $m_1 = 8$ г и водород массой $m_2 = 2$ г.

15 Кислород объемом 1 л находится под давлением 1 МПа. Определите, какое количество теплоты необходимо сообщить газу, чтобы:

- 1) увеличить его объем вдвое в результате изобарного процесса;
- 2) увеличить его давление вдвое в результате изохорного процесса.

16 Некоторый газ массой 1 кг находится при температуре $T = 300$ К и под давлением $p_1 = 0,5$ МПа. В результате изотермического сжатия давление газа увеличилось в два раза. Работа, затраченная на сжатие, $A = -432$ кДж. Определите: 1) какой это газ; 2) первоначальный удельный объем газа.

17 При нагревании двухатомного идеального газа ($\nu = 2$ моль) его термодинамическая температура увеличилась в 2 раза. Определите изменение энтропии, если нагревание происходит: 1) изохорно; 2) изобарно.

18 Идеальный газ совершает цикл Карно, термический КПД которого равен 0,4. Определите работу изотермического сжатия, если работа изотермического расширения составляет 400 Дж.

Практическое занятие № 9

РЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ, ЖИДКОСТИ, ТВЕРДЫЕ ТЕЛА

Цель: обобщение и закрепление теоретического материала по теме «Реальные газы и особенности жидкого и твердого состояний вещества» и рассмотрение методики решения задач по данной теме.

Требования к исходному уровню знаний и умений

Знать определения следующих физических понятий:

- явления переноса;
- теплопроводность;
- диффузия;
- внутреннее трение;
- вакуум;
- ультраразреженный газ;
- радиус молекулярного действия;
- молекулярное давление (или внутреннее);
- поверхностно-активные вещества;
- смачивание (несмачивание);
- избыточное (добавочное) давление;

- капиллярность;
- испарение, сублимация, конденсация, плавление и кристаллизация;
- фазовые переходы I и II рода;
- тройная точка.

Знать определения следующих физических величин, уметь записать формулы, которыми они определяются, указать единицы измерения и значения:

- теплопроводность;
- плотность теплового потока;
- плотность потока массы;
- диффузия (коэффициент диффузии);
- плотность потока импульса;
- динамическая вязкость;
- поверхностная энергия;
- краевого угол;
- удельная теплота плавления;
- удельная теплота парообразования.

Знать формулировку, уметь записать формулы, определяющие следующие физические законы:

- Фурье;
- Фика;
- Ньютона.

Уметь записать уравнение Ван-дер-Ваальса (уравнение состояния реальных газов) для 1 моля газа и для произвольного количества вещества.

Уметь записать и пояснить формулу Лапласа.

Уметь записать уравнение Клапейрона – Клаузиуса.

Уметь изобразить графически изотермы Ван-дер-Ваальса и указать критические параметры.

Уметь изобразить графически диаграмму состояния фазовых превращений.

Сведения из теории

Импульс, переносимый молекулами из одного слоя газа в другой через элемент поверхности площадью ΔS за время dt ,

$$dp = \eta \frac{dv}{dz} \Delta S dt ,$$

где η – динамическая вязкость газа; dv/dz – поперечный градиент скорости течения его слоев.

Динамическая вязкость

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle \langle l \rangle,$$

где ρ – плотность газа (жидкости).

Закон Ньютона для силы внутреннего трения (вязкости) между слоями площадью ΔS :

$$F = \eta \frac{dv}{dz} \Delta S.$$

Закон теплопроводности Фурье:

$$\Delta Q = -\lambda \frac{dT}{dx} S \Delta t,$$

где ΔQ – теплота, прошедшая посредством теплопроводности через площадку S за время Δt ; dT/dx – градиент температуры; λ – теплопроводность, для газов,

$$\lambda = \frac{1}{3} c_v \rho \langle v \rangle \langle l \rangle;$$

c_v – удельная теплоёмкость газа при постоянном объёме; ρ – плотность газа; $\langle v \rangle$ и $\langle l \rangle$ – средняя арифметическая скорость и средняя длина свободного пробега молекул.

Закон диффузии Фика:

$$\Delta m = -D \frac{dp}{dx} S \Delta t,$$

где Δm – масса вещества, переносимая в результате диффузии через поверхность площадью S за время Δt ; dp/dx – градиент плотности; D – коэффициент диффузии; для газов

$$D = \frac{1}{3} \langle v \rangle \langle l \rangle.$$

Уравнение Ван-дер-Ваальса:

$$\left(p + \frac{m^2}{\mu^2} \frac{a}{V^2} \right) \left(V - \frac{m}{\mu} b \right) = \frac{m}{\mu} R T,$$

где p – давление; m – масса; μ – молярная масса; a и b – постоянные Ван-дер-Ваальса; V – объём; T – термодинамическая температура.

Связь критических параметров – объёма, давления и температуры газа – с постоянными Ван-дер-Ваальса:

$$V_{\text{кр}} = 3b \frac{m}{\mu}; \quad p_{\text{кр}} = \frac{a}{27b^2}; \quad T_{\text{кр}} = \frac{8a}{27Rb}.$$

Внутренняя энергия реального газа

$$U = \frac{m}{\mu} \left(C_{v\mu} T - \frac{a}{V_{\mu}} \right).$$

Коэффициент поверхностного натяжения

$$\alpha = F / l ,$$

где F – сила поверхностного натяжения, действующая на контур длиной l , ограничивающий поверхность жидкости.

При изотермическом увеличении площади поверхности плёнки жидкости на ΔS совершается работа

$$A = \alpha \Delta S.$$

Добавочное давление, вызванное кривизной поверхности жидкости, выражается формулой Лапласа,

$$\Delta p = \alpha \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$

где R_1 и R_2 – радиусы кривизны двух взаимно перпендикулярных сечений поверхности жидкости.

В случае сферической поверхности

$$\Delta p = 2 \alpha / R .$$

Высота поднятия жидкости в капиллярной трубке

$$h = \frac{2\alpha \cos \theta}{\rho g r},$$

где θ – краевой угол; ρ – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения; r – радиус трубки.

Высота поднятия жидкости в зазоре между двумя близкими и параллельными плоскостями

$$h = \frac{2\alpha \cos \theta}{\rho g d},$$

где d – расстояние между плоскостями.

Уравнение Клапейрона – Клаузиуса:

$$\frac{dT}{dp} = \frac{v_1 - v_2}{q_{12}} T,$$

где v_1 и v_2 – удельные объёмы вещества в двух фазовых состояниях; T и p – температура и давление фазового перехода; q_{12} – удельная теплота фазового перехода вещества

Задания для практической части занятия

1 Давление разреженного газа в рентгеновской трубке при температуре 17°C равно 130 мкПа. Можно ли вести разговор о высоком вакууме, если характерный размер l_0 (расстояние между катодом и анодом трубки) составляет 50 мм? Эффективный диаметр воздуха примите равным $0,27$ нм.

2 Определите, во сколько раз отличаются коэффициенты динамической вязкости η углекислого газа и азота, если оба газа находятся при одинаковой температуре и одном и том же давлении. Эффективные диаметры молекул этих газов равны.

3 Определите коэффициент теплопроводности λ азота, если коэффициент динамической вязкости η для него при тех же условиях равен 10 мкПа·с.

4 Определите коэффициент диффузии D кислорода при нормальных условиях. Эффективный диаметр молекул кислорода примите равным $0,36$ нм.

5 В цилиндре под поршнем находится хлор массой $m = 20$ г. Определите изменение ΔU внутренней энергии хлора при изотермическом расширении его от $V_1 = 200$ см³ до $V_2 = 500$ см³ (постоянная Ван-дер-Ваальса $a = 0,65$ Н·м⁴/моль²).

6 При определении силы поверхностного натяжения капельным методом число капель глицерина, вытекающего из капилляра, составляет $n = 50$. Общая масса глицерина $m = 1$ г, а диаметр шейки капли в момент отрыва $d = 1$ мм. Определите поверхностное натяжение σ глицерина.

7 Давление воздуха внутри мыльного пузыря на $\Delta p = 200$ Па больше атмосферного. Определите диаметр d пузыря. Поверхностное натяжение мыльного раствора $\sigma = 40$ мН/м.

8 Воздушный пузырек диаметром $d = 0,02$ мм находится на глубине $h = 25$ см под поверхностью воды. Определите давление воздуха в этом пузырьке. Атмосферное давление примите нормальным. Поверхностное натяжение воды $\sigma = 73$ мН/м, а ее плотность $\rho = 1$ г/см³.

9 Определите коэффициент диффузии D кислорода при нормальных условиях, если коэффициент теплопроводности $\lambda = 8,25$ мВт/(м·К).

10 Пространство между двумя параллельными пластинами площадью 150 см^2 каждая, находящимися на расстоянии 5 мм друг от друга, заполнено кислородом. Одна пластина поддерживается при температуре $17 \text{ }^\circ\text{C}$, а другая – при температуре $27 \text{ }^\circ\text{C}$. Определите количество теплоты, прошедшее за 5 мин посредством теплопроводности от одной пластины к другой. Кислород находится при нормальных условиях. Эффективный диаметр молекул кислорода считать $0,36 \text{ нм}$.

11 Определите массу азота, прошедшего вследствие диффузии через площадку 50 см^2 за 20 с, если градиент плотности в направлении, перпендикулярном площадке, равен 1 кг/м^4 . Температура азота 290 К , а средняя длина свободного пробега его молекул равна 1 мкм .

12 Пространство между двумя большими параллельными пластинами, расстояние между которыми равно 5 мм, заполнено гелием. Температура одной пластины поддерживается равной 290 К , другой – 310 К . Вычислить плотность теплового потока q . Расчеты выполнить для двух случаев, когда давление гелия равно: 1) $0,1 \text{ МПа}$; 2) 1 МПа .

13 Углекислый газ массой 10 г находится в сосуде вместимостью $V = 1 \text{ л}$. Принимая поправки Ван-дер-Ваальса $a = 0,36 \text{ Н}\cdot\text{м}^4/\text{моль}^2$ и $b = 4,28\cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{моль}$. Определите: 1) собственный объем V' молекул газа; 2) внутреннее давление p' газа.

14 Азот массой $1,4 \text{ кг}$ находится при температуре 300 К в сосуде вместимостью 40 л . Определите давление газа, если: 1) газ реальный; 2) газ идеальный. Поправки Ван-дер-Ваальса $a = 0,135 \text{ Н}\cdot\text{м}^4/\text{моль}^2$ и $b = 3,86\cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{моль}$ соответственно.

15 Кислород ($\nu = 2 \text{ моль}$) занимает объем $V_1 = 1 \text{ л}$. Определите изменение температуры кислорода, если он адиабатно расширяется в вакуум до объема $V_2 = 10 \text{ л}$ (поправка Ван-дер-Ваальса $a = 0,136 \text{ Н}\cdot\text{м}^4/\text{моль}^2$).

Практическое занятие № 10

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Цель: обобщение и закрепление теоретического материала по теме «Электростатическое поле» и рассмотрение решения задач по данной теме.

Требования к исходному уровню знаний и умений

Знать определения следующих физических понятий:

- электрический заряд (положительный и отрицательный);

- электризация тел;
- проводники первого и второго рода;
- диэлектрики;
- полупроводники;
- точечный заряд;
- электрическое поле;
- электростатическое поле;
- пробный заряд;
- линии напряженности электрического поля;
- однородное и неоднородное электрические поля;
- электрический диполь.

Знать определения следующих физических величин, уметь записать формулы, которыми они определяются, указать единицы измерения и значения:

- диэлектрическая проницаемость среды;
- линейная плотность заряда;
- поверхностная плотность заряда;
- объемная плотность заряда;
- напряженность электрического поля;
- поток вектора напряженности.

Знать формулировку, уметь записать формулы, определяющие следующие физические законы:

- закон сохранения электрического заряда;
- закон Кулона.

Уметь воспроизвести и описать теорему Остроградского – Гаусса.

Уметь записать формулу напряженности электрического поля бесконечной равномерно заряженной плоскости.

Уметь записать формулу напряженности электрического поля металлической заряженной сферы.

Уметь изобразить графически и описать в векторном виде принцип суперпозиции (наложения) электрических полей.

Сведения из теории

Закон Кулона (для однородной изотропной среды):

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{|q_1||q_2|}{r^2},$$

где F – сила взаимодействия точечных зарядов q_1 и q_2 ; ϵ – диэлектрическая проницаемость среды; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная; r – расстояние между зарядами.

Закон сохранения электрического заряда:

$$m = \sum_{i=1}^n q_i = \text{const},$$

где $m = \sum_{i=1}^n q_i$ – алгебраическая сумма зарядов, входящих в электрически изолированную систему; n – число зарядов.

Напряжённость электрического поля

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0},$$

где \vec{F} – сила, действующая на точечный положительный заряд q_0 , помещённый в данную точку поля.

Поток вектора напряжённости электрического поля:

а) через произвольную поверхность, помещённую в неоднородное поле, –

$$\Phi_E = \int_S E \cos \alpha dS,$$

где α – угол между вектором напряжённости поля и нормалью к элементу поверхности; dS – площадь элемента поверхности;

б) через плоскую поверхность S , помещённую в однородное электрическое поле, –

$$\Phi_E = ES \cos \alpha.$$

Поток вектора напряжённости электрического поля через замкнутую поверхность S –

$$\Phi_E = \int_S E \cos \alpha dS,$$

где интегрирование ведётся по всей поверхности.

Теорема Остроградского – Гаусса для электростатического поля в вакууме. Поток вектора напряжённости через произвольную замкнутую поверхность, охватывающую электрические заряды q_1, q_2, \dots, q_n ,

$$\Phi_E = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{i=1}^n q_i,$$

где $\sum_{i=1}^n q_i$ – алгебраическая сумма зарядов, заключённых внутри этой замкнутой поверхности; n – число зарядов.

Напряжённость поля, создаваемого точечным зарядом q на расстоянии r от заряда,

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{q}{r^2}.$$

Напряжённость поля, создаваемого равномерно заряженной сферической поверхностью радиусом R и зарядом q на расстоянии r от центра сферы:

а) внутри сферы ($r < R$) –

$$E = 0;$$

б) на поверхности сферы ($r = R$) –

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{q}{R^2};$$

в) вне сферы ($r > R$) –

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{q}{r^2}.$$

Принцип суперпозиции (наложения) электрических 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 α – угол между векторами \vec{E}_1 и \vec{E}_2 .

Плотность заряда – линейная, поверхностная, объемная (соответственно):

$$\tau = \frac{dq}{dl}, \quad \sigma = \frac{dq}{dS}, \quad w = \frac{dq}{dV},$$

где l – длина, S – площадь, V – объем.

Напряжённость поля:

а) создаваемого бесконечной равномерно заряженной плоскостью, –

$$E = \frac{\sigma}{2\pi\epsilon_0\epsilon};$$

б) создаваемого двумя параллельными бесконечными равномерно и разноимённо заряженными плоскостями, с одинаковой по модулю поверхностной плотностью заряда (поле плоского конденсатора), –

$$E = \frac{\sigma}{\pi\epsilon_0\epsilon};$$

в) создаваемого бесконечно длинной равномерно заряженной нитью (или цилиндром) на расстоянии r от оси, –

$$E = \frac{\sigma}{2\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{\tau}{r}.$$

Циркуляция вектора напряжённости электрического поля есть величина, численно равная работе по перемещению единичного точечного положительного заряда вдоль любого замкнутого контура. Циркуляция выражается интегралом и в случае электростатического поля равна нулю:

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = \oint_L E_l dl = 0,$$

где E_l – проекция вектора напряжённости в данной точке контура на направление касательной к контуру в той же точке.

Диполь есть система двух равных по величине и противоположных по знаку точечных электрических зарядов, расстояние между которыми значительно меньше расстояния от центра диполя до точек наблюдения. Вектор \vec{l} , проведённый от отрицательного заряда диполя к его положительному заряду, называется плечом диполя.

Электрический момент диполя

$$\vec{p} = |q|\vec{l}.$$

Задания для практической части занятия

1 Тонкий стержень длиной $l = 30$ см несет равномерно распределенный по длине заряд с линейной плотностью $\tau = 1$ мкКл/м. На расстоянии $r_0 = 20$ см на продолжении оси стержня от ближайшего конца находится точечный заряд $q_0 = 10$ нКл. Определить силу взаимодействия стержня и заряда.

2 На заряженной бесконечной плоскости с поверхностной плотностью заряда $\sigma = 40$ мкКл/м² прикреплен одноименно заряженный шарик с массой $m = 1$ г и зарядом $q = 1$ нКл. Какой угол α с плоскостью образует нить, на которой висит шарик?

3 Электрическое поле создано двумя точечными зарядами $q_1 = 30$ нКл и $q_2 = -10$ нКл. Расстояние между зарядами равно $d = 20$ см. Определить напряженность электрического поля в точке, находящейся на расстоянии $r_1 = 15$ см от первого и $r_2 = 10$ см от второго зарядов.

4 С какой силой F_l электрическое поле заряженной бесконечной плоскости действует на единицу длины заряженной бесконечно длинной нити, помещенной в это поле? Линейная плотность заряда на нити $\tau = 3$ мкКл/м и поверхностная плотность заряда на плоскости $\sigma = 20$ мкКл/м².

5 Два заряженных шарика, подвешенных на нитях одинаковой длины, опускаются в керосин плотностью $0,8$ г/см³. Какой должна быть плотность материала шариков, чтобы угол расхождения нитей в воздухе и в керосине был один и тот же? Диэлектрическая проницаемость керосина $\epsilon = 2$.

6 В вершинах равностороннего треугольника находятся одинаковые положительные заряды $q = 2$ нКл. Какой отрицательный заряд Q необходимо поместить в центре треугольника, чтобы сила притяжения с его стороны уравновесила силу отталкивания положительных зарядов?

7 Свинцовый шарик ($\rho = 11,3$ г/см³) диаметром $0,5$ см помещен в глицерин ($\rho = 1,26$ г/см³). Определите заряд шарика, если в однородном электростатическом поле шарик оказался взвешенном в глицерине. Электростатическое поле направлено вертикально вверх, его напряженность $E = 4$ кВ/см.

8 Определите напряженность электростатического поля в точке A , расположенной вдоль прямой, соединяющей заряды $q_1 = 10$ нКл и $q_2 = -8$ нКл и находящейся на расстоянии 8 см от отрицательного заряда. Расстояние между зарядами $l = 20$ см.

9 Определите напряженность поля, создаваемого диполем с электрическим моментом $p = 1$ нКл·м на расстоянии $r = 25$ см от центра диполя в направлении, перпендикулярном оси диполя.

10 На некотором расстоянии от бесконечной равномерно заряженной плоскости с поверхностной плотностью $\sigma = 0,1$ нКл/см² расположена круглая пластинка. Нормаль к плоскости пластинки составляет с линиями напряженности угол 30° . Определите поток Φ_E вектора напряженности через эту пластинку, если её радиус r равен 15 см.

11 В вершинах квадрата со стороной 5 см находятся одинаковые положительные заряды $q = 2$ нКл. Определить напряженность электростатического поля: 1) в центре квадрата; 2) в середине одной из сторон квадрата.

12 Под действием электростатического поля равномерно заряженной бесконечной плоскости точечный заряд $q = 1$ нКл переместился вдоль силовой линии на расстояние $r = 1$ см; при этом совершена работа 5 мкДж. Определите поверхностную плотность заряда на плоскости.

13 Электростатическое поле создается двумя бесконечными параллельными плоскостями, заряженными равномерно одноименными зарядами с поверхностной плотностью соответственно $\sigma_1 = 5$ нКл/м² и $\sigma_2 = 2$ нКл/м². Определить напряженность электрического поля: 1) между плоскостями; 2) за пределами плоскостей. Построить график изменения напряженности вдоль линии, перпендикулярной плоскостям.

14 На металлической сфере радиусом 15 см находится заряд $Q = 2$ нКл. Определить напряженность E электростатического поля: 1) на расстоянии $r_1 = 10$ см от центра сферы; 2) на поверхности сферы; 3) на расстоянии $r_2 = 20$ см от центра сферы. Построить график зависимости $E(r)$.

15 Поле создано двумя равномерно заряженными концентрическими сферами радиусами $R_1 = 5$ см и $R_2 = 8$ см. Заряды сфер соответственно равны $q_1 = 2$ нКл и $q_2 = -1$ нКл. Определите напряженность электростатического поля в точках, лежащих от центра сфер на расстояниях: 1) $r_1 = 3$ см; 2) $r_2 = 6$ см; 3) $r_3 = 10$ см. Построить график зависимости $E(r)$.

16 Фарфоровый шар радиусом $R = 10$ см заряжен равномерно с объемной плотностью $\rho = 15$ нКл/м³. Определите напряженность электростатического поля: 1) на расстоянии $r_1 = 5$ см от центра шара; 2) на поверхности шара; 3) на расстоянии $r_2 = 15$ см от центра шара. Диэлектрическая проницаемость фарфора $\epsilon = 5$.

Практическое занятие № 11

ПОТЕНЦИАЛ И РАБОТА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Цель: обобщение и закрепление теоретического материала по теме «Потенциал и работа электростатического поля. Электрическое поле в веществе» и рассмотрение решения задач по данной теме.

Требования к исходному уровню знаний и умений

Знать определения следующих физических понятий:

- разность потенциалов;
- поляризация диэлектрика;
- электронная, или деформационная поляризация диэлектрика;
- ориентационная, или дипольная поляризация диэлектрика;
- ионная поляризация диэлектрика;
- диэлектрическая восприимчивость вещества;
- свободные и связанные заряды;
- диэлектрическая проницаемость среды;
- эквипотенциальная поверхность;
- индуцированные заряды;
- электростатическая индукция;
- уединенный проводник;
- конденсатор;
- пробивное напряжение;
- сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики, пироэлектрики, электреты.

Знать определения следующих физических величин, уметь записать формулы, которыми они определяются, указать единицы измерения и значения:

- потенциал в какой-либо точке электростатического поля;
- потенциал поля, создаваемого точечным зарядом;
- поляризованность;
- поверхностная плотность связанных зарядов;
- вектор электрического смещения;
- емкость уединенного проводника;
- емкость шара;
- емкость конденсатора;
- объемная плотность энергии электростатического поля.

Уметь записать формулу и графически изобразить потенциал электрического поля точечного заряда и потенциал электрического поля металлической заряженной сферы.

Уметь записать формулу напряженности результирующего поля внутри диэлектрика.

Уметь воспроизвести и описать теорему Гаусса для электростатического поля в диэлектрике.

Уметь записать формулы емкости плоского, цилиндрического и сферического конденсаторов.

