



**Федеральное агентство морского и речного транспорта**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«Государственный университет морского и речного флота  
имени адмирала С.О. Макарова»**

**Воронежский филиал**  
**Федерального государственного бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования**  
**«Государственный университет морского и речного флота  
имени адмирала С.О. Макарова»**

**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ**  
**ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕКУЩЕЙ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ**  
**АТТЕСТАЦИИ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**  
**Б1.Б.10 «Физика»**  
(Приложение к рабочей программе дисциплины)

Уровень образования:	Высшее образование – бакалавриат	
Направление подготовки:	09.03.02 «Информационные системы и технологии»	
Язык обучения:	Русский	
Кафедра:	Математики, информационных систем и технологий	
Форма обучения:	Очная	Заочная
Курс:	1, 2	1, 2
Составитель:	Кустов А.И.	

ВОРОНЕЖ 2019 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ПАСПОРТ ФОНДА ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ .....	3
1.1 Перечень компетенций и этапы их формирования в процессе освоения дисциплины.....	3
1.2 Паспорт фонда оценочных средств для проведения текущей и промежуточной аттестации обучающихся.....	3
1.3 Критерии оценивания результата обучения по дисциплине и шкала оценивания .....	4
2. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ .....	5
2.1 Задания для самостоятельной работы и средства текущего контроля.....	5
2.2 Критерии оценки качества освоения дисциплины.....	67
3. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ДИСЦИПЛИНЕ .....	69
3.1 Теоретические вопросы и практические задания для проведения зачета и экзамена .....	69
3.2 Показатели, критерии и шкала оценивания ответов.....	73
на зачете / экзамене .....	73

# 1. ПАСПОРТ ФОНДА ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

## 1.1 Перечень компетенций и этапы их формирования в процессе освоения дисциплины

В результате освоения ОПОП бакалавриата обучающийся должен овладеть следующими результатами обучения по дисциплине:

## 1.2 Паспорт фонда оценочных средств для проведения текущей и промежуточной аттестации обучающихся

Код компетенции	Содержание компетенции	Планируемые результаты освоения дисциплины
ОПК-2	способность использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования	<p><b>Знать:</b> фундаментальные научно-исследовательские работы в области; основные термины и понятия системного анализа; методы исследования систем и построения моделей; математические модели оптимального управления для непрерывных и дискретных процессов.</p> <p><b>Уметь:</b> проводить научные исследования, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования, оценивать параметры моделей; содержательно интерпретировать результаты моделирования социально-экономических процессов и систем; анализировать их качество и иметь навыки их корректировки для получения удовлетворительных результатов.</p> <p><b>Владеть:</b> навыками самостоятельной научно-исследовательской работы; способностью самостоятельно формулировать результаты своей научно-исследовательской работы; опытом проведения системного исследования от этапа постановки задачи и выдвижения гипотез, до анализа результатов и оформления выводов; навыками организации сложных экспертиз и выбора решений; навыками применения инструментов математического моделирования.</p>

№ п/п	Контролируемые темы дисциплины (модуля)	Код контролируемой компетенции	Наименование оценочного средства
1	Физические основы механики	ОПК-2	Опрос, лабораторные занятия, контрольные задания, зачет.

2	Основы молекулярной физики и термодинамики	ОПК-2	Опрос, лабораторные занятия, контрольные задания, зачет.
3	Электричество и магнетизм	ОПК-2	Опрос, лабораторные занятия, контрольные задания, зачет.
4	Колебания и волны	ОПК-2	Опрос, лабораторные занятия, контрольные задания, экзамен.
5	Оптика. Квантовая природа излучения	ОПК-2	Опрос, лабораторные занятия, контрольные задания, экзамен.
6	Элементы квантовой физики атомов, молекул и твердых тел	ОПК-2	Опрос, лабораторные занятия, контрольные задания, экзамен.
7	Элементы физики атомного ядра и элементарных частиц	ОПК-2	Опрос, лабораторные занятия, контрольные задания, экзамен.

### 1.3 Критерии оценивания результата обучения по дисциплине и шкала оценивания

Уровни сформированности компетенции	Основные признаки уровня
<b>Пороговый (базовый) уровень (Оценка «3», Зачтено)</b> (