Уметь записать формулы емкости при параллельном и последовательном соединении конденсаторов в батарее.

Уметь записать формулы энергии системы неподвижных точечных зарядов, уединенного проводника, заряженного конденсатора и электростатического поля.

Сведения из теории

Потенциал электрического поля есть величина, равная отношению потенциальной энергии точечного положительного заряда, помещенного в данную точку поля, к этому заряду:

$$\varphi = \frac{W_p}{q_0}.$$

Потенциал электрического поля есть величина, равная отношению работы силы по перемещению точечного положительного заряда из данной точки в бесконечность к величине этого заряда:

$$\varphi = \frac{A_\infty}{q_0}.$$

Потенциал электрического поля в бесконечности от источника поля условно принимается равным нулю.

Потенциал электрического поля, создаваемый точечным зарядом q на расстоянии r от заряда,

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{q}{r}.$$

Потенциал электрического поля, создаваемого равномерно заряженной сферической поверхностью радиусом R и зарядом q на расстоянии r от центра сферы:

а) внутри сферы ($r < R$) –

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{q}{R};$$

б) на поверхности сферы ($r = R$) –

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{q}{R};$$

в) вне сферы ($r > R$) –

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{q}{r}.$$

Во всех приведенных формулах для потенциала сферы ϵ есть диэлектрическая проницаемость однородного диэлектрика, окружающего сферу.

Потенциал электрического поля, созданного системой зарядов, в данной точке согласно принципу суперпозиции равен алгебраической сумме потенциалов, создаваемых отдельными зарядами q_1, q_2, \dots, q_n :

$$\varphi = \sum_{i=1}^n \varphi_i.$$

Энергия взаимодействия системы точечных зарядов

$$W = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n q_i \varphi_i,$$

где φ_i – потенциал, создаваемый в той точке, где находится заряд q_i , всеми зарядами, кроме i -го.

Работа, совершаемая силами электрического поля при перемещении точечного заряда q из точки 1 в точку 2,

$$A = q \varphi_1 - \varphi_2 \quad \text{или} \quad A = q \int_1^2 E dl,$$

где E_l – проекция вектора напряжённости на направление перемещения; dl – модуль перемещения.

В случае однородного поля формула для работы принимает вид

$$A = qEl \cos \alpha,$$

где l – модуль перемещения; α – угол между направлениями векторов напряженности и перемещения.

Напряжённость и потенциал поля диполя в точке:

а) лежащей на оси диполя, –

$$E = \frac{P}{2\pi\epsilon_0\epsilon r^3}; \quad \varphi = \frac{P}{2\pi\epsilon_0\epsilon r^2},$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость среды; r – модуль радиус-вектора, проведённого от центра диполя к рассматриваемой точке поля.

б) лежащей на перпендикуляре к плечу диполя, восстановленном из его середины, –

$$E = \frac{P}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^3}; \quad \varphi = 0.$$

Механический момент, действующий на диполь в однородном электрическом поле,

$$\vec{M} = [\vec{p} \times \vec{E}], \text{ или } M = pE \sin \alpha,$$

где α – угол между направлениями векторов дипольного момента и напряжённости поля.

Вектор поляризации или поляризованность

$$\vec{P} = \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^N \vec{p}_i,$$

где \vec{p}_i – электрический момент i -й молекулы; N – число молекул, содержащихся в объёме ΔV .

Связь поляризованности с напряжённостью поля в диэлектрике:

$$P = \chi \epsilon_0 E,$$

где χ – диэлектрическая восприимчивость диэлектрика.

Связь диэлектрической проницаемости с диэлектрической восприимчивостью

$$\epsilon = 1 + \chi.$$

Напряжённость среднего макроскопического поля в диэлектрике связана с напряжённостью E_0 внешнего поля соотношениями

$$E = \frac{E_0}{\epsilon} \text{ или } E = E_0 - \frac{P}{\epsilon_0}.$$

Электрическое смещение связано с напряжённостью поля соотношением

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E}.$$

Теорема Остроградского – Гаусса для электростатического поля в веществе. Поток вектора электрического смещения через произвольную замкнутую поверхность, охватывающую заряды q_1, q_2, \dots, q_n ,

$$\Phi_D = \oint_S D_n dS = \sum_{i=1}^n q_i$$

где D_n – проекция вектора электрического смещения на направление нормали к элементу поверхности; $\sum_{i=1}^n q_i$ – алгебраическая сумма свободных зарядов, заключённых внутри замкнутой поверхности; n – число зарядов.

Электрическая ёмкость уединённого проводника или конденсатора

$$C = \frac{\Delta q}{\Delta \varphi},$$

где Δq – заряд, сообщённый проводнику (конденсатору); $\Delta \varphi$ – изменение потенциала, вызванное этим зарядом.

Электрическая ёмкость:

а) плоского конденсатора –

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{S}{d},$$

где S – площадь пластины; d – расстояние между пластинами;

б) уединённой проводящей сферы радиусом R , находящейся в среде с диэлектрической проницаемостью ε , –

$$C = 4\pi\varepsilon_0 \varepsilon R,$$

в) сферического конденсатора –

$$C = 4\pi\varepsilon_0 \varepsilon \frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1},$$

где r_1 и r_2 – радиусы концентрических сфер;

г) цилиндрического конденсатора –

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0 \varepsilon l}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)},$$

где l – длина обкладок конденсатора, r_1 и r_2 – радиусы полых коаксиальных цилиндров.

Ёмкость батареи конденсаторов при последовательном соединении

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}.$$

Ёмкость батареи конденсаторов при параллельном соединении

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n.$$

Энергия заряженного конденсатора

$$W = \frac{C(\Delta\varphi)^2}{2} = \frac{q\Delta\varphi}{2} = \frac{q^2}{2C}.$$

Энергия электростатического поля плоского конденсатора

$$W = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} Sd = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S U^2}{2d} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} V,$$

где S – площадь одной пластины; U – разность потенциалов между пластинами; V – объём конденсатора.

Объёмная плотность энергии

$$w = \frac{W}{V} = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} = \frac{ED}{2},$$

где E – напряжённость электрического поля в среде с диэлектрической проницаемостью ϵ ; D – электрическое смещение.

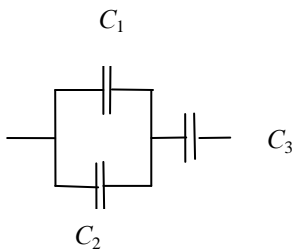
Задания для практической части занятия

1 Положительные заряды $q_1 = 3$ мкКл и $q_2 = 20$ нКл находятся в вакууме на расстоянии $r_1 = 1,5$ м друг от друга. Определить работу A , которую надо совершить, чтобы сблизить заряды до расстояния $r_2 = 1$ м.

2 Найти потенциал ϕ точки поля, находящейся на расстоянии $r = 10$ см от центра заряженного шара радиусом $R = 1$ см. Задачу решить, если: а) задана поверхностная плотность заряда на шаре $\sigma = 0,1$ мкКл/м²; б) задан потенциал шара $\phi_0 = 300$ В.

3 Электрическое поле образовано двумя параллельными пластинами, находящимися на расстоянии $d = 2$ см друг от друга. К пластинам приложена разность потенциалов $U = 120$ В. Какую скорость v получит электрон под действием поля, пройдя по линии напряженности расстояние $\Delta r = 3$ мм?

4 Найти емкость C системы конденсаторов, изображенной на рисунке. Емкость каждого конденсатора $C = 0,5$ мкФ.



5 Электростатическое поле создано положительно заряженной бесконечной нитью. Протон, двигаясь под действием электростатического поля вдоль линии напряженности от нити с расстояния $r_1 = 2$ см до $r_2 = 10$ см, изменил свою скорость от $v_1 = 1$ Мм/с до $v_2 = 5$ Мм/с. Определить линейную плотность τ заряда нити.

6 Электростатическое поле создается положительно заряженной с постоянной поверхностной плотностью $\sigma = 10$ нКл/м² бесконечной плоскостью. Какую работу надо совершить для того, чтобы перенести электрон вдоль линии напряженности с расстояния $r_1 = 2$ см до $r_2 = 1$ см.

7 Одинаковые заряды расположены в вершинах квадрата со стороной $a = 10$ см. Определите потенциальную энергию системы.

8 Металлический шар радиусом 5 см несет заряд $Q = 10$ нКл. Определите потенциал электростатического поля: 1) на поверхности шара; 2) на расстоянии 2 см от его поверхности. Постройте график зависимости φ (r).

9 Электростатическое поле создается бесконечной плоскостью, равномерно заряженной с поверхностной плотностью $\sigma = 1$ нКл/м². Определите разность потенциалов между двумя точками этого поля, лежащими на расстояниях $x_1 = 20$ см и $x_2 = 50$ см от плоскости.

10 Электростатическое поле создается сферой радиусом $R = 5$ см, равномерно заряженной с поверхностной плотностью $\sigma = 1$ нКл/м². Определите разность потенциалов между двумя точками этого поля, лежащими на расстояниях $r_1 = 10$ см и $r_2 = 15$ см от центра сферы.

11 Электростатическое поле создается шаром радиусом $R = 10$ см, равномерно заряженным с объемной плотностью $\rho = 20$ нКл/м³. Определите разность потенциалов между точками, лежащими внутри шара на расстояниях $r_1 = 2$ см и $r_2 = 8$ см от центра шара.

12 Определите поверхностную плотность зарядов на пластинах плоского слюдяного ($\varepsilon = 7$) конденсатора, заряженного до разности потенциалов $U = 200$ В, если расстояние между пластинами равно $d = 0,5$ мм.

13 В однородном электрическом поле напряженностью $E_0 = 700$ В/м помещается перпендикулярно полю бесконечная плоскопараллельная пластина ($\varepsilon = 7$). Определите: 1) напряженность электростатического поля внутри пластины; 2) электрическое смещение внутри пластины; 3) поляризованность стекла; 4) поверхностную плотность связанных зарядов на стекле.

14 Расстояние между пластинами плоского конденсатора составляет $d = 5$ мм. После зарядки конденсатора до разности потенциалов $V = 500$ В между пластинами конденсатора вдвинули стеклянную пластину ($\varepsilon = 7$). Определите: 1) диэлектрическую восприимчивость стекла; 2) поверхностную плотность связанных зарядов на стеклянной пластинке.

15 Между пластинами плоского конденсатора помещено два слоя диэлектрика – слюдяная пластинка ($\varepsilon_1 = 7$) и толщиной $d_1 = 1$ мм и

парафин ($\epsilon_2 = 2$) и толщиной $d_2 = 0,5$ мм. Определите: 1) напряженность электростатических полей в слоях диэлектрика; 2) электрическое смещение, если разность потенциалов между пластинами конденсатора $U = 500$ В.

16 Расстояние между пластинами плоского конденсатора составляет $d = 1$ см, разность потенциалов $U = 200$ В. Определите поверхностную плотность σ' связанных зарядов эбонитовой пластинки ($\epsilon = 3$), помещенной на нижнюю пластину конденсатора. Толщина пластины $d_2 = 8$ мм.

17 К пластинам плоского воздушного конденсатора приложена разность потенциалов $U_1 = 500$ В. Площадь пластин $S = 200$ см², расстояние между ними $d = 1,5$ мм. После отключения конденсатора от источника напряжения в пространство между пластинами внесли парафин ($\epsilon_2 = 2$). Определите разность потенциалов U_2 между пластинами после внесения диэлектрика. Определите также емкости конденсатора C_1 и C_2 до и после внесения диэлектрика.

18 Решите предыдущую задачу для случая когда парафин вносится в пространство между пластинами при включенном источнике питания.

19 Два плоских воздушных конденсатора одинаковой емкости соединены параллельно и заряжены до разности потенциалов $U = 300$ В. Определите разность потенциалов этой системы, если пространство между пластинами одного из конденсаторов заполнить слюдой ($\epsilon = 7$).

20. Два плоских воздушных конденсатора соединены последовательно и заряжены до разности потенциалов $U = 9$ В. Емкость конденсаторов соответственно равна $C_1 = 3$ мкФ и $C_2 = 6$ мкФ. Определите разность потенциалов на обкладках каждого конденсатора и заряды конденсаторов.

21 Сплошной эбонитовый шар ($\epsilon = 3$) радиусом $R = 5$ см заряжен равномерно с объемной плотностью $\rho = 10$ нКл/м³. Определите энергию электростатического поля, заключенного внутри шара.

22 В однородное электростатическое поле напряженностью $E_0 = 700$ В/м перпендикулярно полю поместили стеклянную пластину ($\epsilon = 7$) толщиной $d = 1,5$ мм и площадью $S = 200$ см². Определите: 1) поверхностную плотность зарядов на стекле; 2) энергию электростатического поля, сосредоточенную в пластине.

Практическое занятие № 12

ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

Цель: обобщение и закрепление теоретического материала по теме «Постоянный электрический ток проводимости в металлах, электролитах, газах и вакууме» и рассмотрение методики решения задач по данной теме.

Требования к исходному уровню знаний и умений

Знать определения следующих физических понятий:

- электродинамика;
- электрический ток;
- ток проводимости;
- конвекционный ток;
- постоянный ток;
- источник тока;
- сторонние силы;
- сверхпроводимость;
- электронный газ;
- работа выхода электрона;
- двойной электрический слой;
- электронная эмиссия;
- термоэлектронная, фотоэлектронная, вторичная и автоэлектронная эмиссии;
- ток насыщения;
- ионизация газов;
- газовый разряд;
- процесс рекомбинации;
- самостоятельный и несамостоятельный газы; газы разряды;
- напряжение пробоя;
- тлеющий, искровой, дуговой и коронный разряды;
- стримеры;
- плазма;
- степень ионизации.

Знать определения следующих физических величин, уметь записать формулы, которыми они определяются, указать единицы измерения и значения.

- сила тока;
- плотность тока;
- электродвижущая сила;
- напряжение;
- электрическая проводимость проводника;
- удельное электрическое сопротивление;
- удельная электрическая проводимость вещества проводника;
- работа тока;
- мощность тока;
- удельная тепловая мощность тока;
- поверхностный скачок потенциала.

Знать формулировку, уметь записать формулы, определяющие следующие физические законы:

- Ома для участка цепи;
- Ома в дифференциальной форме;
- зависимости удельного сопротивления, а значит и сопротивления с температурой;
- Джоуля – Ленца;
- Джоуля – Ленца в дифференциальной форме;
- обобщенный закон Ома;
- Ома для замкнутой цепи;
- Видемана – Франца.

Уметь записать формулу и дать определение первого правила Кирхгофа.

Уметь записать формулу и дать определение второго правила Кирхгофа.

Уметь воспроизвести среднюю скорость теплового движения электронов из теории Друде – Лоренца.

Уметь оценить среднюю скорость $\langle v \rangle$ упорядоченного движения электронов.

Уметь вывести на основе классической теории электропроводности металлов дифференциальную форму законов Ома и Джоуля – Ленца.

Сведения из теории

Сила тока определяется количеством электричества, проходящим через поперечное сечение проводника в единицу времени:

$$I = \frac{dq}{dt}.$$

Плотность тока есть векторная величина, измеряемая отношением силы тока к единице площади поперечного сечения проводника:

$$\vec{j} = \frac{dI}{dS} \vec{k},$$

где \vec{k} – единичный вектор, совпадающий по направлению с направлением движения положительных зарядов.

Плотность тока в проводнике

$$\vec{j} = nq \langle \vec{v} \rangle,$$

где n – концентрация носителей заряда; $\langle \vec{v} \rangle$ – средняя скорость упорядоченного движения зарядов в проводнике.

Закон Ома:

а) для однородного участка цепи (т.е. не содержащего ЭДС) –

$$I = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{R};$$

б) для неоднородного участка цепи –

$$I = \frac{\Phi_1 - \Phi_2 + \varepsilon_{12}}{R};$$

в) для замкнутой цепи –

$$I = \frac{\varepsilon}{R},$$

где $(\Phi_1 - \Phi_2)$ – разность потенциалов на концах участка цепи; ε_{12} – ЭДС источников тока, входящих в участок; R – сопротивление цепи (участка цепи); ε – ЭДС всех источников тока цепи.

Закон Ома в дифференциальной форме: плотность тока пропорциональна напряжённости электрического поля в данной точке проводника:

$$\vec{j} = \gamma \vec{E},$$

где $\gamma = 1/\rho$ – удельная проводимость материала проводника.

Сопротивление однородного проводника

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

где ρ – удельное сопротивление материала; l – длина проводника; S – площадь поперечного сечения.

Зависимость удельного сопротивления от температуры

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t),$$

где ρ_0 и ρ – удельные сопротивления, соответственно, при 0°C и при температуре t (по шкале Цельсия); α – температурный коэффициент сопротивления.

Сопротивление проводников:

а) при последовательном соединении –

$$R = \sum_{i=1}^n R_i$$

б) при параллельном соединении –

$$\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i},$$

где n – число проводников; R_i – сопротивление i -го проводника.

Правила Кирхгофа для разветвлённых цепей:

1) алгебраическая сумма токов, сходящихся в любом узле, равна нулю:

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0,$$

где n – число токов, сходящихся в узле;

2) для любого замкнутого контура алгебраическая сумма произведений сил токов на сопротивления соответствующих участков цепи равна алгебраической сумме всех ЭДС, действующих в этом контуре:

$$\sum_{i=1}^n I_i R_i = \sum_{k=1}^m \varepsilon_k,$$

где n – число участков, содержащих активное сопротивление; I_i – сила тока на i -м участке цепи; R_i – сопротивление i -го участка; m – число участков, содержащих источники тока; ε_k – ЭДС источников тока на k -м участке.

Работа, совершаемая электростатическим полем и сторонними силами в участке цепи постоянного тока за время t :

$$A = IUt.$$

Мощность тока

$$P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}.$$

Закон Джоуля – Ленца определяется соотношением

$$Q = I^2 R t = UI t \frac{U^2}{R} t,$$

где Q – количество теплоты, выделяющееся в участке цепи постоянного тока за время t . Закон Джоуля – Ленца справедлив при условии, что участок неподвижен и в нём не протекают химические реакции.

Закон Джоуля – Ленца в дифференциальной форме:

$$w = jE = \gamma E^2,$$

где w – удельная тепловая мощность тока, т.е. количество теплоты, выделяемое в единицу времени в единице объема проводника при протекании в нем тока.

Средняя скорость теплового движения электронов

$$\langle u \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_e}},$$

где m_e – масса электрона; T – термодинамическая температура; k – постоянная Больцмана.

Средняя скорость направленного движения электрона

$$\langle v \rangle = \frac{eE \langle t \rangle}{2m_e},$$

где e – заряд электрона; E – напряженность электрического поля; $\langle t \rangle$ – среднее время между двумя последовательными соударениями электрона с ионами решетки.

Среднее время $\langle t \rangle$ свободного пробега определяется средней длиной свободного пробега $\langle l \rangle$ и средней скоростью движения электронов относительно кристаллической решетки проводника, равной $\langle u \rangle + \langle v \rangle$. Так как $\langle v \rangle \ll \langle u \rangle$, то

$$\langle t \rangle = \frac{\langle l \rangle}{\langle u \rangle}.$$

Плотность тока в металлическом проводнике

$$j = ne \langle v \rangle = \frac{ne^2 \langle l \rangle}{2m \langle u \rangle} E,$$

где n – концентрация электронов, т.е. получили закон Ома в дифференциальной форме.

Закон Джоуля – Ленца электрического тока в классической теории проводимости металлов:

$$\langle E_k \rangle = \frac{mv_{\max}^2}{2} = \frac{e^2 \langle l \rangle^2}{2m \langle u \rangle^2} E^2.$$

Закон Видемана – Франца: отношение теплопроводности (λ) к удельной проводимости (γ) для всех металлов при одной и той же температуре одинаково и увеличивается пропорционально термодинамической температуре:

$$\frac{\lambda}{\gamma} = \beta T,$$

где $\beta = 3 \left(\frac{k}{e} \right)^2$ – постоянная, не зависящая от рода металла; k – постоянная Больцмана.

Плотность тока в газе при отсутствии насыщения

$$j = qn u_+ + u_- E,$$

где q – заряд иона; n – концентрация ионов; u_+ , u_- – подвижности положительных и отрицательных ионов.

Задания для практической части занятия

1 По медному проводнику сечением 1 мм^2 течет ток; сила тока 1 А . Определите среднюю скорость упорядоченного движения электронов вдоль проводника, предполагая, что на каждый атом меди приходится один свободный электрон. Плотность меди $8,9 \text{ г/см}^3$.

2 Определите, во сколько раз возрастет сила тока, проходящего через платиновую печь, если при постоянном напряжении на зажимах ее температура повышается от $t_1 = 20 \text{ }^\circ\text{С}$ до $t_2 = 1200 \text{ }^\circ\text{С}$. Температурный коэффициент сопротивления платины принять равным $3,65 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$.

3 По медному проводу сечением $0,3 \text{ мм}^2$ течет ток $0,3 \text{ А}$. Определите силу, действующую на отдельные свободные электроны со стороны электрического поля. Удельное сопротивление меди $17 \text{ нОм}\cdot\text{м}$.

4 Сила тока в проводнике сопротивлением 10 Ом равномерно убывает от $I_0 = 3 \text{ А}$ до $I = 0$ за 30 с . Определите выделившееся за это время в проводнике количество теплоты.

5 Плотность электрического тока в алюминиевом проводе равна 5 А/см^2 . Определите удельную тепловую мощность тока, если удельное сопротивление алюминия $26 \text{ нОм}\cdot\text{м}$.

6 Определите внутреннее сопротивление r источника тока, если во внешней цепи при силе тока $I_1 = 5\text{ А}$ выделяется мощность $P_1 = 10\text{ Вт}$, а при силе тока $I_2 = 8\text{ А}$ – мощность $P_2 = 12\text{ Вт}$.

7 Электрод в виде медной пластины площадью $S = 25\text{ см}^2$ погружен в электролитическую ванну с раствором медного купороса. При прохождении тока плотностью $j = 200\text{ А/м}^2$ на пластине отложилась медь массой $m = 100\text{ мг}$. Определить время t пропускания тока. Считать медь двухвалентной.

8 Между пластинами конденсатора площадью $S = 250\text{ см}^2$ каждая находится водород объемом $V = 375\text{ см}^3$. Концентрация n ионов в газе равна $5,3 \cdot 10^7\text{ см}^{-3}$. Какое напряжение U нужно приложить к пластинам, чтобы получить ток силой $I = 2\text{ мкА}$? Подвижность ионов: положительных $-u_+ = 5,4\text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, отрицательных $-u_- = 7,4\text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

9 При какой температуре T атомы ртути имеют кинетическую энергию поступательного движения, достаточную для ионизации? Потенциал ионизации атома ртути $U = 10,4\text{ В}$.

10 Найти сопротивление R трубки длиной $l = 84\text{ см}$ и площадью поперечного сечения $S = 5\text{ мм}^2$, если она заполнена воздухом, ионизированным так, что в единице объема при равновесии находится $n = 10^{13}\text{ м}^{-3}$ однозарядных ионов каждого знака. Подвижности ионов $u_+ = 1,3 \cdot 10^4\text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ и $u_- = 1,8 \cdot 10^4\text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

11 Сила тока в проводнике равномерно возрастает от I_1 до I_2 в течение времени 5 с . Определите заряд, прошедший по проводнику.

12 Определите плотность тока, если за 2 с через проводник сечением $1,6\text{ мм}^2$ прошло $2 \cdot 10^{19}$ электронов.

13 Определите длину прямого провода с током $I = 10\text{ А}$, если суммарный импульс электронов в проводе $p = 5 \cdot 10^9\text{ кг}\cdot\text{м/с}$.

14 Вольтметр, включенный в сеть последовательно с сопротивлением R_1 , показал напряжение $U_1 = 198\text{ В}$, а при включении последовательно с сопротивлением $R_2 = 2R_1$, показал напряжение $U_2 = 180\text{ В}$. Определите сопротивление R_1 и напряжение в сети, если сопротивление вольтметра $r = 900\text{ Ом}$.

15 Сила тока в цепи, содержащей три параллельно соединенных сопротивления R_1 ; $R_2 = 2\text{ Ом}$; $R_3 = 6\text{ Ом}$, равна $I = 1,5\text{ А}$. Сила тока через сопротивление R_1 равна $I_1 = 0,5\text{ А}$. Определите силу токов I_2 и I_3 , протекающих через сопротивления R_2 и R_3 .

16 Через лампу накаливания течет ток, равный $0,6\text{ А}$. Температура вольфрамовой нити диаметром $0,1\text{ мм}$ равна $2200\text{ }^\circ\text{С}$. Ток подводится

медным проводом сечением 6 мм^2 . Определите напряженность электрического поля: 1) в вольфраме (удельное сопротивление при $0 \text{ }^\circ\text{C}$ $\rho_0 = 55 \text{ нОм}\cdot\text{м}$, температурный коэффициент сопротивления $\alpha = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$); 2) в меди $\rho = 55 \text{ нОм}\cdot\text{м}$.

17 Электрическая плитка мощностью 1 кВт с нихромовой спиралью предназначена для включения в сеть с напряжением 220 В . Сколько метров проволоки диаметром $0,5 \text{ мм}$ надо взять для изготовления спирали, если температура нити равна $900 \text{ }^\circ\text{C}$? Удельное сопротивление нихрома при $0 \text{ }^\circ\text{C}$ $\rho_0 = 1 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$, температурный коэффициент сопротивления $\alpha = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$.

18 Два цилиндрических проводника одинаковой длины и одинакового сечения, один – из меди, а другой – из железа, соединены последовательно. Определите отношение мощностей токов для этих проводников. Удельное сопротивление меди и железа равны соответственно 17 и $98 \text{ нОм}\cdot\text{м}$.

19 Определите ток короткого замыкания источника ЭДС, если при внешнем сопротивлении $R_1 = 50 \text{ Ом}$ ток в цепи $I_1 = 0,2 \text{ А}$, а при $R_2 = 110 \text{ Ом}$ ток в цепи $I_2 = 0,1 \text{ А}$.

Практическое занятие № 13

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА И В ВЕЩЕСТВЕ

Цель: обобщение и закрепление теоретического материала по теме «Магнитное поле. Электромагнитная индукция и электромагнитное поле» и рассмотрение методики решения задач по данной теме.

Требования к исходному уровню знаний и умений

Знать определения следующих физических понятий:

- магнитное поле;
- линии магнитной индукции;
- магнитная проницаемость среды;
- ускорители заряженных частиц;
- вихревое поле;
- соленоид и тороид;
- магнетики;
- спиновой магнитный момент;

- магнитная восприимчивость и проницаемость вещества;
- индуктивный ток;
- электромагнитная индукция;
- взаимная индукция и самоиндукция;
- диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики;
- магнитный гистерезис;
- коэрцитивная сила;
- точка Кюри;
- магнитострикция.

Знать определения следующих физических величин, уметь записать формулы, которыми они определяются, указать единицы измерения и значения:

- магнитный момент рамки с током;
- магнитная индукция;
- напряженность магнитного поля;
- сила Лоренца;
- циркуляция вектора магнитной индукции;
- поток вектора магнитной индукции;
- потокосцепление;
- работа магнитного поля;
- орбитальный магнитный момент;
- намагниченность;
- электродвижущая сила индукции;
- индуктивность контура.

Знать формулировку, уметь записать формулы, определяющие следующие физические законы:

- Био – Савара – Лапласа для проводника с током;
- Ампера для определения силы взаимодействия двух токов;
- определяющий магнитную индукцию точечного заряда, свободно движущегося с нерелятивистской скоростью;
- полного тока для магнитного поля в вакууме;
- теорему Гаусса для потока вектора магнитной индукции;
- электромагнитной индукции Фарадея.

Уметь дать определение правилу правого винта и знать характеристику магнитного поля, к которому его применяем.

Уметь дать определение и записать формулу принципа суперпозиции для магнитного поля.

Уметь записать формулы магнитного поля прямого тока и в центре кругового проводника с током.

Уметь дать определение и применить правило левой руки для оценки направления вектора силы Ампера и силы Лоренца.

Знать формулировку, уметь записать формулу Лоренца.

Уметь вывести формулы для определения радиуса окружности, периода вращения и шага винтовой линии заряженной частицы, движущейся в магнитном поле.

Уметь дать характеристику и сформулировать особенности различных типов ускорителей заряженных частиц (линейного, циклотрона, синхрофазотрона, бетатрона).

Уметь записать выражения для магнитной индукции поля внутри соленоида и тороида.

Сведения из теории

Механический момент, действующий на контур с током, помещённый в однородное магнитное поле,

$$\vec{M} = [\vec{p}_m \times \vec{B}] \quad \text{или для модуля} \quad M = p_m B \sin \alpha,$$

где \vec{p}_m – магнитный момент контура площадью S с током I ,

$$\vec{p}_m = IS\vec{n};$$

\vec{n} – единичный вектор нормали к плоскости контура; α – угол между векторами \vec{B} и \vec{n} .

Закон Био – Савара – Лапласа: элемент $d\vec{l}$ проводника с током I создает в некоторой точке пространства магнитное поле, магнитная индукция $d\vec{B}$ которого определяется формулой

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 \mu I [d\vec{l} \times \vec{r}]}{4\pi r^3},$$

где μ_0 – магнитная постоянная; μ – магнитная проницаемость среды; \vec{r} – радиус-вектор, проведённый от элемента $d\vec{l}$ до точки, в которой определяется магнитная индукция.

Модуль вектора

$$dB = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{Idl \sin \alpha}{r^2},$$

где α – угол между векторами \vec{r} и $d\vec{l}$.

Магнитная индукция результирующего поля равна векторной

сумме магнитных индукций складываемых полей, т.е.

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i.$$

В частном случае наложение двух полей

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2,$$

а модуль магнитной индукции

$$B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2 + 2B_1B_2 \cos \alpha},$$

где α – угол между векторами \vec{B}_1 и \vec{B}_2 отдельных полей.

Магнитная индукция \vec{B} связана с напряженностью магнитного поля \vec{H} (в случае однородной, изотропной среды) соотношением

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H},$$

или в вакууме

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}.$$

Магнитная индукция поля, создаваемого бесконечно длинным прямым проводником с током,

$$B = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{2I}{r},$$

где r – расстояние от оси проводника до рассматриваемой точки поля.

Магнитная индукция поля в центре кругового проводника с током

$$B = \mu_0 \mu \frac{I}{2R}.$$

Магнитное поле точечного заряда q , свободно движущегося с нерелятивистской скоростью v ,

$$B = \frac{\mu_0 \mu q v \sin \alpha}{4\pi r^2},$$

где α – угол между вектором скорости и радиус-вектором; r – модуль радиус-вектора, проведённого от заряда к точке наблюдения.

Закон Ампера: сила, действующая на элемент длины $d\vec{l}$ проводника с током I в магнитном поле с индукцией \vec{B} ,

$$d\vec{F} = I \left[d\vec{l} \times \vec{B} \right].$$

Модуль силы Ампера

$$dF = IBdl \sin \alpha ,$$

где α – угол между векторами \vec{B} и $d\vec{l}$.

Сила взаимодействия двух бесконечно длинных прямолинейных параллельных проводников с токами I_1 и I_2

$$dF = \frac{\mu_0 \mu 2I_1 I_2}{4\pi R} dl ,$$

где R – расстояние между проводниками; dl – длина отрезка проводника.

Сила Лоренца, действующая на заряд q , движущийся со скоростью v в магнитном поле с индукцией B ,

$$\vec{F} = q [\vec{v} \times \vec{B}] \quad \text{или для модуля } F = |q| v B \sin \alpha ,$$

где α – угол между вектором скорости и вектором индукции магнитного поля.

Холловская поперечная разность потенциалов

$$\Delta\varphi = \frac{1}{en} \frac{IB}{d} ,$$

где I – сила тока; B – магнитная индукция; d – толщина пластинки; n – концентрация носителей заряда.

Закон полного тока для магнитного поля в вакууме (теорема о циркуляции вектора магнитной индукции)

$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \sum_{k=1}^n I_k ,$$

где $d\vec{l}$ – вектор элементарной длины контура, направленный вдоль обхода контура; B_t – составляющая вектора магнитной индукции в направлении касательной контура L произвольной формы; μ_0 – магнитная постоянная; $\sum_{k=1}^n I_k$ – алгебраическая сумма токов, охватываемая контуром.

Магнитная индукция поля внутри соленоида (в вакууме), имеющего N витков и длину l ,

$$B = \frac{\mu_0 NI}{l} .$$

Магнитная индукция поля внутри тороида (в вакууме)

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2\pi r}.$$

Поток вектора магнитной индукции (магнитный поток) через элементарную площадку dS

$$d\Phi_B = \vec{B} d\vec{S} = B_n dS,$$

где B_n – проекция вектора магнитной индукции на направление нормали к площадке dS .

Магнитный поток через плоский контур площадью S в случае:

а) неоднородного поля –

$$\Phi_B = \int_S B_n dS;$$

б) однородного поля –

$$\Phi_B = B_n S = BS \cos \alpha,$$

где α – угол между вектором нормали к плоскости контура и вектором магнитной индукции; B_n – проекция вектора магнитной индукции на нормаль.

Потокоцепление, т. е. полный магнитный поток, сцеплённый со всеми N витками соленоида или тороида,

$$\Psi = N\Phi_B,$$

где Φ_B – магнитный поток через один виток.

Для соленоида

$$\Psi = \mu_0 \mu \frac{N^2 I}{l} S,$$

где μ – магнитная проницаемость среды.

Работа по перемещению проводника с током I в магнитном поле

$$A = I \Delta \Phi_B,$$

где $\Delta \Phi_B$ – магнитный поток, пересечённый движущимся проводником.

Работа по перемещению замкнутого контура с током в магнитном поле

$$A = I \Delta \Psi,$$

где I – сила тока в контуре; $\Delta \Psi$ – изменение потокоцепления контура.

Основной закон электромагнитной индукции (закон Фарадея)

$$\varepsilon_i = -N \frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d\Psi}{dt},$$

где ε_i – ЭДС индукции; N – число витков контура.

Потокоцепление контура индуктивностью L с током I

$$\Psi = LI.$$

Индуктивность соленоида (тороида)

$$L = \mu_0 \mu \frac{N^2 S}{l},$$

где N – число витков соленоида; S – площадь поперечного сечения; l – длина соленоида.

При вычислениях индуктивности соленоида с ферромагнитным сердечником по приведенной формуле для определения магнитной проницаемости следует предварительно использовать график зависимости магнитной индукции B поля в ферромагнетике от напряженности внешнего магнитного поля H (рисунок 1), а затем воспользоваться формулой

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}.$$

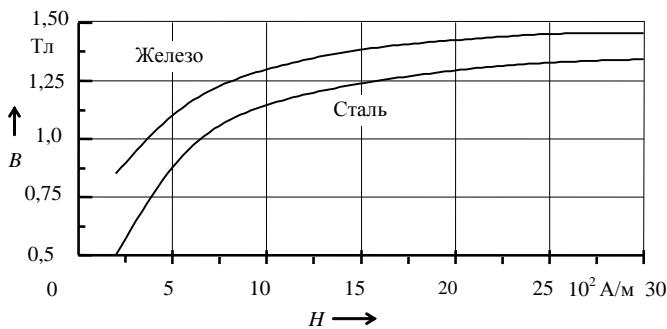


Рисунок 1 – График зависимости магнитной индукции B поля ферромагнетики от напряженности внешнего магнитного поля H

Энергия магнитного поля, связанного с контуром индуктивностью L , по которому течёт ток силой I ,

$$W = \frac{LI^2}{2}.$$

Объёмная плотность энергии однородного магнитного поля

$$w = \frac{\mu_0 \mu H^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu_0 \mu} = \frac{BH}{2}.$$

Намагниченность

$$\vec{J} = \frac{\vec{P}_m}{V} = \frac{\sum \vec{p}_m}{V},$$

где \vec{P}_m – магнитный момент магнетика, равный векторной сумме магнитных моментов отдельных молекул в единице объема вещества.

Связь между намагниченностью и напряженностью магнитного поля:

$$\vec{J} = \chi \vec{H},$$

где χ – магнитная восприимчивость вещества.

Связь между векторами \vec{B} , \vec{H} , \vec{J} :

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{J}),$$

где μ_0 – магнитная постоянная.

Связь между магнитной проницаемостью и магнитной восприимчивостью вещества

$$\mu = 1 + \chi.$$

Закон полного тока для магнитного поля в веществе (теорема о циркуляции вектора напряженности магнитного поля в веществе):

$$\oint_L \vec{H} dl = I,$$

где I – алгебраическая сумма сил токов проводимости, охватываемых контуром L .

Задания для практической части занятия

1 Два параллельных бесконечно длинных провода, по которым текут в одном направлении токи силой $I = 60$ А, расположены на расстоянии $d = 10$ см друг от друга. Определить магнитную индукцию B в точке, отстоящей от одного проводника на расстояние $r_1 = 5$ см и от другого – на расстояние $r_2 = 12$ см.

2 По двум длинным прямолинейным проводам, находящимся на расстоянии $r = 5$ см друг от друга в воздухе, текут токи силой $I = 10$ А

каждый. Определить магнитную индукцию B поля, создаваемого токами в точке, лежащей посередине между проводами, для случаев: 1) провода параллельны, токи текут в одном направлении; 2) провода параллельны, токи текут в противоположных направлениях; 3) провода перпендикулярны.

3 По проводнику, согнутому в виде квадратной рамки со стороной длиной $a = 10$ см, течет ток силой $I = 5$ А. Определить магнитную индукцию B поля в точке, равноудаленной от вершин квадрата на расстояние, равное длине его стороны.

4 На проволочный виток радиусом $r = 10$ см, помещенный между полюсами магнита, действует максимальный механический момент $M_{\max} = 6,5$ мкН. Сила тока I в витке равна 2 А. Определить магнитную индукцию B поля между полюсами магнита. Действием магнитного поля Земли пренебречь.

5 Требуется получить напряженность магнитного поля $H = 1$ кА/м в соленоиде длиной $l = 20$ см и диаметром $D = 5$ см. Найти число ампер-витков IN , необходимое для этого соленоида, и разность потенциалов U , которую надо приложить к концам обмотки из медной проволоки диаметром $d = 0,5$ мм. Считать поле соленоида однородным.

6 В однородном магнитном поле с индукцией $B = 0,5$ Тл движется равномерно проводник длиной $l = 10$ см. По проводнику течет ток $I = 2$ А. Скорость движения проводника $v = 20$ см/с и направлена перпендикулярно к направлению магнитного поля. Найти работу A перемещения проводника за время $t = 10$ с и мощность P , затраченную на это перемещение.

7 Электрон, ускоренный разностью потенциалов $U = 1$ кВ, влетает в однородное магнитное поле, направление которого перпендикулярно к направлению его движения. Индукция магнитного поля $B = 1,19$ мТл. Найти радиус R окружности, по которой движется электрон, период обращения T и момент импульса M электрона.

8 Электрон влетает в однородное магнитное поле, направление которого перпендикулярно к направлению его движения. Скорость электрона $v = 4 \cdot 10^7$ м/с. Индукция магнитного поля $B = 1$ мТл. Найти тангенциальное a_t и нормальное a_n ускорения электрона в магнитном поле.

9 Электрон, пройдя ускоряющую разность потенциалов $U = 400$ В, попал в однородное магнитное поле с индукцией $B = 1,5$ мТл. Определить: 1) радиус R кривизны траектории; 2) частоту n вращения

электрона в магнитном поле. Вектор скорости электрона перпендикулярен линиям индукции.

10 Замкнутый железный сердечник длиной $l = 50$ см имеет обмотку из $N = 1000$ витков. По обмотке течет ток $I_1 = 1$ А. Какой ток I_2 надо пустить через обмотку, чтобы при удалении сердечника индукция осталась прежней?

11 Найти кинетическую энергию W (в электрон-вольтах) протона, движущегося по дуге окружности радиусом $R = 60$ см в магнитном поле с индукцией $B = 1$ Тл.

12 Заряженная частица движется в магнитном поле по окружности со скоростью $v = 10^6$ м/с. Индукция магнитного поля $B = 0,3$ Тл. Радиус окружности $R = 4$ см. Найти заряд q частицы, если известно, что ее энергия $W = 12$ кэВ.

13 Тонкое кольцо массой 10 г и радиусом $R = 8$ см, несет заряд, равномерно распределенный с линейной плотностью $\tau = 10$ нКл/м. Кольцо равномерно вращается с частотой $n = 15$ с⁻¹ относительно оси, перпендикулярной плоскости кольца и проходящей через её центр. Определите: 1) магнитный момент p_m кругового тока, создаваемого кольцом; 2) отношение магнитного момента к моменту импульса кольца.

14 Определите магнитную индукцию поля, создаваемого отрезком бесконечно длинного провода, в точке, равноудаленной от концов отрезка и находящейся на расстоянии $R = 4$ см от его середины. Длина отрезка провода $l = 20$ см, а сила тока в проводе $I = 10$ А.

15 Напряженность H магнитного поля в центре кругового витка с магнитным моментом $p_m = 1,5$ А·м². Определите: 1) радиус витка; 2) силу тока в витке.

16 Круговой виток радиусом $R = 15$ см расположен относительно бесконечно длинного провода так, что его плоскость параллельна проводу. Перпендикуляр, восстановленный на провод из центра витка, является нормалью к плоскости витка. Сила тока в проводе $I_1 = 1$, сила тока в витке $I_2 = 5$ А. Расстояние от центра витка до провода $d = 20$ см. Определите магнитную индукцию в центре витка.

17 В однородном магнитном поле с индукцией $B = 10$ мТл висит алюминиевый проводник диаметром $d = 0,20$ мм. Определите силу тока в проводнике. Плотность алюминия $\rho = 2,7$ г/см³.

18 Два бесконечных прямолинейных проводника с одинаковыми токами, текущими в одном направлении, находятся друг от друга на

расстоянии R . Чтобы раздвинуть их до расстояния $2R$, на каждый сантиметр длины проводника затрачивается работа $A = 138$ нДж. Определите силу тока в проводнике.

19 Определите, при какой скорости пучок заряженных частиц, двигаясь перпендикулярно скрещенным под прямым углом однородным электрическому ($E = 100$ кВ/м) и магнитному ($B = 50$ мТл) полям, не отклоняется.

20 В случае эффекта Холла для натриевого проводника при плотности тока $j = 150$ А/м² и магнитной индукции $B = 2$ Тл напряженность поперечного электрического поля $E_v = 0,75$ мВ/м. Определите концентрацию электронов проводимости, а также её отношение к концентрации атомов в этом проводнике. Плотность натрия $\rho = 0,97$ г/см³.

21 Через сечение медной пластинки толщиной $d = 0,2$ мм пропускается ток $I = 6$ А. Пластинка помещается в однородное магнитное поле с индукцией $B = 1$ Тл, перпендикулярное ребру пластинки и направлению тока. Считая концентрацию электронов проводимости равной концентрации атомов, определите возникающую в пластинке поперечную (холловскую) разность потенциалов. Плотность меди $\rho = 8,93$ г/см³.

22 По прямому бесконечно длинному проводнику течет ток $I = 10$ А. Определите, пользуясь теоремой о циркуляции вектора \vec{B} , магнитную индукцию B в точке, расположенной в вакууме на расстоянии $r = 10$ см от проводника.

23 В магнитном поле, изменяющемся по закону $B = B_0 \cos \omega t$ ($B_0 = 0,1$ Тл, $\omega = 4$ с⁻¹), помещена квадратная рамка со стороной $a = 50$ см, причем нормаль к рамке образует с направлением поля угол $\alpha = 45^\circ$. Определите ЭДС индукции, возникающую в рамке в момент времени $t = 5$.

24 Плоскость проволочного витка площадью $S = 100$ см² и сопротивлением $R = 5$ Ом, находящегося в однородном магнитном поле напряженностью $H = 10$ кА/м, перпендикулярна линиям магнитной индукции. При повороте витка в магнитном поле отсчет гальванометра, замкнутого на виток, составляет 12,6 мкКл. Определите угол поворота витка.

25 В катушке длиной $l = 0,5$ м, диаметром $d = 5$ см и числом витков $N = 1500$ ток равномерно увеличивается на 0,2 А за одну секунду. На катушку надето кольцо из медной проволоки ($\rho = 17$ нОм·м) площадью сечения $S_k = 3$ мм². Определить силу тока в кольце.

26 Сила тока в обмотке соленоида, содержащего $N = 1500$ витков, равна 5 А . Магнитный поток Φ через поперечное сечение соленоида составляет 200 мкВб . Определите энергию магнитного поля в соленоиде.

27 Тороид с воздушным сердечником содержит 20 витков на 1 см . Определите объемную плотность энергии в тороиде, если по его обмотке протекает ток 3 А .

28 По обмотке соленоида индуктивностью $L = 3 \text{ мГн}$, находящегося в диамагнитной среде, течет ток $I = 0,4 \text{ А}$. Соленоид имеет длину $l = 45 \text{ см}$, площадь поперечного сечения $S = 10 \text{ см}^2$ и число витков $N = 1000$. Определите внутри соленоида: 1) магнитную индукцию; 2) намагниченность.

29 Индукция магнитного поля в железном стержне $B = 1,26 \text{ мТл}$. Определите для него намагниченность, используя график зависимости $B(H)$, представленный на рисунке 1.

30 По обмотке соленоида, в который вставлен железный сердечник (график зависимости $B(H)$, представленной на рисунке 1), течет ток $I = 4 \text{ А}$. Соленоид имеет длину $l = 1 \text{ м}$, площадь поперечного сечения $S = 20 \text{ см}^2$ и число витков $N = 400$. Определите энергию магнитного поля соленоида.

Практическое занятие № 14

МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ. ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

Цель: обобщение и закрепление теоретического материала по теме «Гармонические колебания. Волновые процессы» и рассмотрение методики решения задач по данной теме.

Требования к исходному уровню знаний и умений

Знать определения следующих физических понятий:

- свободные колебания;
- гармонические колебания;
- амплитуда колебания;
- фаза колебания и начальная фаза;
- пружинный, физический и математический маятники;
- биения;
- фигуры Лиссажу;

- затухающие колебания;
- автоколебания и вынужденные колебания;
- резонанс;
- переменный ток;
- волновые процессы;
- продольные и поперечные волны;
- волновой фронт и волновая поверхность;
- бегущие волны;
- волновой пакет;
- когерентные волны;
- интерференция волн;
- стоячие волны;
- звуковые (или акустические) волны;
- инфразвук и ультразвук;
- пороги слышимости и болевого ощущения;
- высота и тембр звука;
- реверберация звука;
- обратный пьезоэлектрический эффект и магнитострикция;
- электромагнитные волны;
- колебательный контур.

Знать определения следующих физических величин, уметь записать формулы, которыми они определяются, указать единицы измерения и значения:

- период гармонического колебания;
- частота колебаний;
- период колебания пружинного, физического и математического маятников;
- приведенная длина физического маятника;
- длина волны;
- волновое число;
- фазовая скорость;
- разность хода волн;
- интерференционный максимум и минимум;
- пучности и узлы стоячей волны;
- интенсивность звука (или сила звука);
- громкость звука;
- скорость распространения звуковых волн в газах;
- скорость распространения электромагнитной волны.

Уметь записать:

- уравнение гармонического колебания некоторой величины, описать входящие в него переменные и представить графически;
- дифференциальное уравнение гармонических колебаний и изобразить графически методом векторных диаграмм;
- выражения для скорости, ускорения, силы, кинетической и потенциальной энергии, а также полной энергии, колеблющейся материальной точки;
- уравнения сложения двух гармонических колебаний одного направления и одинаковой частоты и построить векторные диаграммы этих колебаний;
- уравнения сложения двух гармонических колебаний одинаковой частоты, происходящих во взаимно перпендикулярных направлениях и изобразить графически;
- уравнение бегущей волны, описать входящие в него переменные и представить графически;
- уравнение сферической волны и описать входящие в него переменные;
- уравнение стоячей волны, описать входящие в него переменные и представить графически.

Сведения из теории

Уравнение гармонического колебательного движения

$$s = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad \text{или} \quad s = A \sin(\omega_0 t + \varphi_1),$$

где s – смещение колеблющейся величины от положения равновесия в момент времени t ; A – амплитуда (максимальное значение смещения); $\omega_0 = 2\pi/T = 2\pi\nu$ – собственная круговая (циклическая) частота; t – текущее время; φ_0 – начальная фаза; $\varphi_1 = \varphi_0 + \pi/2$; T – период колебаний; ν – частота колебаний.

Связь между периодом и частотой колебаний

$$T = \frac{1}{\nu}.$$

Скорость точки, совершающей колебания (проекция на ось движения),

$$v_s = \frac{ds}{dt} = -A\omega_0 \sin \omega_0 t + \varphi_0 = A\omega_0 \cos \left(\omega_0 t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2} \right).$$

Ускорение точки, совершающей колебания (проекция на ось движения),

$$a_s = \frac{dv_s}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2} = -A\omega_0^2 \cos \omega_0 t + \varphi_0 = A\omega_0^2 \cos \omega_0 t + \varphi_0 + \pi .$$

Дифференциальное уравнение гармонических колебаний

$$\frac{d^2s}{dt^2} + \omega_0^2 s = 0 .$$

Сила (проекция на ось движения), под действием которой тело массой m совершает гармонические колебания,

$$F_s = ma_s = m \frac{d^2s}{dt^2} = -mA\omega_0^2 \cos \omega_0 t + \varphi_0 \equiv -ks ,$$

где $k = m\omega_0^2$ – коэффициент упругой или квазиупругой силы.

Период колебаний точки, совершающей колебания под действием упругой силы,

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} .$$

Период колебаний математического маятника

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} ,$$

где l – длина маятника; g – ускорение свободного падения.

Период колебаний физического маятника

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mgl_C}} = 2\pi \sqrt{\frac{L_{\text{пр}}}{g}} ,$$

где J – момент инерции маятника относительно его оси вращения; m – масса маятника; l_C – расстояние от оси вращения до центра тяжести; $L_{\text{пр}}$ – приведенная длина физического маятника.

Кинетическая энергия тела, участвующего в механических колебаниях,

$$W_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{mA^2\omega_0^2}{2} \sin^2 \omega_0 t + \varphi_0 ;$$

потенциальная энергия

$$W_p = \frac{ks^2}{2} = \frac{mA^2\omega_0^2}{2} \cos^2 \omega_0 t + \varphi_0 .$$

Полная энергия механических колебаний

$$W = W_k + W_p = \frac{mA^2\omega_0^2}{2}.$$

Период колебаний в идеальном колебательном контуре (формула Томсона)

$$T = 2\pi\sqrt{LC},$$

где L – индуктивность катушки; C – емкость конденсатора.

При сложении двух одинаково направленных гармонических колебаний одинаковой частоты (рисунок 1) получается гармоническое колебание той же частоты с амплитудой

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_{02} - \varphi_{01})}$$

и с начальной фазой

$$\operatorname{tg} \varphi_0 = \frac{A_1 \sin \varphi_{01} + A_2 \sin \varphi_{02}}{A_1 \cos \varphi_{01} + A_2 \cos \varphi_{02}},$$

где A_1 и A_2 – амплитуды складываемых колебаний; φ_{01} и φ_{02} – их начальные фазы.

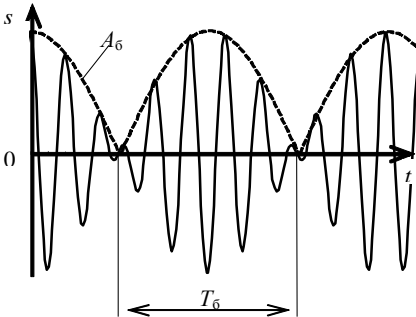


Рисунок 2 – График биений. Пунктирная линия – изменение амплитуды биений

где $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1 \ll \omega$ – разность частот колебаний.

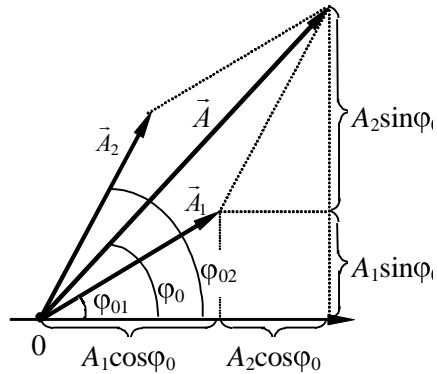


Рисунок 1 – Сложение колебаний одинакового направления

При сложении двух одинаково направленных гармонических колебаний с близкими частотами получается квазигармоническое колебание, так называемые биения (рисунок 2). Уравнение биений (при равных амплитудах складываемых колебаний)

$$s = 2A \cos\left(\frac{\Delta\omega}{2}t\right) \cos(\omega t),$$

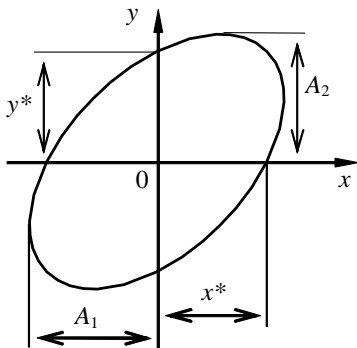


Рисунок 3 – Траектория движения точки при сложении двух взаимно перпендикулярных колебаний одинакового периода

Дифференциальное уравнение затухающих колебаний

$$\frac{d^2s}{dt^2} + 2\beta \frac{ds}{dt} + \omega_0^2 s = 0,$$

где β – коэффициент затухания. Для колебаний груза на пружине $\beta = \frac{r}{2m}$, для электромагнитных колебаний в контуре – $\beta = \frac{R}{2L}$, где r – коэффициент сопротивления, R – активное сопротивление контура.

Условие существования затухающих колебаний

$$\beta < \omega_0.$$

Уравнение затухающих колебаний (рисунок 4)

$$s = A_0 \exp(-\beta t) \cos(\omega t + \varphi_0),$$

где A_0 – начальное значение амплитуды колебаний; $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ – циклическая частота затухающих колебаний.

Амплитуда затухающих колебаний

$$A = A_0 \exp(-\beta t).$$

Амплитуда и период биений

$$A_6 = 2A \left| \cos\left(\frac{\Delta\omega}{2} t\right) \right|, \quad T_6 = \frac{2\pi}{\Delta\omega}.$$

При сложении двух взаимно перпендикулярных колебаний (вдоль осей x и y) одинакового периода уравнение траектории результирующего движения имеет вид (рисунок 3; $x^* = A_1 |\sin(\varphi_{02} - \varphi_{01})|$, $y^* = A_2 |\sin(\varphi_{02} - \varphi_{01})|$)

$$\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} - \frac{2xy}{A_1 A_2} \cos \varphi_{02} - \varphi_{01} = \sin^2 \varphi_{02} - \varphi_{01}.$$

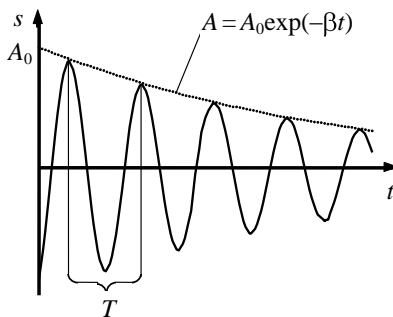


Рисунок 4 – График затухающих колебаний

Логарифмический декремент затухания (определяющее уравнение)

$$\theta = \ln \frac{A t}{A t + T}.$$

Связь логарифмического декремента затухания с периодом квазигармонических затухающих колебаний:

$$\theta = \beta T.$$

Условие слабозатухающих колебаний:

$$\beta \ll \omega_0.$$

Добротность колебательной системы (определяющее уравнение)

$$Q = 2\pi \frac{W}{\Delta W_1} = 2\pi \frac{W}{\Delta W_T},$$

где W – энергия, запасенная в системе в данный момент времени; ΔW_1 – средняя потеря энергии за время, в течение которого фаза колебаний увеличивается на один радиан; ΔW_T – средняя потеря энергии за один период.

Связь добротности с другими параметрами квазигармонических слабозатухающих колебаний:

$$Q \approx \frac{\omega_0}{2\beta} = \frac{\pi}{\theta} = \pi N_e,$$

где N_e – число полных колебаний, соответствующее времени уменьшения амплитуды в e раз.

Для слабозатухающих колебаний груза на пружине $Q = \frac{1}{r} \sqrt{km}$;

для электрического контура $Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$ (величина $R_b = \sqrt{\frac{L}{C}}$ называется волновым сопротивлением).

Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний:

$$\frac{d^2 s}{dt^2} + 2\beta \frac{ds}{dt} + \omega_0^2 s = f_m \cos \Omega t,$$

где f_m – амплитудная характеристика периодического внешнего воздействия; Ω – его циклическая частота. Для колебаний груза на пружине

жине $f_m = \frac{F_m}{m}$, для электромагнитных колебаний в контуре $f_m = \frac{U_m}{L}$, где F_m – амплитуда внешней силы; U_m – амплитуда напряжения генератора.

Установившееся решение дифференциального уравнения вынужденных колебаний:

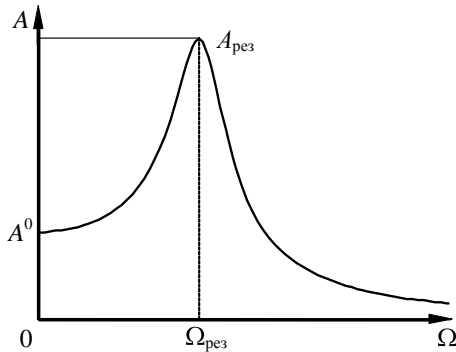


Рисунок 5 – Зависимость амплитуды вынужденных колебаний от частоты внешнего воздействия

$$s = A \cos(\Omega t - \varphi),$$

где A – амплитуда вынужденных колебаний (рисунок 5); φ – разность фаз между периодическим внешним воздействием и смещением.

Первая резонансная частота (частота внешнего воздействия, при которой амплитуда вынужденных колебаний принимает максимальное значение)

$$\Omega_{\text{рез}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}.$$

Связь резонансной амплитуды смещения (амплитуды для первой резонансной частоты $A_{\text{рез}}$) и амплитуды при нулевой частоте A^0

$$\frac{A_{\text{рез}}}{A^0} = Q.$$

Условие квазистационарности переменного тока:

$$l \gg \frac{c}{\nu},$$

где l – характерная длина электрической цепи; c – скорость света в вакууме; ν – частота.

Зависимости мгновенных значений напряжений на резисторе (u_R), на конденсаторе (u_C) и на катушке (u_L), а также силы тока (i) в цепи от времени:

$$u_R = U_{Rm} \cos \omega t + \phi_0 ; \quad u_C = U_{Cm} \cos \left(\omega t + \phi_0 - \frac{\pi}{2} \right);$$

$$u_L = U_{Lm} \cos\left(\omega t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right); \quad i = I_m \cos \omega t + \varphi_0 .$$

Емкостное сопротивление

$$R_C = \frac{1}{\omega C} .$$

Индуктивное сопротивление

$$R_L = \omega L .$$

Полное сопротивление цепи переменного тока

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} .$$

Закон Ома для переменного тока

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} ,$$

где I_m и U_m – амплитудные значения силы тока и напряжения; ω – циклическая частота переменного тока.

Сдвиг фаз между напряжением и силой переменного тока:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} .$$

Уравнение плоской (одномерной) бегущей гармонической волны (рисунок б)

$$s = A \cos(\omega t - kx + \varphi_0) ,$$

где s – смещение колеблющихся точек; A – амплитуда (максимальное значение смещения); ω – круговая частота; t – время; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; λ – длина волны; x – координата точки; φ_0 – начальная фаза.

Фазовая скорость волны

$$v_\phi = \omega/k = \lambda/T .$$

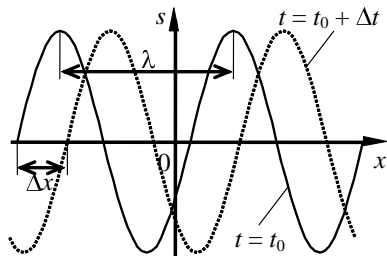


Рисунок б – График плоской одномерной бегущей волны
 $\Delta x = v_\phi \Delta t$

Уравнение одномерной стоячей волны (рисунок 7):

$$y = 2A \cos(\omega t) \cos(kx),$$

где A – амплитуды двух встречных плоских бегущих гармонических волн, при интерференции которых образуется стоячая волна; ω и k – соответственно их круговые частоты и волновые числа.

Амплитуда стоячей волны

$$A_{\text{ст}} = 2A |\cos kx|.$$

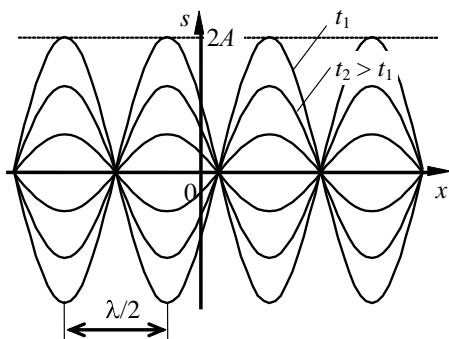


Рисунок 7 – График стоячей волны

Расстояние между соседними узлами (расстояние между соседними пучностями)

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2}.$$

Скорость звука в газе (при допущении, что процессы, протекающие в газе при распространении упругих волн, являются достаточно быстрыми и поэтому их можно приближенно считать адиабатными)

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\mu}},$$

где γ – постоянная адиабаты; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура; μ – молярная масса газа.

Скорость упругих продольных волн в твердом теле

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

где E – модуль Юнга; ρ – плотность вещества.

Связь громкости звука с его интенсивностью

$$L = 10 \cdot \lg \frac{I}{I_0},$$

где $I_0 = 10^{-12}$ Вт/м².

Частота, воспринимаемая приемником при относительном движении источника и приемника сигнала (эффект Доплера для упругих волн),

$$v = v_0 \frac{v_x - v_{\text{пр},x}}{v_x - v_{\text{ист},x}},$$

где v_0 – частота сигнала, испускаемая источником; v_x , $v_{\text{пр},x}$ и $v_{\text{ист},x}$ – соответственно проекции скоростей распространения сигнала (скорости волны), движения источника и движения приемника на ось, проходящую через источник и приемник (ось x).

Фазовая скорость электромагнитной волны

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\epsilon_0\mu\mu_0}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{c}{n},$$

где n – показатель преломления среды, ϵ , μ – диэлектрическая и магнитная проницаемости среды; ϵ_0 , μ_0 – электрическая и магнитная постоянные.

В плоской электромагнитной волне модули напряженностей связаны соотношением

$$\sqrt{\epsilon_0\epsilon} |\vec{E}| = \sqrt{\mu_0\mu} |\vec{H}|,$$

где \vec{E} , \vec{H} – напряженности электрического и магнитного полей.

Объемная плотность энергии электромагнитной волны

$$w = \frac{\epsilon\epsilon_0 E^2}{2} + \frac{\mu\mu_0 H^2}{2} = \sqrt{\epsilon\epsilon_0\mu\mu_0} EH.$$

Задания для практической части занятия

1 Гармонические колебания величины s описываются уравнением $s = 0,02\cos(6\pi t + \pi/3)$, м. Определите: 1) амплитуду колебаний; 2) циклическую частоту; 3) частоту колебаний; 4) период колебаний.

2 Тело массой $m = 10$ г совершает гармонические колебания по закону $x = 0,1\cos(4\pi t + \pi/4)$, м. Определите максимальные значения: 1) возвращающей силы; 2) кинетической энергии.

3 Тонкий однородный стержень длиной $l = 60$ см может свободно вращаться вокруг горизонтальной оси, отстоящей на расстоянии $x = 15$ см от его середины. Определите период колебаний стержня, если он совершает малые колебания.

4 Два одинаково направленных гармонических колебания одинакового периода с амплитудами $A_1 = 4$ см и $A_2 = 8$ см имеют разность фаз $\varphi = 45^\circ$. Определите амплитуду результирующего колебания.

5 Два когерентных источника колеблются в одинаковых фазах с частотой $\nu = 400$ Гц. Скорость распространения колебаний в среде $v = 1$ км/с. Определите, при какой наименьшей разности хода, не равной нулю, будет наблюдаться: 1) максимальное усиление колебаний; 2) максимальное ослабление колебаний.

6 Две точки лежат на луче и находятся от источника на расстоянии $x_1 = 4$ м и $x_2 = 7$ м. Период колебаний $T = 20$ мс и скорость v распространения волны равна 300 м/с. Определите разность фаз колебаний этих точек.

7 Электропоезд проходит со скоростью 72 км/ч мимо неподвижного приемника и дает гудок, частота которого 300 Гц. Принимая скорость звука равной 340 м/с, определите скачок частоты, воспринимаемый приемником.

8 Определите длину электромагнитной волны в вакууме, на которую настроен колебательный контур, если максимальный заряд на обкладках конденсатора $Q_m = 50$ нКл, а максимальная сила тока к контуре $I_m = 1,5$ А. Активным сопротивлением контура пренебречь.

9 В вакууме вдоль оси x распространяется плоская электромагнитная волна и падает по нормали на поверхность тела, полностью ее поглощающего. Амплитуда напряженности магнитного поля волны равна 0,15 А/м. Определите давление, оказываемое волной на тело. Воспользуйтесь результатом выводов теории Максвелла о том, что если тело полностью поглощает падающую на него энергию, то давление равно среднему значению объемной плотности энергии в падающей электромагнитной волне.

10 Колебательный контур содержит соленоид без сердечника (длина $l = 5$ см, площадь поперечного сечения $S_1 = 1,5$ см², число витков $N = 500$) и плоский конденсатор (расстояние между пластинами $d = 1,5$ мм, площадь пластин $S_2 = 100$ см²). Определите частоту ω_0 собственных колебаний контура.

11 Разность фаз двух одинаково направленных гармонических колебаний одинакового периода $T = 4$ с и одинаковой амплитуды $A = 5$ см составляет $\pi/4$. Напишите уравнение движения, получающегося в результате сложения этих колебаний, если начальная фаза одного из них равна нулю.

12 Результирующее колебание, получающееся при сложении двух гармонических колебаний одного направления, описывается уравнением вида $x = A \cos t \cos 45t$ (t – в секундах). Определите: 1) циклические частоты складываемых колебаний; 2) период биений результирующего колебания.

13 Точка участвует одновременно в двух гармонических колебаниях, происходящих во взаимно – перпендикулярных направлениях и описываемых уравнениями $x = A \cos \omega t$ и $y = B \cos \omega t$, где A, B, ω – положительные постоянные. Определите уравнение траектории точки, укажите направление движения по этой траектории.

14 Тело массой $m = 0,6$ кг, подвешенное к спиральной пружине жесткостью $k = 30$ Н/м, совершает в некоторой среде упругие колебания. Логарифмический декремент колебаний $\theta = 0,01$. Определите: 1) время, за которое амплитуда колебаний уменьшится в 3 раза; 2) число полных колебаний, которые должна совершить гиря, чтобы произошло подобное уменьшение амплитуды.

15 Тело массой $m = 100$ г, совершающая затухающие колебания, за $\tau = 1$ мин потеряло 40 % своей энергии. Определите коэффициент сопротивления r .

16 Частота свободных затухающих колебаний некоторой системы $\omega = 65$ рад/с, а её добротность $Q = 2$. Определите собственную частоту ω_0 колебаний этой системы.

17 За время, в течение которого система совершает $N = 50$ полных колебаний, амплитуда уменьшается в 2 раза. Определите добротность Q системы.

18 Колебательный контур содержит катушку индуктивности $L = 25$ мГн, конденсатор емкостью $C = 10$ мкФ и резистор сопротивлением $R = 1$ Ом. Амплитуда заряда на пластинах конденсатора $Q = 1$ мКл. Определите: 1) период колебаний контура; 2) логарифмический декремент затухания колебаний; 3) уравнение зависимости изменения напряжения на обкладках конденсатора от времени.

19 Определите резонансную частоту колебательной системы, если собственная частота колебаний $\nu = 300$ Гц, а логарифмический декремент $\theta = 0,2$.

20 В цепь колебательного контура, содержащего последовательно соединенные резистор сопротивлением $R = 40$ Ом, катушку индуктивностью $L = 25$ мГн и конденсатор емкостью $C = 28$ мкФ, подключено внешнее переменное напряжение с амплитудным значением $U_m = 180$ В и частотой $\omega = 314$ рад/с. Определите: 1) амплитудное

значение силы тока I_m в цепи; 2) сдвиг φ по фазе между током и внешним напряжением.

21 В цепь переменного тока частотой $\nu = 50$ Гц включена катушка длиной $l = 30$ см и площадью поперечного сечения $S = 10$ см², содержащая $N = 1000$ витков. Определите активное сопротивление катушки, если известно, что сдвиг по фазе между током и напряжением $\varphi = 30^\circ$.

22 Цепь переменного тока состоит из последовательно соединенных катушки, конденсатора и резистора. Амплитудное значение напряжения на резисторе $U_{Rm} = 100$ В, а амплитудное значение суммарного напряжения на катушке и конденсаторе $U_{LCm} = 173$ В. Определите сдвиг фаз между током и внешним напряжением.

23 Плоская синусоидальная волна распространяется вдоль прямой, совпадающей с положительным направлением оси x в среде, не поглощающей энергию, со скоростью $v = 10$ м/с. Две точки, находящиеся на этой прямой на расстоянии $x_1 = 7$ м и $x_2 = 10$ м от источника колебаний, колеблются с разностью фаз $\Delta\varphi = 3\pi/5$. Амплитуда волны $A = 5$ см. Определите: 1) длину волны; 2) уравнение волны; 3) смещение второй точки в момент времени $t = 2$ с.

24 Один конец упругого стержня соединен с источником гармонических колебаний, подчиняющихся закону $y = A \cos \omega t$, а другой конец жестко закреплен. Учитывая, что отражение в месте закрепления стержня происходит от менее плотной среды, определите характер колебаний в любой точке стержня.

25 Определите интенсивность звука, громкость которого L составляет 67 дБ.

26 Средняя квадратичная скорость молекул двухатомного газа при некоторых условиях составляет 480 м/с. Определите скорость распространения звука в газе при тех же условиях.

27 В вакууме вдоль оси x распространяется плоская электромагнитная волна. Амплитуда напряженности электрического поля волны равна 10 В/м. Определите амплитуду напряженности магнитного поля.

Практическое занятие № 15

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ, ДИФРАКЦИЯ И ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

Цель: обобщение и закрепление теоретического материала по теме «Геометрическая оптика. Дисперсия, поглощение и поляризация света» и рассмотрение методики решения задач по данной теме.

Требования к исходному уровню знаний и умений

Знать определения следующих физических понятий:

- оптика;
- свет;
- оптически однородная среда;
- световые лучи;
- линзы;
- главная оптическая ось и оптический центр линзы;
- фокус линзы;
- абберация;
- монохроматические волны;
- дифракция света;
- разрешающая способность оптического прибора;
- зоны Френеля;
- дифракционный спектр;
- одномерная дифракционная решетка;
- дисперсия света;
- поглощение (абсорбция) света;
- коэффициент поглощения световой волны и светофильтры;
- световой вектор;
- плоскость поляризации;
- поляризаторы, стопа Столетова;
- двойное лучепреломление;
- оптическая ось кристалла;
- призма Николя;
- дихроизм света и поляроиды;
- оптически активные вещества;
- поляриметрия (сахариметрия);
- фотометрия.

Знать определения следующих физических величин, уметь записать формулы, которыми они определяются, указать единицы измерения и значения:

- относительный и абсолютный показатели преломления;
- фокусное расстояние линзы;
- оптическая сила линзы;
- постоянная (период) дифракционной решетки;
- дисперсия вещества;

- степень поляризации;
- сила света источника;
- световой поток;
- освещенность;
- яркость источника.

Знать формулировку, уметь записать формулы, определяющие следующие физические законы:

- прямолинейного распространения света;
- независимости световых пучков;
- отражения;
- преломления;
- Бугера;
- Малюса;
- Брюстера;
- первый (закон Ламберта) и второй законы освещенности.

Уметь дать определение принципу Ферма, или принципу наименьшего времени и записать формулу тонкой линзы.

Уметь сформулировать принцип Гюйгенса.

Уметь записать условия интерференционного максимума и минимума света.

Уметь записать формулу Вульфа – Брэггов дифракции рентгеновского излучения от кристаллической решетки и описать переменные.

Знать формулировку понятия нормальной дисперсии и уметь представить графически.

Уметь дать формулировку естественного, частично (эллиптически) поляризованного и плоско(линейно)поляризованного света и представить их схематично.

Сведения из теории

Оптическая длина пути световой волны

$$L = \int_0^l n(x) dx ,$$

где l – геометрическая длина пути; $n(x)$ – зависимость показателя преломления от координаты вдоль луча. Для случая $n = \text{const}$ (однородное) вещество $L = nl$.

Разность фаз двух когерентных волн

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta,$$

где λ_0 – длина волны в вакууме; $\Delta = L_2 - L_1$ – оптическая разность хода двух световых волн.

Радиус когерентности для удаленного источника

$$r_{\text{ког}} = \frac{\lambda}{\Delta\alpha},$$

где $\Delta\alpha$ – угловой размер источника из точки наблюдения.

Условие максимального усиления света при интерференции:

– для разности фаз –

$$\Delta\varphi = \pm 2k\pi \quad (k = 0; 1; 2; \dots);$$

– для оптической разности хода –

$$\Delta = \pm k\lambda \quad (k = 0; 1; 2; \dots),$$

где λ – длина волны света в среде, в которой происходит интерференция.

Условие максимального ослабления света при интерференции:

– для разности фаз –

$$\Delta\varphi = \pm(2k + 1)\pi \quad (k = 0; 1; 2; \dots);$$

– для оптической разности хода –

$$\Delta = \pm(2k + 1)\frac{\lambda}{2} \quad (k = 0; 1; 2; \dots).$$

Оптическая разность хода двух световых волн от вторичных источников (щелей) до экрана в опыте Юнга

$$\Delta = \frac{xd}{l},$$

где x – координата точки на экране, отсчитываемая от его центра; d – расстояние между щелями; l – расстояние от щелей до экрана.

Расстояние между соседними интерференционными полосами на экране

$$\Delta x = \frac{\lambda l}{d}.$$

Оптическая разность хода световых волн, возникающая при отражении монохроматического света от двух поверхностей тонкой пленки:

– в случае, когда $n_1 < n$, $n_2 < n$ или $n_1 > n$, $n_2 > n$,

$$\Delta = 2dn \cos i_2 \pm \frac{\lambda}{2} = 2d \sqrt{n^2 - n_1^2 \sin^2 i_1} \pm \frac{\lambda}{2},$$

где d – толщина пленки; n – показатель преломления вещества пленки; i_2 – угол преломления света в пленке; n_1, n_2 – показатели преломления сред соответственно над и под пленкой; i_1 – угол падения;

– в случае, когда $n_1 < n$, $n_2 > n$ или $n_1 > n$, $n_2 < n$,

$$\Delta = 2dn \cos i_2 = 2d \sqrt{n^2 - n_1^2 \sin^2 i_1}.$$

Для проходящих лучей света оптическая разность хода изменяется на половину длины волны.

Показатель преломления просветляющего покрытия

$$n = \sqrt{n_{\text{ст}}},$$

где $n_{\text{ст}}$ – показатель преломления стекла, на которую наносится покрытие.

Минимальная толщина просветляющего покрытия

$$d = \frac{\lambda}{4n}.$$

Радиус темных колец Ньютона в отраженном свете (или светлых в проходящем)

$$r_k = \sqrt{kR\lambda} \quad (k = 0; 1; 2; \dots),$$

где k – номер кольца; R – радиус кривизны линзы.

Радиус светлых колец Ньютона в отраженном свете (или темных в проходящем)

$$r_k = \sqrt{(2k-1)R \frac{\lambda}{2}} \quad (k = 1; 2; \dots).$$

Радиус зоны Френеля с номером m (рисунок 9)

$$r_m = \sqrt{\frac{ab}{a+b} m \lambda},$$

где a – расстояние от источника света (точка S на рисунке 1) до волновой поверхности; b – расстояние от волновой поверхности до точки наблюдения (точка P).

Для плоской световой волны ($a \rightarrow \infty$) $r_m = \sqrt{mb\lambda}$.

Математическое условие применимости геометрической оптики

$$\frac{R^2}{b\lambda} \gg 1,$$

где R – характерный размер препятствия (например, радиус отверстия или непрозрачного диска), на котором происходит дифракция; b – расстояние от препятствия до точки наблюдения.

Математическое условие дифракции Френеля:

$$\frac{R^2}{b\lambda} \sim 1.$$

Математическое условие дифракции Фраунгофера:

$$\frac{R^2}{b\lambda} \ll 1.$$

При дифракции Фраунгофера на одной щели (нормальное падение):

– условие минимумов –

$$a \sin \varphi = \pm k\lambda \quad (k = 1; 2; \dots),$$

где a – ширина щели; φ – угол дифракции; k – порядок минимума; λ – длина волны;

– условие максимумов –

$$a \sin \varphi' = \pm (2k + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (k = 1; 2; \dots),$$

где φ' – приближенное значение угла дифракции; k – порядок максимума.

При дифракции Фраунгофера на дифракционной решетке (нормальное падение) условие главных максимумов

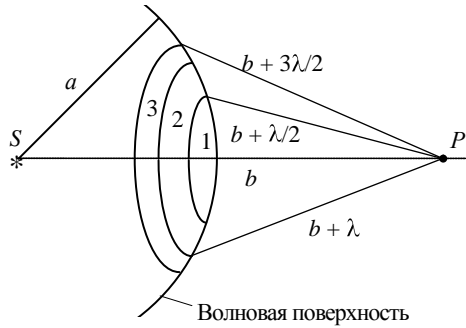


Рисунок 1 – Построение зон Френеля на сферической волновой поверхности

$$d \sin \varphi = \pm k \lambda \quad (k = 0; 1; 2; \dots),$$

где d – период решетки; φ – угол дифракции; k – порядок максимума (спектра).

Разрешающая способность оптического прибора (определяющее уравнение)

$$R = \frac{1}{\Delta \varphi},$$

где $\Delta \varphi$ – наименьшее угловое расстояние между двумя светлыми точками, при котором их изображения в фокальной плоскости объектива могут быть видны раздельно.

Разрешающая способность объектива

$$R = \frac{D}{1,22 \lambda},$$

где D – диаметр объектива.

Разрешающая способность спектрального прибора (определяющее уравнение)

$$R = \frac{\lambda}{\Delta \lambda},$$

где $\Delta \lambda$ – наименьшая разность длин волн соседних спектральных линий (λ и $\lambda + \Delta \lambda$), для которых соответствующие им максимумы могут быть видны раздельно в спектре на экране.

Разрешающая способность дифракционной решетки

$$R = kN,$$

где k – порядок максимумов.

Угловая дисперсия спектрального прибора (определяющее уравнение)

$$D_{\varphi} = \frac{\delta \varphi}{\delta \lambda},$$

где $\delta \varphi$ – разница угловых положений максимумов спектральных линий, отличающихся по длине волны на величину $\delta \lambda$.

Угловая дисперсия дифракционной решетки

$$D_{\varphi} = \frac{k}{d \cos \varphi}.$$

Формула Вульфа – Брэгга:

$$2d \sin \vartheta = k \lambda,$$

где d – расстояние между атомными плоскостями кристалла; ϑ – угол скольжения (угол между направлением пучка параллельных лучей, падающих на кристалл, и гранью кристалла); k – порядок максимума.

Излучение Вавилова – Черенкова происходит под углом, определяемым соотношением

$$\cos \vartheta = \frac{c}{nv},$$

где c – скорость света в вакууме; n – показатель преломления среды; v – скорость движения заряженной частицы.

Закон Брюстера:

$$\operatorname{tg} \alpha_{\text{Бр}} = n_{21},$$

где $n_{21} = n_2/n_1$ – относительный показатель преломления второго диэлектрика относительно первого.

Закон Малюса:

$$I = I_0 \cos^2 \varphi,$$

где φ – угол между плоскостями пропускания (поляризации) лучей света.

Следствие закона Малюса для падения на анализатор естественного света.

$$I = \frac{1}{2} I_0.$$

Степень поляризации света

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}},$$

где I_{\max} и I_{\min} – соответственно максимальная и минимальная интенсивности света, пропускаемого анализатором.

Угол поворота плоскости поляризации оптически активных веществ:

– для кристаллов и чистых жидкостей –

$$\varphi = \alpha d;$$

– для растворов –

$$\varphi = \alpha_1 Cd,$$

где α, α_1 – коэффициенты удельного вращения; d – длина пути, пройденного светом в оптически активном веществе; C – массовая концентрация оптически активного вещества в растворе.

Закон Бугера для поглощения света:

$$I = I_0 e^{-\alpha x},$$

где I – интенсивность света в точке, находящейся на расстоянии x от границы вещества; I_0 – интенсивность света в точке на границе вещества (падающий свет); α – коэффициент поглощения.

Угол отклонения светового луча призмой (формула справедлива для малых углов)

$$\varphi = \Omega(n - 1),$$

где Ω – угол при вершине призмы; n – показатель преломления для падающего света.

Первый закон освещенности (закон Ламберта):

$$E = \frac{I}{r^2},$$

где E – освещенность, определяемая выражением $E = \Phi S$; I – сила света источника, определяемая выражением $I = \Phi \omega$; Φ – световой поток; ω – телесный угол, в котором этот поток распространяется; r – расстояние до источника; S – площадь освещаемой поверхности.

В качестве единицы силы света принята кандела (кд), единицей светового потока является люмен (лм), за единицу освещенности принимается люкс (лк).

Второй закон освещенности:

$$E = E_0 \cos \alpha,$$

где E_0 – освещенность поверхности перпендикулярно падающим световым потоком.

Задания для практической части занятия

1 Расстояние от бипризмы Френеля до узкой щели и экрана соответственно равно $a = 30$ см и $b = 1,5$ м. Бипризма – стеклянная ($n = 1,5$) с преломляющим углом $\theta = 20'$. Определите длину волны света, если ширина интерференционных полос $\Delta x = 0,65$ мм.

2 На стеклянный клин ($n = 1,5$) нормально падает монохроматический свет ($\lambda = 698$ нм). Определите угол между поверхностями кли-

на, если расстояние между двумя соседними интерференционными минимумами в отраженном свете равно 2 мм.

3 Определите, во сколько раз изменится ширина интерференционных полос на экране в опыте с зеркалом Френеля, если фиолетовый светофильтр (0,4 мкм) заменить красным (0,7 мкм).

4 Определите радиус третьей зоны Френеля для случая плоской волны. Расстояние от волновой поверхности до точки наблюдения равно 1,5 м. Длина волны $\lambda = 0,6$ мкм.

5 Коэффициент поглощения некоторого вещества для монохроматического света определенной длины волны $\alpha = 0,1 \text{ см}^{-1}$. Определите толщину слоя вещества, которая необходима для ослабления света в 2 раза и в 5 раз. Потери на отражение света не учитывать.

6 При прохождении в некотором веществе пути x интенсивность света уменьшилась в 3 раза. Определите, во сколько раз уменьшится интенсивность света при прохождении пути $2x$.

7 Свет падает нормально поочередно на две пластинки, изготовленные из одного и того же вещества, имеющие соответственно толщины $x_1 = 5$ мм и $x_2 = 10$ мм. Определите коэффициент поглощения этого вещества, если интенсивность прошедшего света через первую пластинку составляет 82 %, а через вторую – 67 % от начальной интенсивности.

8 Угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора составляет 30° . Определите изменение интенсивности прошедшего через него света, если угол между главными плоскостями равен 45° .

9 Определите длину отрезка, на котором укладывается столько же длин волн монохроматического света в вакууме, сколько их укладывается на отрезке 5 мм в стекле. Показатель преломления стекла $n = 1,5$.

10 В опыте Юнга расстояние между щелями равно 1 мм, а расстояние от щелей до экрана – 3 м. Определите: 1) положение первой светлой полосы; 2) положение третьей темной полосы, если щели освещать монохроматическим светом с длиной волны 0,5 мкм.

11 Расстояние между двумя щелями в опыте Юнга $\lambda = 0,6$ мкм. Определите расстояние от щелей до экрана, если ширина интерференционных полос равна 1,2 мм.

12 На плоскопараллельную пленку с показателем преломления $n = 1,33$ под углом $i = 45^\circ$ падает параллельный пучок белого света. Определите, при какой наименьшей толщине пленки зеркально от-

раженный свет наиболее сильно окрасится в желтый свет ($\lambda = 0,6$ мкм).

13 Установка для наблюдения колец Ньютона освещается монохроматическим светом с длиной волны $\lambda = 0,6$ мкм, падающим нормально. Пространство между линзой и стеклянной пластиной заполнено жидкостью, и наблюдение ведется в проходящем свете. Радиус кривизны линзы 4 м. Определите показатель преломления жидкости, если радиус второго светлого кольца равен 1,8 мм.

14 Установка для наблюдения колец Ньютона освещается монохроматическим светом, падающим нормально. При заполнении пространства между линзой и стеклянной пластинкой прозрачной жидкостью радиусы темных колец в отраженном свете уменьшились в 1,21 раза. Определите показатель преломления жидкости.

15 Точечный источник света ($\lambda = 0,6$ мкм) расположен на расстоянии 1 м перед диафрагмой с круглым отверстием диаметра 2 мм. Определите расстояние от диафрагмы до точки наблюдения, если отверстие открывает три зоны Френеля.

16 На узкую щель падает нормально монохроматический свет. Его направление на четвертую темную дифракционную полосу составляет $2,2^\circ$. Определите, сколько волн укладывается на ширине щели.

17 На дифракционную решетку нормально падает монохроматический свет с длиной волны $\lambda = 600$ нм. Определите наибольший порядок спектра, полученный с помощью этой решетки, если период дифракционной решетки равен 2 мкм.

18 На дифракционную решетку длиной 15 мм, содержащую $N = 3000$ штрихов нормально падает монохроматический свет с длиной волны $\lambda = 550$ нм. Определите: 1) число максимумов, наблюдаемых в спектре дифракционной решетки; 2) угол, соответствующий последнему максимуму.

19 На дифракционную решетку нормально падает монохроматический свет с длиной волны $\lambda = 0,6$ мкм. Угол дифракции для пятого максимума равен 30° , а минимальная разрешаемая решеткой разность длин волн составляет $\delta\lambda = 0,6$ нм. Определите: 1) постоянную дифракционной решетки; 2) длину дифракционной решетки.

20 Дифракционная решетка имеет $N = 1000$ витков, и её период равен 10 мкм. Определите угловую дисперсию для угла дифракции $\varphi = 30^\circ$ в спектре третьего порядка. Найдите разрешающую способность дифракционной решетки в спектре пятого порядка.

21 Угловая дисперсия дифракционной решетки для $\lambda = 500$ нм в спектре второго порядка равна $4,08 \cdot 10^5$ рад/м. Определите постоянную дифракционной решетки.

22 Луч света выходит из стеклянной призмы ($n = 1,5$) под тем же углом, что и входит в неё. Определите угол отклонения φ луча призмой, если её преломляющий угол равен 60° .

23 Определите скорость электронов, при которой черенковское излучение происходит в среде с показателем преломления $n = 1,54$ под углом $\vartheta = 30^\circ$ к направлению их движения. Скорость выразите в долях скорости света.

24 Определите минимальный импульс, которым должен обладать электрон, чтобы эффект Черенкова – Вавилова наблюдался в среде с показателем преломления $n = 1,5$.

25 Степень поляризации частично поляризованного света составляет $0,75$. Определите отношение максимальной интенсивности света, пропускаемого анализатором, к минимальной.

26 Естественный свет интенсивностью I_0 проходит через поляризатор и анализатор, угол между главными плоскостями которых составляет α . После прохождения света через эту систему он падает на зеркало и, отразившись, проходит вновь через неё. Пренебрегая поглощением света, определить интенсивность I света после его обратного прохождения.

27 Пучок естественного света падает на стеклянную призму с углом $\alpha = 30^\circ$. Определите показатель преломления стекла, если отраженный луч является плоскополяризованным.

28 Пластина кварца толщиной $d_1 = 2$ мм, вырезанная перпендикулярно оптической оси кристалла, поворачивает плоскость поляризации монохроматического света определенной длины волны на угол $\varphi_1 = 30^\circ$. Определите толщину d_2 кварцевой пластинки, помещенной между параллельными николями, чтобы данный монохроматический свет гасился полностью.

29 Определите массовую концентрацию C сахарного раствора, если при прохождении света через трубку длиной $l = 20$ см с этим раствором плоскость поляризации света поворачивается на угол $\varphi_1 = 10^\circ$. Коэффициент удельного вращения сахара равен $1,17 \cdot 10^{-2}$ рад \cdot м³/(м \cdot кг).

Практическое занятие № 16

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СВЕТА С ВЕЩЕСТВОМ

Цель: обобщение и закрепление теоретического материала по теме «Тепловое излучение. Фотоэлектрическое поглощение» и рассмотрение методики решения задач по данной теме.

Требования к исходному уровню знаний и умений

Знать определения следующих физических понятий:

- тепловое (температурное) излучение;
- абсолютно черное тело;
- испускательная способность;
- оптическая пирометрия;
- внешний фотоэлектрический эффект;
- внутренний фотоэффект;
- фотопроводимость;
- вентильный фотоэффект;
- вольт-амперная характеристика фотоэффекта;
- фотон;
- фотоэлемент;
- эффект Комптона;
- рентгеновское и γ -излучения.

Знать определения следующих физических величин, уметь записать формулы, которыми они определяются, указать единицы измерения и значения:

- излучательность тела (энергетическая светимость);
- поглощательная способность;
- квант энергии;
- фототок насыщения;
- задерживающее напряжение;
- красная граница фотоэффекта;
- масса фотона;
- импульс фотона.

Знать формулировку, уметь записать формулы, определяющие следующие физические законы:

- закон Кирхгофа;
- закон Стефана – Больцмана;

- закона внешнего фотоэффекта.

Уметь сформулировать квантовую гипотезу Планка и записать уравнение.

Уметь записать уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта, описать входящие в него величины и знать, на основе какого закона оно выведено.

Сведения из теории

Излучательность тела (энергетическая светимость) (определяющее уравнение)

$$R_s = \frac{dE}{dt \cdot dS},$$

где dE – энергия электромагнитных волн, излучаемая за время dt с поверхности площадью dS .

Связь мощности излучения (потока энергии) с излучательностью при $R_s = \text{const}$:

$$P = R_s S,$$

где S – площадь излучающей поверхности тела.

Поглощательная способность (определяющее уравнение)

$$a_\nu = \frac{dE^{\text{погл}}}{dE^{\text{пад}}},$$

где $dE^{\text{погл}}$ – поглощенная энергия; $dE^{\text{пад}}$ – энергия падающего излучения (в узком спектральном интервале за малое время на поверхность малой площади).

Закон излучения Кирхгофа:

$$\frac{r_\nu}{a_\nu} = f(\nu, T) = r_\nu^*,$$

где $f(\nu, T)$ – универсальная функция частоты и абсолютной температуры (T); r_ν^* – испускательная способность абсолютно черного тела.

Связь излучательности (энергетической светимости) абсолютно черного тела с его абсолютной температурой (закон Стефана – Больцмана):

$$R_s^* = \sigma T^4,$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная Стефана – Больцмана.

Следствие закона Стефана – Больцмана для нечерного тела

$$R_s^* = a_v \sigma T^4,$$

где для серого тела $0 < a_v < 1$, для абсолютно черного тела $a_v = 1$.

Длина волны, при которой испускательная способность абсолютно черного тела r_v^* принимает максимальное значение, связана с абсолютной температурой (закон смещения Вина):

$$\lambda_m T = b,$$

где $b = 2,9 \cdot 10^{-3}$ м·К – первая постоянная Вина.

Максимальное значение испускательной способности абсолютно черного тела пропорционально пятой степени абсолютной температуры:

$$r_{\lambda, T}^* \max = CT^5,$$

где $C = 1,29 \cdot 10^{-5}$ Вт/(м³·К⁵) – вторая постоянная Вина.

Формула Рэля – Джинса (выражение для испускательной способности абсолютно черного тела, полученное с помощью фундаментальных положений классической физики):

$$r_v^* = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT,$$

где k – постоянная Больцмана; c – скорость света в вакууме.

Энергия, соответствующая кванту излучения,

$$\varepsilon_v = h\nu.$$

Энергия фотона

$$\varepsilon_\gamma = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \hbar\omega,$$

где $\hbar = \frac{h}{2\pi}$; эта величина также называется постоянной Планка;

$\omega = 2\pi\nu$ – циклическая частота излучения.

Импульс фотона

$$p_\gamma = \frac{\varepsilon_\gamma}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$

Масса фотона

$$m_{\gamma} = \frac{\epsilon_{\gamma}}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{c\lambda}.$$

Связь максимальной скорости вылетающих при внешнем фотоэффекте электронов (фотоэлектронов) с задерживающим напряжением

$$\frac{mv_{\max}^2}{2} = eU_3,$$

где m – масса электрона; v_{\max} – максимальная скорость; e – заряд электрона по абсолютной величине (элементарный заряд); U_3 – задерживающее напряжение.

Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта:

$$h\nu = A + \frac{mv_{\max}^2}{2},$$

где A – работа выхода электрона из металла.

Соотношения для красной границы фотоэффекта

$$\nu_0 = \frac{A}{h}; \quad \lambda_0 = \frac{hc}{A},$$

где ν_0 – минимальная частота света; λ_0 – максимальная длина волны света, при которых еще возможен фотоэффект.

Изменение длины волны излучения при комптоновском рассеянии (рисунок 1)

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0c} (1 - \cos\theta) = 2 \frac{h}{m_0c} \sin^2 \frac{\theta}{2},$$

где λ – длина волны фотона, налетающего на свободный или слабо связанный электрон; λ' – длина волны фотона, рассеянного на угол θ после столкновения с электроном; m_0 – масса покоя электрона.

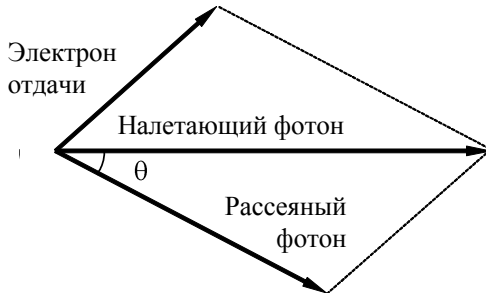


Рисунок 1 – Эффект Комптона

Величина $\Lambda = \frac{h}{m_0 c} = 2,43 \cdot 10^{-12}$ м называется комптоновской длиной волны электрона.

Энергетическая освещенность (определяющее уравнение)

$$E_3 = \frac{dE^{\text{пад}}}{dt \cdot dS},$$

где $dE^{\text{пад}}$ – энергия электромагнитных волн, падающих за время dt на поверхности площадью dS .

Давление света при его нормальном падении на поверхность

$$p = w \cdot 1 + \rho = \frac{E_3}{c} (1 + \rho),$$

где w – объемная плотность энергии излучения; ρ – коэффициент его отражения от поверхности; c – скорость распространения света в вакууме.

Задания для практической части занятия

1 Определите, как и во сколько раз изменится мощность излучения черного тела, если длина волны, соответствующая максимуму его спектральной плотности энергетической светимости, сместилась с $\lambda_1 = 720$ нм до $\lambda_2 = 400$ нм.

2 Определите, какая длина волны соответствует максимальной испускательной способности абсолютно черного тела $(r_{\lambda, T})_{\text{max}}$, равной $1,3 \cdot 10^{11}$ Вт/м³.

3 Считая, что тепловые потери обусловлены только излучением, определите, какую мощность необходимо подводить к медному шару диаметром $d = 2$ см, чтобы при температуре окружающей среды $t_0 = -13$ °С поддерживать его температуру равной $t = 17$ °С. Примите поглощательную способность меди $A_T = 0,6$.

4 Красная граница фотоэффекта для некоторого металла равна 500 нм. Определите: 1) работу выхода электронов из этого металла; 2) максимальную скорость электронов, вырываемых из этого металла светом с длиной волны 400 нм.

5 Определите давление света на стенки электрической 150-ваттной лампочки, принимая, что вся потребляемая мощность идет на излучение и стенки лампочки отражают 15 % падающего на них света. Считайте лампочку сферическим сосудом радиуса 4 см.

6 Определите, с какой скоростью должен двигаться электрон, чтобы его импульс был равен импульсу фотона, длина волны которого $\lambda = 0,5$ мкм.

7 Температура внутренней поверхности муфельной печи при открытом отверстии площадью 30 см^2 равна $1,3$ кК. Принимая, что отверстие печи излучает как черное тело, определите, какая часть мощности рассеивается стенками, если потребляемая мощность составляет $1,5$ кВт.

8 Площадь, ограниченная графиком спектральной плотности энергетической светимости черного тела, при переходе от температуры T_1 к температуре T_2 увеличилась в 5 раз. Определите, как изменится при этом длина волны, соответствующая максимуму спектральной плотности энергетической светимости черного тела.

9 В результате нагревания черного тела длина волны, соответствующая максимуму спектральной плотности энергетической светимости, сместилась с $\lambda_1 = 2,7$ мкм до $\lambda_2 = 0,9$ мкм. Определите, во сколько раз увеличилась: 1) энергетическая светимость тела; 2) максимальная спектральная плотность энергетической светимости тела.

10 Принимая Солнце за черное тело и учитывая, что его максимальной спектральной плотности энергетической светимости соответствует длина волны 500 нм, определите: 1) температуру поверхности Солнца; 2) энергию, излучаемую Солнцем в виде электромагнитных волн за 10 мин; 3) массу, теряемую Солнцем за это время за счет излучения.

11 Определите максимальную скорость фотоэлектронов, вырываемых с поверхности металла, если фототок прекращается при приложении задерживающего напряжения $U_0 = 3,7$ В.

12 Фотоэлектроны, вырываемые с поверхности металла, полностью задерживаются при приложении задерживающего напряжения $U_0 = 3$ В. Фотоэффект для этого металла начинается при частоте падающего монохроматического света $\nu_0 = 6 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$. Определите: 1) работу выхода электронов из этого металла; 2) частоту применяемого излучения.

13 Определите энергию фотона, при которой его эквивалентная масса равна массе электрона. Ответ выразите в электрон-вольтах.

14 Определите длину волны фотона, импульс которого равен импульсу электрона, прошедшего разность потенциалов $U_0 = 9,8$ В.

15 Давление монохроматического света с длиной волны $\lambda = 500$ нм на зачерненную поверхность, расположенную перпендикулярно падающим лучам, равно $0,12$ мкПа. Определите число фотонов, падающих каждую секунду на единицу площади этой поверхности.

16 На идеально отражающую плоскую поверхность нормально падает монохроматический свет с длиной волны $\lambda = 0,55$ мкм. Поток излучения составляет $0,45$ Вт. Определите: 1) число фотонов, падающих на поверхность за время 3 с; 2) силу давления, испытываемую этой поверхностью.

17 Фотон с энергией $\varepsilon = 1,025$ МэВ рассеялся на первоначально покоившемся свободном электроне. Определить угол рассеяния фотона, если длина волны рассеянного фотона оказалась равной комптоновской длине волны $\lambda_c = 2,43$ пм.

18 Фотон с длиной волны $\lambda = 5$ пм испытал комптоновское рассеяние на первоначально покоившемся свободном электроне. Определите: 1) изменение длины волны при рассеянии; 2) энергию электрона отдачи; 3) импульс отдачи электрона.

Практическое занятие № 17

ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИКИ ЯДРА. РАДИОАКТИВНОСТЬ

Цель: обобщение и закрепление теоретического материала по теме «Строение и свойства атомных ядер. Радиоактивность. Элементарные частицы» и рассмотрение решения задач по данной теме.

Требования к исходному уровню знаний и умений

Знать определения следующих физических понятий:

- модель строения атома Резерфорда;
- энергетический уровень;
- основное энергетическое состояние;
- спонтанное излучение;
- вынужденный (индуцированный) переход;
- молекулярные, электронные, колебательные спектры;
- главное, орбитальное, магнитное и спиновое квантовые числа;
- электрон, протон и нейтрон;
- массовое число и атомный номер;

- изотопы;
- удельная энергия связи;
- радиоактивность;
- α -, β - и γ -излучения;
- проникающая и ионизирующая способности;
- радиоактивный распад;
- материнское и дочернее ядра;
- период полураспада;
- ядерные реакции;
- экзотермические и эндотермические реакции;
- античастицы и виртуальные частицы;
- аннигиляция;
- цепная ядерная реакция;
- лептоны и адроны, кварки.

Знать определения следующих физических величин, уметь записать формулы, которыми они определяются, указать единицы измерения и значения:

- радиус ядра;
- энергия связи ядра;
- дефект массы;
- активность нуклида.

Знать формулировку, уметь записать формулу, определяющую закон радиоактивного распада.

Уметь сформулировать два принципа распределения электронов в атоме по энергетическим состояниям.

Уметь записать схемы α -, β^- - β^- -, β^+ - и γ -распадов, описать сопутствующие частицы.

Уметь описать четыре типа фундаментальных взаимодействий: сильное, электромагнитное, слабое и гравитационное.

Сведения из теории

Уравнение для круговых стационарных орбит по теории Бора для водородоподобных атомов:

$$mvr = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar,$$

где m – масса электрона; v – его скорость на орбите; r – ее радиус; n – ее номер (главное квантовое число).

Связь между кинетической, потенциальной и полной энергиями электрона, движущегося в атоме по орбите с номером n (в состоянии с главным квантовым числом n):

$$E_n^k = -E_n; \quad E_n^p = 2E_n; \quad E_n^k = -\frac{1}{2} E_n^p,$$

где E_n^k – кинетическая энергия электрона; E_n – его полная энергия; E_n^p – его потенциальная энергия.

Уравнение Бора для частоты излучения (поглощения)

$$\hbar\omega = h\nu = E_n - E_m,$$

где n и m – номера орбит электрона (его состояний в атоме).

Радиус n -й стационарной орбиты электрона в водородоподобном атоме

$$r_n = \frac{a_0}{Z} n^2,$$

где $a_0 = 5,29 \cdot 10^{-11}$ м – первый боровский радиус (радиус основной, т. е. первой орбиты электрона в атоме водорода); Z – номер элемента в таблице Менделеева.

Полная энергия электрона в водородоподобном атоме

$$E_n = -\frac{Z^2 E_i^H}{n^2},$$

где $E_i^H = 13,6$ эВ – энергия ионизации атома водорода.

Зависимость энергии ионизации электрона в водородоподобном атоме от номера элемента:

$$E_i = E_i^H Z^2.$$

Сериальная формула для циклической частоты излучаемого (поглощаемого) водородоподобным ионом света при переходе электрона с одной орбиты на другую (переходе атома из одного состояния в другое):

$$\omega = R_\infty Z^2 \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

где $R_\infty = \frac{m_0 e^4}{8\varepsilon_0^2 h^3} = 2,07 \cdot 10^{16} \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ – постоянная Ридберга (данное значение соответствует бесконечно тяжелому ядру).

Сериальная формула для частоты света:

$$v = R'_\infty Z^2 \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

где $R'_\infty = 3,29 \cdot 10^{15}$ Гц (также называется постоянной Ридберга).

Сериальная формула для длины волны света:

$$\frac{1}{\lambda} = R''_\infty Z^2 \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

где $R''_\infty = 1,1 \cdot 10^7$ м⁻¹ (также называется постоянной Ридберга).

Длина волны, соответствующая коротковолновой границе тормозного рентгеновского спектра,

$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{eU}.$$

Длина волны де Бройля частицы, имеющей импульс p ,

$$\lambda = \frac{h}{p}.$$

Импульс частицы p связан с ее скоростью v и кинетической энергией E_k :

– для случая малых скоростей –

$$p = m_0 v = \sqrt{2m_0 E_k};$$

– для скоростей, сравнимых по величине со скоростью света, –

$$p = mv = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{c} \sqrt{2E_0 + E_k} \sqrt{E_k},$$

где m – релятивистская масса частицы; v – ее скорость; m_0 – масса покоя частицы; $E_0 = m_0 c^2$ – ее энергия покоя.

Фазовая скорость волн де Бройля

$$v = \frac{\omega}{k} = \frac{E}{p},$$

где k – волновое число волн де Бройля ($k = 2\pi/\lambda$); E – полная энергия частицы.

Соотношение неопределенностей для координаты и импульса:

$$\Delta p_x \Delta x \geq \frac{\hbar}{2},$$

где Δp_x – неопределенность проекции импульса на ось Ox ; Δx – неопределенность соответствующей координаты.

Соотношение неопределенностей для энергии и времени:

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar,$$

где ΔE – неопределенность энергии квазистационарного состояния; Δt – время нахождения квантовой системы в данном энергетическом состоянии.

Значения энергии этой частицы в стационарных состояниях (собственные значения энергии)

$$E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2 n^2}{2ml^2}.$$

Значения, которые может принимать главное квантовое число (электрон в атоме водорода):

$$n = 1; 2; 3; \dots$$

Энергия электрона в стационарном состоянии в атоме водорода

$$E_n = -\frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \frac{1}{n^2}.$$

Значения, которые может принимать орбитальное квантовое число:

$$l = 0; 1; \dots; n - 1.$$

Орбитальный момент импульса электрона в атоме водорода

$$L_l = \hbar \sqrt{l(l+1)}.$$

Значения, которые может принимать магнитное квантовое число:

$$m = -l; -l + 1; \dots; -1; 0; 1; \dots; l - 1; l.$$

Значения, которые может принимать магнитное спиновое квантовое число:

$$m_s = -s; -s + 1; \dots; s - 1; s.$$

Радиус ядра приближенно определяется соотношением

$$r = r_0 A^{1/3},$$

где $r_0 \approx 1,4 \cdot 10^{-15}$ м (коэффициент пропорциональности, который можно считать для всех ядер приближенно постоянным); A – массовое число (число нуклонов в ядре).

Дефект массы ядра

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}} \approx Zm_{\text{1H}} + (A - Z)m_n - m_{\text{ат}},$$

где Z – зарядовое число (число протонов в ядре); m_p – масса протона; m_n – масса нейтрона; $m_{\text{я}}$ – масса ядра; m_{1H} – масса протия (атома водорода ${}^1_1\text{H}$); $m_{\text{ат}}$ – масса нейтрального атома, соответствующего рассматриваемому ядру.

Энергия связи ядра

$$E_{\text{св}} = \Delta m \cdot c^2.$$

Во внесистемных единицах энергия связи ядра

$$E_{\text{св}} = \Delta m \cdot k,$$

где $E_{\text{св}}$ выражена в МэВ, Δm – в а.е.м., $k = 931,5$ МэВ/а.е.м. [1 а.е.м. (атомная единица массы) соответствует энергии покоя 931,5 МэВ].

Закон радиоактивного распада:

$$dN = -\lambda N dt \quad \text{или} \quad N = N_0 e^{-\lambda t},$$

где dN – число ядер, распадающихся за интервал времени dt ; λ – постоянная распада; N – число ядер, не распавшихся к моменту времени t ; N_0 – число ядер в начальный момент ($t = 0$).

Число ядер, распавшихся за время t ,

$$\Delta N = N_0 - N = N_0 \left(1 - e^{-\lambda t}\right).$$

Связь периода полураспада (отрезка времени, за который распадается половина начального числа радиоактивных ядер) с постоянной распада:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \approx \frac{0,693}{\lambda}.$$

Среднее время жизни радиоактивного ядра (совпадает со временем релаксации, т. е. интервалом времени, за который число нераспавшихся ядер уменьшается в e раз)

$$\tau = \frac{1}{\lambda}.$$

Число атомов, содержащихся в радиоактивном веществе,

$$N = \frac{m}{\mu} N_A,$$

где m – масса вещества; N_A – число Авогадро; μ – молярная масса.

Активность радиоактивного препарата (определяющее уравнение)

$$A = \frac{dN^{\text{расп}}}{dt},$$

где $N^{\text{расп}}$ – число ядер, распадающихся за интервал времени dt .

Связь активности с числом радиоактивных ядер:

$$A = \lambda N.$$

Зависимость активности от времени:

$$A = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t},$$

где A_0 – активность препарата в начальный момент времени.

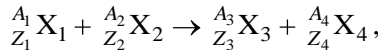
Удельная активность (определяющее уравнение)

$$A_{\text{уд}} = \frac{A}{m}.$$

Связь удельной активности с периодом полураспада:

$$a_{\text{уд}} = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \frac{N_A}{\mu}.$$

Символическая запись ядерной реакции может быть дана развернутом виде



например ${}^9_4\text{Be} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^6_3\text{Li}$.

Во всех ядерных реакциях выполняются законы сохранения:

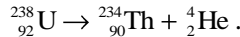
а) числа нуклонов: $A_1 + A_2 = A_3 + A_4$;

б) заряда: $Z_1 + Z_2 = Z_3 + Z_4$;

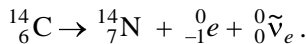
в) релятивистской полной энергии: $E_1 + E_2 = E_3 + E_4$;

г) импульса: $\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}_3 + \vec{p}_4$.

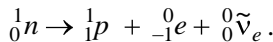
Реакция α -распада урана:



Реакция β -распада радиоуглерода:



Реакция β -распада нейтрона:



Энергия ядерной реакции (энергетический выход) определяется как разница кинетических энергий:

$$Q = \sum_j E_{k,j} - \sum_i E_{k,i},$$

где $\sum_j E_{k,j}$, $\sum_i E_{k,i}$ – суммы кинетических энергий соответственно частиц-продуктов и исходных частиц.

Энергия ядерной реакции также может быть вычислена с помощью энергий покоя или масс покоя соответствующих частиц:

$$Q = c^2 \left(\sum_i m_i - \sum_j m_j \right),$$

где $\sum_i m_i$, $\sum_j m_j$ – суммы масс покоя соответственно исходных частиц и частиц-продуктов.

Задания для практической части занятия

1 Определите, какую часть нейтрального атома $^{12}_6\text{C}$ ($m = 19,9272 \cdot 10^{-27}$ кг) составляет масса его электронной оболочки.

2 Определите энергию связи ядра атома гелия ^4_2He . Масса нейтрального атома гелия равна $6,6467 \cdot 10^{-27}$ кг.

3 Постоянная радиоактивного распада изотопа $^{210}_{82}\text{Pb}$ равна 10^{-9}c^{-1} . Определите время, в течение которого распадается $2/5$ начального количества ядер этого радиоактивного изотопа.

4 Определите энергию, выделившуюся в результате реакции $^{23}_{12}\text{Mg} \rightarrow ^{23}_{11}\text{Na} + ^0_1\text{e} + ^0_0\nu$. Массы нейтральных атомов магния и натрия соответственно равны $3,8184 \cdot 10^{-26}$ и $3,8177 \cdot 10^{-26}$ кг.

5 Принимая, что энергия релятивистских мюонов в космическом излучении составляет 3 ГэВ, определите расстояние, проходимое мюонами за время их жизни, если собственное время жизни мюона $t_0 = 2,2$ мкс, а энергия покоя $E_0 = 100$ МэВ.

6 Определите энергию фотона, испускаемого при переходе электрона в атоме водорода с третьего энергетического уровня на второй.

7 Определите максимальную и минимальную энергии фотона в видимой серии спектра водорода (серии Бальмера).

8 Используя теорию Бора для атома водорода, определите: 1) радиус ближайшей к ядру орбиты (первый борковский радиус); 2) скорость движения электрона по этой орбите.

9 Определите изменение орбитального механического момента электрона при переходе его из возбужденного состояния в основное с испусканием фотона с длиной волны $\lambda = 10,2$ мкм.

10 Докажите, что энергетические уровни атома водорода могут быть описаны выражением $E_n = \frac{2\pi\hbar}{n^2} R$, где R – постоянная Ридберга.

11 Электрон находится на первой боровской орбите атома водорода. Определите для электрона: 1) потенциальную энергию; 2) кинетическую энергию; 3) полную энергию.

12 Определите импульс и энергию: 1) рентгеновского фотона; 2) электрона, если длина волны того и другого равна 10^{-10} м.

13 Определите длину волны де Бройля для электрона, находящегося в атоме водорода на третьей боровской орбите.

14 Определите, какую ускоряющую разность потенциалов должен пройти протон, чтобы длина волны де Бройля для него была равна 1 нм.

15 Электронный пучок ускоряется в электронно-лучевой трубке разностью потенциалов $U = 1$ кВ. Известно, что неопределенность скорости составляет 0,1 % от её числового значения. Найдите неопределенность координаты электрона. Являются ли электроны в данных условиях квантовой или классической частицей?

16 Воспользовавшись соотношением неопределенностей, оцените размытость энергетического уровня в атоме водорода: 1) для основного состояния; 2) для возбужденного состояния (время его жизни равно 10^{-8} с).

17 Длина волны излучаемого атомом фотона составляет 0,6 мкм. Принимая время жизни возбужденного состояния 10^{-8} с, определите отношение естественной ширины энергетического уровня, на который был возбужден электрон, к энергии, излученной атомом.

19 Определите, во сколько раз начальное количество ядер радиоактивного изотопа уменьшится за три года, если за один год оно уменьшилось в 4 раза.

20 Пользуясь таблицей Менделеева и правилами смещения, определите, в какой элемент превращается ${}_{92}^{238}U$ после трех α -распадов и двух β -распадов.

21 Радиоактивный изотоп радия ${}_{88}^{225}\text{Ra}$ претерпевает четыре α -распада и два β -распада. Определите для конечного ядра: 1) зарядовое число; 2) массовое число.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 **Трофимова, Т. И.** Курс физики : учеб. пособие для вузов / Т. И. Трофимова. – 14-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 560 с.
- 2 **Детлаф, А. А.** Курс физики / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – М. : Высшая школа, 1989. – 608 с.
- 3 **Савельев, И. В.** Курс общей физики : учеб.: в 3 т. / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1989. – Т. 1–3.
- 4 **Наркевич, И. И.** Физика для втузов / И. И. Наркевич и [др.]. – Минск : Выш. школа, 1994. Т. 1–2.
- 5 **Волькенштейн, В. С.** Сборник задач по общему курсу физики / В. С. Волькенштейн. – 11-е изд., перераб. – М. : Наука, 1985. – 381 с.
- 6 **Чертов, А. Г.** Физические величины (терминология, определения, обозначения, размерности, единицы) / А. Г. Чертов. – М. : Высш. шк., 1990. – 334 с.
- 7 **Трофимова, Т. И.** Сборник задач по курсу физики для втузов : учеб. пособие / Т. И. Трофимова. – 3-е изд. – М. : ОНИКС-21 век; Мир и Образование, 2005. – 383 с.
- 8 **Сивухин, Д. В.** Общий курс физики / Д. В. Сивухин. – М. : Наука, 1977–1990. – Т. 1–5.
- 9 **Яворский, Б. М.** Справочник по физике / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. – 3-е изд., испр. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. – 624 с.
- 10 **Савельев, И. В.** Сборник задач и вопросов по общей физике / И. В. Савельев. – 2-е изд., перераб. – М. : Наука, 1988. – 288 с.
- 11 **Иродов, И. Е.** Задачи по общей физике : учеб. пособие / И. Е. Иродов. – 2-е изд., перераб. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 416 с.
- 12 **Деликатная, И. О.** Физика для студентов специальности «Транспортная логистика (по направлениям)» : учеб.-метод. пособие : в 2 ч. Ч. 1. Механика. Молекулярная физика / И. О. Деликатная, И. В. Приходько. – Гомель : БелГУТ, 2013. – 64 с.
- 13 **Деликатная, И. О.** Физика для студентов специальности «Транспортная логистика (по направлениям)» : учеб.-метод. пособие : в 2 ч. Ч. 2. Электричество и магнетизм / И. О. Деликатная, И. В. Приходько. – Гомель : БелГУТ, 2014. – 82 с.

**ОТВЕТЫ НА ЗАДАНИЯ
ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ЗАНЯТИЯ**

Практическое занятие № 1

- № 1. $a_{\tau} = 2,7 \text{ м/с}^2$; $a_n = 14,4 \text{ м/с}^2$; $a = 14,7 \text{ м/с}^2$.
- № 2. $a = 5 \text{ м/с}^2$; $t = 2 \text{ с}$.
- № 3. $h = 29,1 \text{ м}$; $v_k = 24,4 \text{ м/с}$.
- № 4. 1) $\omega = 6 \text{ рад/с}$; $v = 1,2 \text{ м/с}$; 2) $a_{\tau} = 0,6 \text{ м/с}^2$; 2) $a_n = 7,2 \text{ м/с}^2$;
 $a = 7,22 \text{ м/с}^2$.
- № 5. $\varepsilon = 0,314 \text{ рад/с}^2$; $N = 90$.
- № 6. 1) $h = 2,87 \text{ м}$; 2) $s = 19,9 \text{ м}$; 3) $t = 1,53 \text{ с}$.
- № 7. $\alpha = 41,6^\circ$.
- № 8. 1) $a_{\tau} = 2,58 \text{ м/с}^2$; 2) $a_n = 9,47 \text{ м/с}^2$.
- № 9. $R = 102 \text{ м}$.
- № 10. 1) $v_{cp} = 28 \text{ м/с}$; 2) $a_{cp} = 19 \text{ м/с}^2$.
- № 11. $t = 4 \text{ с}$.
- № 12. 1) $a_{\tau} = 6 \text{ м/с}^2$; 2) $S_1 = 85 \text{ м}$; 3) $a_2 = 6 \text{ м/с}^2$.
- № 13. 1) $v_1 = 25 \text{ м/с}$; 2) $S_1 = 83,3 \text{ м}$.
- № 14. $\varepsilon = 12,5 \text{ рад/с}^2$.
- № 15. 1) $\varepsilon = 12,5 \text{ рад/с}^2$; 2) $N = 300$.
- № 16. $a_n = 1,5 \text{ см/с}^2$.
- № 17. 1) $\omega = 2 \text{ рад/с}$; 2) $\varepsilon = 12,5 \text{ рад/с}^2$; 3) $a_{\tau} = 0,8 \text{ м/с}^2$; 2) $a_n = 3,2 \text{ м/с}^2$;
 $a = 3,3 \text{ м/с}^2$.

Практическое занятие № 2

- № 1. 1) $T_1 = 14,8 \text{ Н}$; 2) $T_2 = 4,8 \text{ Н}$.
- № 2. $f = 0,58$.
- № 3. $\alpha = 6,5^\circ$ (1 рад $\approx 57^\circ 17'$).
- № 4. $F = 74 \text{ кН}$.
- № 5. 1) $T = 5,9 \text{ Н}$; 2) $T = 3,9 \text{ Н}$.
- № 6. 1) $a = 3,63 \text{ м/с}^2$; 2) $t = 1,05 \text{ с}$; 3) $v = 3,81 \text{ м/с}$.
- № 7. $\mu = 0,268$.
- № 8. $\mu = 0,137$.
- № 9. 1) $a = 4,17 \text{ м/с}^2$; 2) $T = 2,82 \text{ Н}$.
- № 10. $T = 4,41 \text{ Н}$.
- № 11. $x_1 = 4 \text{ см}$.
- № 12. 1) $k_{посл} = 1,5 \text{ кН/м}$; 2) $k_{пар} = 8 \text{ кН/м}$.
- № 13. $\sigma = 3,12 \text{ МПа}$.

№ 14. 1) $\sigma = 78,5$ МПа; 2) $\varepsilon = 3,90 \cdot 10^{-4}$; 3) $x = 1,2$ мм.

№ 15. $E = 208$ ГПа.

№ 16. $E = 196$ ГПа.

№ 17. $l = 111$ м.

№ 18. $\sigma = 948$ МПа

№ 19. $g_{\text{л}} = 1,61$ м/с².

№ 20. $g = 0,21$ м/с².

№ 21. $h = 1,69$ Мм.

№ 22. 1) $\omega = 7,27$ рад/с; 2) $R = 42,2$ Мм.

№ 23. $n = 0,5$ с⁻¹.

№ 24. В 6,1 раза.

№ 25. 1,42 с.

Практическое занятие № 3

№ 1. $A = 37,9$ кДж.

№ 2. $A = 1500$ Дж.

№ 3. $A = 4,72$ кДж.

№ 4. $l = 19$ м.

№ 5. 1) $\sigma = 49$ МПа; 2) $x = 1,29$ мм, $\varepsilon = 2,46 \cdot 10^{-4}$; 3) $E_p = 12,1$ Дж.

№ 6. $v(t) = \frac{F}{\mu} \ln \frac{m_0}{m_0 - \mu t}$.

№ 7. $a = 11,6$ м/с².

№ 8. 1) $t = 0,66$ с; 2) $v_2 = 220$ м/с.

№ 9. $N = 16$ Вт.

№ 10. $A = 2,15$ кДж; $N = 0,62$ кВт.

№ 11. $T = 0,24$ Дж; $s = 1,53$ м.

№ 12. $a_{\tau} = 0,1$ м/с²

№ 13. $A = 2,5$ Дж.

№ 14. $A = 15,4$ Дж.

№ 15. 1) $\Pi = 2,5$ Дж; 2) $w = 0,4$ МДж / м³.

№ 16. 1) $r = 4$ см; 2) $r = 6$ см.

Практическое занятие № 4

№ 1. $v_1' = 8 \cdot 10^{-2}$ м/с.

№ 2. $v = 7,9 \cdot 10^3$ м/с.

№ 3. $h = 2292$ м.

№ 4. $u = 2,3$ м/с, $E_{\text{к1}} = 8,25$ Дж, $E_{\text{к2}} = 4,1$ Дж.

№ 5. $v_2 = 900$ м/с.

- № 6. $s = 4l$.
- № 7. $v = 835$ м/с.
- № 8. $v = 1,55$ м/с.
- № 9. Ответ зависит от выбора системы координат.
- № 10. Ответ зависит от выбора системы координат.
- № 11. $v = 1,12$ м/с.
- № 12. $h = 7,9$ м.
- № 13. $v = 164$ м/с.
- № 14. $h = 15$ м.
- № 15. $v_1 = 37,3$ м/с.

Практическое занятие № 5

- № 1. $a = 2,8$ м/с².
- № 2. $v = 0,942$ м/с.
- № 3. $I = 10^{-3}$ кг·м².
- № 4. $I = 0,12$ кг·м².
- № 5. $I = 0,09$ кг·м².
- № 6. $M = -0,1$ Н·м.
- № 7. 1) $M = 0,1$ Н·м; 2) $I = 1,59 \cdot 10^{-2}$ кг·м².
- № 8. $M = 16$ Н·м.
- № 9. $m = 16$ кг.
- № 10. 1) $I = 6,25, 12$ кг·м² ; 2) $M = 50$ кг .
- № 11. $I = 0,259$ кг·м².
- № 12. $t = 0,585$ с.

Практическое занятие № 6

- № 1. $v = 2,5 \cdot 10^2$ моль; $N = 1,5 \cdot 10^{26}$.
- № 2. $m = 0,26$ кг.
- № 3. $m_1 = 16$ г; $m_2 = 8$ г.
- № 4. $T = 400$ К.
- № 5. $p_2 = 3,63 \cdot 10^5$ Па.
- № 6. 1) $n = 6,27 \cdot 10^{25}$ м⁻³; 2) $N = 18,8 \cdot 10^{22}$
- № 7. 1) $M = 0,75$ МПа; 2) $3 \cdot 10^{-3}$ кг/м³.
- № 8. $\Delta p = 133$ Па.
- № 9. $F = 32,3$ кН.
- № 10. $m_1 = 6,87$ г; $m_2 = 4,81$ г.
- № 11. $m = 6,2$ кг;
- № 12. $p = 2,66$ кПа.

Практическое занятие № 7

- № 1. $\langle \varepsilon_{\text{вр}} \rangle = 3,94 \cdot 10^{-21}$ Дж; $W_{\text{вр}} = 296$ Дж.
- № 2. $\langle v \rangle = 362,4$ м/с.
- № 3. Увеличится в 4 раза.
- № 4. 1) $\langle \varepsilon_1 \rangle = 6,9 \cdot 10^{-21}$ Дж; 2) $\langle \varepsilon_n \rangle = 20,7 \cdot 10^{-21}$ Дж;
3) $\langle \varepsilon_{\text{вр}} \rangle = 13,8 \cdot 10^{-21}$ Дж; 4) $\langle \varepsilon \rangle = 34,5 \cdot 10^{-21}$ Дж.
- № 5. 1) $T = 7250$ К; 2) $\langle \varepsilon_n \rangle = 1,5 \cdot 10^{-19}$ Дж.
- № 6. $p = 768$ Па.
- № 7. $v_B = 478$ м/с.
- № 8. $h = 4,22$ км.
- № 9. В $e^{23,6}$ раза.
- № 10. $\langle l \rangle = 1,55$ нм.
- № 11. $\rho = 1,55$ мг/м³.
- № 12. $\langle z \rangle = 3/9 \cdot 10^9$ с⁻¹.
- № 13. $\langle t \rangle = 288$ нс.

Практическое занятие № 8

- № 1. $Q = 291$ кДж; $\Delta U = 208$ кДж; $A = 83$ кДж.
- № 2. 1) $Q_1 = 3,5$ кДж; 2) $Q_2 = 2,5$ кДж.
- № 3. 1) гелий; 2) $v_1 = 1,25$ м³/кг.
- № 4. 1) $Q_1 = 1$ кДж; 2) $Q_2 = 3,5$ кДж.
- № 5. 1) $\Delta U = -4,03$ кДж; 2) $A = 4,03$ кДж.
- № 6. 1) $V_2 = 0,228$ м³; 2) $T_2 = 411$ К; 3) $\Delta U = 82,4$ кДж.
- № 7. $\eta = 0,041$.
- № 8. $T_2 = 284$ К.
- № 9. $\Delta S = 3,6$ Дж/К.
- № 10. $\Delta S = 737$ Дж/К.
- № 11. 1) $c_v = 742$ Дж/(кг·К); 2) $c_p = 1,04$ кДж/(кг·К).
- № 12. 1) $c_v = 649$ Дж/(кг·К); 2) $c_p = 909$ Дж/(кг·К); кислород.
- № 13. 1) $c_v = 667$ Дж/(кг·К); 2) $c_p = 917$ Дж/(кг·К).
- № 14. $\gamma = 1,55$.
- № 15. 1) $Q_1 = 3,5$ кДж; 2) $Q_2 = 2,5$ кДж.
- № 16. 1) гелий; 2) $v_1 = 1,25$ м³/кг.
- № 17. 1) $\Delta S_1 = 28,8$ Дж/К; 2) $\Delta S_2 = 40,3$ Дж/К
- № 18. $A_{34} = -240$ кДж.

Практическое занятие № 9

- № 1. Вакуум высокий.
№ 2. $\eta_1/\eta_2 = 1,25$.
№ 3. $\lambda = 7,42 \text{ мВт}/(\text{м}\cdot\text{К})$.
№ 4. $D = 9,18 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.
№ 5. $\Delta U = 155 \text{ Дж}$.
№ 6. $\sigma = 62,5 \text{ мН}/\text{м}$.
№ 7. $d = 1,6 \text{ мм}$.
№ 8. $p = 118 \text{ кПа}$.
№ 9. $D = 8,89 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.
№ 10. $Q = 76,4 \text{ кДж}$
№ 11. $m = 15,6 \text{ мг}$.
№ 12. 1) $q_1 = 196 \text{ Вт}/\text{м}^2$; 2) $q_2 = 35 \text{ Вт}/\text{м}^2$.
№ 13. 1) $V' = 2,43 \text{ см}^3$; 2) $p' = 18,6$.
№ 14. 1) $p_1 = 3,06 \text{ МПа}$; 2) $p_2 = 3,12 \text{ МПа}$.
№ 15. $T_2 - T_1 = -11,8$.

Практическое занятие № 10

- № 1. $F = 2,7 \cdot 10^4 \text{ Н}$.
№ 2. $\alpha = 13^\circ$.
№ 3. $E = 1,67 \cdot 10^4 \text{ В}/\text{м}$.
№ 4. $F_l = 3,4 \text{ Н}/\text{м}$.
№ 5. $\rho = 1,6 \text{ г}/\text{см}^3$.
№ 6. $Q = 1,15 \text{ нКл}$.
№ 7. $Q = 16,1 \text{ нКл}$.
№ 8. 1) $E = 10,1 \text{ кВ}/\text{м}$; 2) $E = 17,5 \text{ кВ}/\text{м}$.
№ 9. $E = 576 \text{ В}/\text{м}$.
№ 10. $\Phi_E = 3,46 \text{ кВ}\cdot\text{м}$.
№ 11. 1) $E = 0$; 2) $E = 10,3 \text{ кВ}/\text{м}$.
№ 12. $\sigma = 8,85 \text{ мкКл}/\text{м}^2$.
№ 13. 1) $E = 395 \text{ В}/\text{м}$; 2) $E = 169 \text{ кВ}/\text{м}$.
№ 14. 1) $E = 0$; 2) $E = 800 \text{ В}/\text{м}$; 3) $E = 450 \text{ В}/\text{м}$;
№ 15. 1) $E = 0$; 2) $E = 5 \text{ кВ}/\text{м}$; 3) $E = 0,9 \text{ кВ}/\text{м}$;
№ 16. 1) $E = 5,65 \text{ В}/\text{м}$; 2) $E_R = 11,3 \text{ В}/\text{м}$ (для $r \leq R$); $E_R = 56,5 \text{ В}/\text{м}$
(для $r \geq R$); 3) $E = 25,1 \text{ В}/\text{м}$.

Практическое занятие № 11

- № 1. $A = 180$ мкДж.
№ 2. а) $\varphi = 11,3$ В; б) $\varphi = 30$ В.
№ 3. $v = 2,53 \cdot 10^6$ м/с.
№ 4. $C = 0,33$ мкФ.
№ 5. $\tau = 4,33$ мкКл/м.
№ 6. $A = 9,04 \cdot 10^{-19}$ Дж.
№ 7. $W = 4,87$ мДж.
№ 8. 1) $\varphi_1 = 1,8$ кВ; 2) $\varphi_2 = 1,29$ кВ.
№ 9. $\varphi_1 - \varphi_2 = 16,9$ В.
№ 10. $\varphi_1 - \varphi_2 = 0,94$ В.
№ 11. $\varphi_1 - \varphi_2 = 2,26$ В.
№ 12. $\sigma = 24,8$ мкКл/м³.
№ 13. 1) $E = 100$ В/м; 2) $D = 6,19$ нКл/м².
3) $P = 5,31$ нКл/м²; 4) $\sigma' = 5,31$ нКл/м².
№ 14. 1) $\chi = 6$; 2) $\sigma' = 5,31$ нКл/м².
№ 15. 1) $E_1 = 182$ кВ/м, $E_2 = 637$ кВ/м; 2) $D = 11,3$ мкКл/м².
№ 16. $\sigma' = 253$ нКл/м².
№ 17. 1) $U_2 = 250$ В; 2) $C_1 = 118$ пФ; 3) $C_2 = 236$ пФ.
№ 18. 1) $U_2 = 500$ В; 2) $C_1 = 118$ пФ; 3) $C_2 = 236$ пФ.
№ 19. $U_1 = 75$ В.
№ 20. $U_1 = 6$ В; $U_2 = 3$ В; $Q_1 = Q_2 = 18$ мк Кл
№ 21. $W = 0,164$ пДж.

Практическое занятие № 12

- № 1. $\langle v \rangle = 74$ мкм/с.
№ 2. В 5 раз.
№ 3. $F = 2,72 \cdot 10^{-21}$ Н
№ 4. $Q = 900$ Дж.
№ 5. $w = 65$ Дж/(м³·с).
№ 6. $r = 0,17$ Ом.
№ 7. $t = 607$ с = 10 мин 7 с.
№ 8. $U = 110$ В.
№ 9. $T = 8036$ К.
№ 0. $R = 3,4 \cdot 10^{14}$ Ом.
№ 11. $Q = 5$ Кл.
№ 12. $j = 1$ А/мм².

- № 13. $l = 87,8 \text{ м}$.
 № 14. $R_1 = 100 \text{ Ом}$; $U = 220 \text{ В}$.
 № 15. $R_1 = 3 \text{ Ом}$; $I_2 = 0,75 \text{ А}$; $I_3 = 0,25 \text{ А}$.
 № 16. 1) $E_1 = 45,8 \text{ кВ/м}$; 2) $E_2 = 1,7 \text{ кВ/м}$.
 № 17. $l = 6,99 \text{ м}$.
 № 18. $P_1 : P_2 = 0,173$.
 № 19. $I_{кз} = 0,25 \text{ А}$.

Практическое занятие № 13

- № 1. $B = 308 \text{ мкТл}$.
 № 2. 1) $B_1 = 0$; 2) $B_2 = -160 \text{ мкТл}$; 3) $B_3 = 113 \text{ мкТл}$.
 № 3. $B = 13,3 \text{ мкТл}$.
 № 4. $B = 104 \text{ мкТл}$.
 № 5. $IN = 200 \text{ А} \cdot \text{ВИТКОВ}$; $U = 2,83 \text{ В}$.
 № 6. $A = 0,2 \text{ Дж}$; $P = 20 \text{ мВт}$.
 № 7. $R = 0,09 \text{ м}$; $T = 30 \cdot 10^{-9} \text{ с}$; $M = 1,5 \cdot 10^{-24} \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}$.
 № 8. $a_\tau = 0$; $a_n = 7 \cdot 10^{15} \text{ м/с}^2$.
 № 9. 1) $R = 45 \text{ мм}$; 2) $n = 4,2 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$.
 № 10. $I_2 \approx 600 \text{ А}$.
 № 11. $W = 0,28 \cdot 10^{-4} \text{ Дж}$ или $W = 17,5 \text{ МэВ}$.
 № 12. $q = 3,2 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$.
 № 13. 1) $p_m = 1,52 \text{ нА} \cdot \text{м}^2$; 2) $p_m/L = 251 \text{ нКл/кг}$.
 № 14. $B = 46,4 \text{ мкТл}$.
 № 15. 1) $R = 11,7 \text{ см}$; 2) $I = 35,1 \text{ А}$.
 № 16. $B = 21,2 \text{ мкТл}$.
 № 17. $I = 83,2 \text{ А}$.
 № 18. $I = 10 \text{ А}$.
 № 19. $v = 2 \text{ Мм/с}$.
 № 20. $n = 2,5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$, $n/n' = 0,984$.
 № 21. $\Delta\varphi = 2,21 \text{ мкВ}$.
 № 22. $B = 20 \text{ мкТл}$.
 № 23. $\varepsilon_i = 64 \text{ мВ}$.
 № 24. $\alpha = 60^\circ$.
 № 25. $I_k = 1,66 \text{ мА}$.
 № 26. $W = 0,75 \text{ Дж}$.
 № 27. $w = 22,6 \text{ Дж/м}^3$.
 № 28. 1) $B = 1,2 \text{ мкТл}$; 2) $J = 66 \text{ А/м}$.
 № 29. $J = 954 \text{ кА/м}$.
 № 30. $W = 2,2 \text{ Дж}$.

Практическое занятие № 14

- № 1. 1) $A = 0,02$ м; 2) $\omega_0 = 18,84$ с⁻¹; 3) $\nu = 3$ Гц; 4) $T = 0,33$ с.
- № 2. 1) $|F_{\max}| = 0,158$ Н; 2) $T_{\max} = 7,89 \cdot 10^{-3}$ Дж.
- № 3. $T = 1,19$ с.
- № 4. $A = 11,2$ см.
- № 5. 1) $\Delta_{\max} = 2,5$ м; 2) $\Delta_{\min} = 1,25$ м.
- № 6. $\Delta\varphi = \pi$, т.е. точки колеблются в противофазе.
- № 7. $\Delta\nu = 35,4$ Гц.
- № 8. $\lambda = 62,8$ м.
- № 9. $p = \langle v \rangle = 14,1$ нПа.
- № 10. $\omega_0 = 4,24 \cdot 10^6$ с⁻¹.
- № 11. $x = 9,24 \cos(\pi t/2 + \pi/8)$.
- № 12. 1) $\omega_1 = 46$ с⁻¹; $\omega_2 = 44$ с⁻¹; 2) $T_{\text{б}} = 3,14$ с.
- № 13. $x^2/A^2 + y^2/B^2 = 1$.
- № 14. 1) $t_1 = 97,6$ с.
- № 15. $r = 8,51 \cdot 10^{-4}$.
- № 16. $\omega_0 = 67$ рад/с.
- № 17. $Q = 227$.
- № 18. $T = 3,14$ мс; $\theta = 0,063$; $U(t) = 100e^{-20t} \cos 637 \pi t$.
- № 19. $\nu_{\text{рез}} = 299,7$ Гц.
- № 20. 1) $I_m = 4,5$ А; 2) $\varphi = -1^\circ$.
- № 21. $R = 2,28$ Ом.
- № 22. $\varphi = 60^\circ$.
- № 23. $\lambda = 10$ м; $y = 0,05 \cos(2\pi t - \pi x/5)$, м; $y = 5$ см.
- № 24. $y = 2A \cos(2\pi x/\lambda) \cos \omega t$ – уравнение стоячей волны,
- № 25. $I = 5,01$ мкВт/м².
- № 26. $\nu = 328$ м/с.
- № 27. $H_0 = 3,77$ В/м.

Практическое занятие № 15

- № 1. $\lambda = 0,63$ мкм.
- № 2. $\alpha = 1,16 \cdot 10^{-4}$ рад = $24''$.
- № 3. $\Delta x_1/\Delta x_2 = 0,57$.
- № 4. $r = 1,64$ мм.
- № 5. $d_1 = 6,93$ см; $d_2 = 16,1$ см.
- № 6. $I_0/I_2 = 9$ раз.
- № 7. $\alpha = 0,404$ см⁻¹.
- № 8. $I_1/I_2 = 1,5$.

- № 9. $l_1 = 7,5$ мм.
- № 10. 1) $x_{\max} = \pm 1,5$ мм; 2) $x_{\min} = \pm 5,25$ мм.
- № 11. $l = 1$ м.
- № 12. $d_{\min} = 400$ нм.
- № 13. $n = 1,48$.
- № 14. $n = 1,46$.
- № 15. $b = 2$ м.
- № 16. $a / \lambda = 104$.
- № 17. $m_{\max} = 3$.
- № 18. 1) $n = 18$; 2) $\varphi = 81^{\circ}54'$.
- № 19. 1) $d = 6$ мкм; 2) $l = 3,6$ мм.
- № 20. 1) $D_{\varphi} = 3,46 \cdot 10^5$ рад/м; 2) $R = 5000$.
- № 21. $d = 5$ мкм.
- № 22. $\varphi = 37^{\circ}11'$.
- № 23. $\nu = 0,75$ с.
- № 24. $p_{\min} = 2,44 \cdot 10^{-22}$ кг·м/с.
- № 25. $I_{\max}/I_{\min} = 7$.
- № 26. $I = 0,5 I_0 \cos^4 \alpha$.
- № 27. $n = 1,73$.
- № 28. $d_2 = 6$ мм.
- № 29. $C = 74,8$ кг/м³.

Практическое занятие № 16

- № 1. Увеличилась в 10,5 раз.
- № 2. $\lambda_{\max} = 183$ мкм.
- № 3. $P = 0,107$ Вт.
- № 4. 1) $A = 2,49$ эВ; 2) $v_{\max} = 468$ км/с.
- № 5. $p = 28,6$ мкПа.
- № 6. $v_e = 1,46$ км/с.
- № 7. $P_{\text{рас}}/P = 0,676$.
- № 8. Уменьшится в 1,49 раза.
- № 9. 1) увеличится в 81 раз; 2) увеличится в 243 раза.
- № 10. 1) $T = 5,8$ кК; 2) $W = 2,43 \cdot 10^{29}$ Дж; 3) $m = 2,6 \cdot 10^{12}$ кг.
- № 11. $v_{\max} = 1,14$ Мм/с.
- № 12. 1) $A = 2,48$ эВ; 2) $\nu = 1,38 \cdot 10^{15}$ с⁻¹.
- № 13. $\varepsilon = 512$ кэВ.
- № 14. $\lambda = 392$ пм.
- № 15. $N = 9,05 \cdot 10^{19}$ м⁻²с⁻¹.

№ 16. 1) $N = 3,73 \cdot 10^{18}$; 2) $F = 3 \text{ нН}$.

№ 17. $\theta = 60^\circ$.

№ 18. 1) $\Delta\lambda = 2,43 \text{ пм}$; 2) $W = 81,3 \text{ кэВ}$; 3) $p_e = 1,6 \cdot 10^{-22} \text{ кг}\cdot\text{м/с}$.

Практическое занятие № 17

№ 1. $\frac{zm_e}{m} = 2,74 \cdot 10^{-4}$.

№ 2. $E_{\text{св}} = 28,4 \text{ МэВ}$.

№ 3. $t = 16,2 \text{ год}$.

№ 4. $Q = 2,91 \text{ МэВ}$.

№ 5. $l = 19,8 \text{ км}$.

№ 6. $E_{3,2} = 1,87 \text{ эВ}$.

№ 7. $E_{\text{max}} = 3,41 \text{ эВ}$; $E_{\text{min}} = 1,89 \text{ эВ}$.

№ 8. $r = 52,8 \text{ пм}$; $v_1 = 2,19 \text{ Мм/с}$.

№ 9. $\Delta L = 2,1 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$.

№ 10. 1) $E_n = -27,2 \text{ эВ}$; 2) $E_k = 13,6 \text{ эВ}$; 3) $E = -13,6 \text{ эВ}$.

№ 11. $p_\gamma = 6,63 \cdot 10^{-24} \text{ кг}\cdot\text{м/с}$; $E_\gamma = 12,4 \text{ кэВ}$; $p_e = 6,63 \cdot 10^{-24} \text{ кг}\cdot\text{м/с}$;
 $E_e = 151 \text{ кэВ}$.

№ 12. $\lambda = 1 \text{ нм}$.

№ 13. $U = 0,822 \text{ мВ}$.

№ 14. $\Delta x = 38,8 \text{ пм}$.

№ 15. $\Delta E = 0$; $\Delta E = 414 \text{ нэВ}$.

№ 16. $\frac{\Delta E}{E} = 2,74 \cdot 10^{-7}$

№ 17. $\frac{N_0}{N} = 64$.

№ 18. $T_{1/2} = 4,4 \text{ сут}$.

№ 19. $X = {}_{88}^{226}\text{Ra}$.

№ 20. $Z = 82$; $A = 209$.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(справочное)

Справочные данные

1 Некоторые физические постоянные (округленные значения)

Ускорение свободного падения.....	$g = 9,81 \text{ м/с}^2$
Гравитационная постоянная.....	$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$
Постоянная Авогадро.....	$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Молярная газовая постоянная.....	$R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$
Скорость света в вакууме.....	$c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Постоянная Больцмана.....	$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Элементарный заряд.....	$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Масса покоя электрона.....	$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Масса покоя протона.....	$m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Масса покоя нейтрона.....	$m_n = 1,6750 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Электрическая постоянная.....	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Магнитная постоянная.....	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$
Магнетон Бора.....	$\mu_B = 0,927 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/Тл}$
Постоянная Стефана – Больцмана.....	$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$
Первая постоянная Вина.....	$b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$
Вторая постоянная Вина.....	$C = 1,29 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}^5)$
Постоянная Планка.....	$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Комптоновская длина волны электрона.....	$\lambda = 2,43 \cdot 10^{-12} \text{ м}$
Первый боровский радиус.....	$a_0 = 5,29 \cdot 10^{-11} \text{ м}$
Энергия ионизации атома водорода.....	$E_i = 2,16 \cdot 10^{-18} \text{ Дж}$
Постоянная Ридберга.....	$R = 2,07 \cdot 10^{16} \text{ рад/с}$
Атомная единица массы.....	$1 \text{ а. е. м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$

2 Некоторые астрономические величины

Наименование	Значение	Наименование	Значение
Радиус Земли	$6,37 \cdot 10^6 \text{ м}$	Масса Солнца	$1,98 \cdot 10^{30} \text{ кг}$
Масса Земли	$5,98 \cdot 10^{24} \text{ кг}$	Радиус Луны	$1,74 \cdot 10^6 \text{ м}$
Радиус Солнца	$6,95 \cdot 10^8 \text{ м}$	Масса Луны	$7,33 \cdot 10^{22} \text{ кг}$

3 Плотность твёрдых тел и жидкостей

Вещество	$\rho, 10^3 \text{ кг/м}^3$	Вещество	$\rho, 10^3 \text{ г/м}^3$
Алюминий	2,70	Вода (при 4 °С)	1
Железо	7,88	Глицерин	1,26
Медь	8,93	Дизельное топливо	1
Свинец	11,3	Масло трансформаторное	0,9
Серебро	10,5	Керосин	0,8
Эбонит	1,2	Масло касторовое	0,9
Магний	1,74	Спирт	0,83

4 Упругие постоянные твердых тел

Вещество	Модуль Юнга E , ГПа	Модуль сдвига G , ГПа
Алюминий	69	24
Вольфрам	380	140
Железо (сталь)	200	76
Медь	98	44

5 Эффективный диаметр молекул, динамическая вязкость и теплопроводность газов при нормальных условиях

Вещество	Эффективный диаметр d , нм	Динамическая вязкость η , мкПа·с	Теплопроводность λ , мВт/(м·К)
Азот	0,38	16,6	24,3
Водород	0,28	8,66	168
Воздух	0,27	17,2	24,1
Гелий	0,22	18,9	142
Кислород	0,36	19,8	24,4
Пары воды	0,30	8,32	15,8

6 Динамическая вязкость (η) жидкостей при 20 °С, мПа·с

Вода	1,00
Глицерин	1480
Масло касторовое	967
Масло машинное	100

7 Поверхностное натяжение σ жидкостей при 20 °С, мН/м

Вода	73
Глицерин	62
Мыльная вода	40
Ртуть	500
Спирт	22

8 Диэлектрическая проницаемость ϵ некоторых веществ

Вещество	ϵ	Вещество	ϵ
Вода	81,0	Оргстекло	3,5
Глицерин	3,9	Полиэтилен	2,3
Керосин	2,0	Резина, каучук	2,5
Масло (трансформаторное)	2,2	Слюда	7,5
Масло (касторовое)	4,8	Стекло	7,0
Спирт	26,0	Фарфор	5,0
Парафин	2,0	Эбонит	2,7

**9 Удельное сопротивление ρ_0 (при 20 °С)
и температурный коэффициент α проводников**

Вещество	$\rho_0, 10^{-8}$ Ом·м	$\alpha, 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Серебро	1,66	40
Алюминий	3,21	38
Медь	1,7	42,8
Железо	12	62,0
Вольфрам	5,5	51,0
Свинец	20,8	43,0
Нихром	100,0	4,0
Манганин	44,5	0,5
Никелин	40,0	2,3
Графит	390	-8,0

10 Подвижность ионов газов (при нормальных условиях)

Газ	Подвижность, $10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$		Газ	Подвижность, $10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$	
	u_+	u_-		u_+	u_-
Водород	1,3	1,8	Кислород	1,3	1,8
Воздух	5,4	7,4	Углекислый газ	1,0	1,1
Азот	1,4	1,9	Хлор	0,6	0,5

11 Магнитные восприимчивости пара- и диамагнетиков

Парамагнетики	$\chi, 10^{-6}$	Диамагнетики	$\chi, 10^{-6}$
Азот	0,013	Водород	-0,063
Алюминий	23	Бензол	-7,5
Воздух	0,38	Висмут	-176
Вольфрам	176	Вода	-9
Жидкий кислород	3400	Каменная соль	-12,6
Кислород	1,9	Кварц	-15,1
Марганец	121	Медь	-10,3
Платина	360	Стекло	-12,3

12 Работа выхода электрона из металлов

Металл	Работа выхода, эВ	Металл	Работа выхода, эВ	Металл	Работа выхода, эВ
Алюминий	3,74	Литий	2,39	Платина	5,29
Вольфрам	4,50	Медь	4,47	Серебро	4,28
Железо	4,36	Натрий	2,27	Цезий	1,89
Калий	2,15	Никель	4,84	Цинк	3,74

13 Масса и энергия покоя некоторых частиц

Частица	Масса покоя		Энергия покоя	
	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	$1,5 \cdot 10^{-10}$	938
Нейтрон	$1,675 \cdot 10^{-27}$	1,00867	$1,51 \cdot 10^{-10}$	939
Дейтон	$3,35 \cdot 10^{-27}$	2,01355	$3,00 \cdot 10^{-10}$	1876
α -частица	$6,64 \cdot 10^{-27}$	4,00149	$5,96 \cdot 10^{-10}$	3733

14 Относительные атомные массы (округленные средние значения) A и порядковые номера Z некоторых элементов

Элемент	Символ	A	Z	Элемент	Символ	A	Z
Азот	N	14	7	Марганец	Mn	55	25
Алюминий	Al	27	13	Молибден	Mo	96	42
Аргон	Ar	40	18	Медь	Cu	64	29
Барий	Ba	137	56	Натрий	Na	23	11
Бор	B	11	5	Неон	Ne	20	10
Бром	Br	80	35	Никель	Ni	59	28
Ванадий	V	51	23	Олово	Sn	119	50
Висмут	Bi	209	83	Платина	Pt	195	78
Водород	H	1	1	Радий	Ra	226	88
Вольфрам	W	184	74	Радон	Rn	222	86
Гелий	He	4	2	Ртуть	Hg	201	80
Железо	Fe	56	26	Свинец	Pb	207	82
Золото	Au	197	79	Сера	S	32	16
Иод	I	127	53	Серебро	Ag	108	47
Калий	K	39	19	Титан	Ti	48	22
Кальций	Ca	40	20	Фосфор	P	31	15
Кислород	O	16	8	Цинк	Zn	65	30
Кобальт	Co	59	27	Углерод	C	12	6
Кремний	Si	28	14	Уран	U	238	92
Магний	Mg	24	12	Хлор	Cl	35	17

15 Массы атомов некоторых изотопов

Элемент	Символ изотопа	Масса, а. е. м.	Элемент	Символ изотопа	Масса, а. е. м.
Водород	${}^1_1\text{H}$	1,00782	Бериллий	${}^7_4\text{Be}$	7,01692
	${}^2_1\text{H}$	2,01410		${}^8_4\text{Be}$	8,00530
	${}^3_1\text{H}$	3,01604		${}^9_4\text{Be}$	9,01218
Гелий	${}^3_2\text{He}$	3,01602	Бор	${}^9_5\text{B}$	9,01332
	${}^4_2\text{He}$	4,00260		${}^{10}_5\text{B}$	10,01293
Литий	${}^6_3\text{Li}$	6,01512	Углерод	${}^{11}_5\text{B}$	11,00930
	${}^7_3\text{Li}$	7,01600		${}^{10}_6\text{C}$	10,01685

Элемент	Символ изотопа	Масса, а. е. м.	Элемент	Символ изотопа	Масса, а. е. м.
Углерод	$^{12}_6\text{C}$	12,00000	Фосфор	$^{30}_{15}\text{P}$	29,97831
	$^{13}_6\text{C}$	13,00335		$^{31}_{15}\text{P}$	30,97376
	$^{14}_6\text{C}$	14,00324	Калий	$^{39}_{19}\text{K}$	38,96370
Азот	$^{13}_7\text{N}$	13,00573	Кальций	$^{44}_{20}\text{Ca}$	43,95548
	$^{14}_7\text{N}$	14,00307	Марганец	$^{54}_{25}\text{Mn}$	53,94035
	$^{15}_7\text{N}$	15,00010	Железо	$^{54}_{26}\text{Fe}$	53,93961
Кислород	$^{15}_8\text{O}$	15,00307		$^{56}_{26}\text{Fe}$	55,93494
	$^{16}_8\text{O}$	15,99491	Серебро	$^{104}_{47}\text{Ag}$	103,90841
	$^{17}_8\text{O}$	16,99913	Свинец	$^{206}_{82}\text{Pb}$	205,97447
Натрий	$^{23}_{11}\text{Na}$	22,98977	Полоний	$^{210}_{84}\text{Po}$	209,98288
Алюминий	$^{27}_{13}\text{Al}$	26,98154	Радон	$^{222}_{86}\text{Rn}$	222,01760
Кремний	$^{29}_{14}\text{Si}$	28,97649	Уран	$^{235}_{92}\text{U}$	235,04394
	$^{31}_{14}\text{Si}$	30,97536		$^{238}_{92}\text{U}$	238,05081
Фосфор	$^{29}_{15}\text{P}$	28,98180	Плутоний	$^{239}_{94}\text{Pu}$	239,05217

16 Периоды полураспада некоторых радиоактивных изотопов

Элемент	Символ изотопа	Период полураспада	Элемент	Символ изотопа	Период полураспада
Углерод	$^{14}_6\text{C}$	5568 лет	Цезий	$^{134}_{55}\text{Cs}$	2,06 года
Натрий	$^{22}_{11}\text{Na}$	2,6 года		$^{137}_{55}\text{Cs}$	30,17 лет
	$^{24}_{11}\text{Na}$	15 ч	Иридий	$^{192}_{77}\text{Ir}$	75 сут
Магний	$^{23}_{12}\text{Mg}$	11 с	Висмут	$^{210}_{83}\text{Bi}$	5,01 сут
	$^{27}_{12}\text{Mg}$	10 мин	Полоний	$^{210}_{84}\text{Po}$	138,4 сут
Фосфор	$^{32}_{15}\text{P}$	14,3 сут	Радон	$^{222}_{86}\text{Rn}$	3,8 сут
Калий	$^{40}_{19}\text{K}$	$1,32 \cdot 10^9$ лет	Радий	$^{219}_{88}\text{Ra}$	10^{-3} с
Кобальт	$^{58}_{27}\text{Co}$	71,3 сут		$^{226}_{88}\text{Ra}$	1620 лет
	$^{60}_{27}\text{Co}$	5,2 года	Актиний	$^{225}_{89}\text{Ac}$	10 сут
Бром	$^{82}_{35}\text{Br}$	36 ч	Торий	$^{228}_{90}\text{Th}$	1,9 года
Стронций	$^{89}_{38}\text{Sr}$	51 сут	Уран	$^{235}_{92}\text{U}$	$7,1 \cdot 10^8$ лет
	$^{90}_{38}\text{Sr}$	28,9 лет		$^{238}_{92}\text{U}$	$4,5 \cdot 10^9$ лет
Йод	$^{131}_{53}\text{I}$	8 сут	Плутоний	$^{239}_{94}\text{Pu}$	$2,44 \cdot 10^4$ лет

17 Множители и приставки для образования десятичных, кратных и дольных единиц и их наименования

Приставка			Приставка		
Обозначение	Наименование	Множитель	Обозначение	Наименование	Множитель
Т	тера	10^{12}	с	санти	10^{-2}
Г	гига	10^9	м	милли	10^{-3}
М	мега	10^6	мк	микро	10^{-6}
к	кило	10^3	н	нано	10^{-9}
д	деци	10^{-1}	п	пико	10^{-12}

СОДЕРЖАНИЕ

Общие указания	3
Содержание учебной дисциплины	3
Практическое занятие № 1. Кинематика материальной точки	7
Практическое занятие № 2. Динамика поступательного движения	13
Практическое занятие № 3. Работа и энергия	19
Практическое занятие № 4. Законы сохранения в механике	23
Практическое занятие № 5. Вращательное движение твердого тела	28
Практическое занятие № 6. Молекулярно-кинетическая теория идеального газа	33
Практическое занятие № 7. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов	37
Практическое занятие № 8. Первое и второе начала термодинамики	41
Практическое занятие № 9. Реальные газы, жидкости, твердые тела	47
Практическое занятие № 10. Электростатическое поле	52
Практическое занятие № 11. Потенциал и работа электростатического поля	58
Практическое занятие № 12. Постоянный электрический ток	67
Практическое занятие № 13. Магнитное поле постоянного тока и в веществе	74
Практическое занятие № 14. Механические колебания. Волновые процессы	85
Практическое занятие № 15. Интерференция, дифракция и поляризация света	98
Практическое занятие № 16. Взаимодействие света с веществом	110
Практическое занятие № 17. Элементы физики ядра. Радиоактивность	116
Список рекомендуемой литературы	125
Приложение А Справочные данные	136

Учебное издание

*ДЕЛИКАТНАЯ Ирина Олеговна
ДОЦЕНКО Елена Иосифовна*

Физика

Учебно-методическое пособие

Редактор И. И. Э в е н т о в
Технический редактор В. Н. К у ч е р о в а

Подписано в печать 6.11.2018 г. Формат бумаги 60x84 ¹/₁₆.
Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman. Печать на ризографе.
Усл. печ. л. 8,37. Уч.- изд. л. 7,18. Тираж 150 экз.
Зак. № 3563. Изд. № 19.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Белорусский государственный университет транспорта.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий
№ 1/361 от 13.06.2014.
№ 2/104 от 01.04.2014.
№ 3/1583 от 14.11.2017.
Ул. Кирова, 34, 246653, Гомель.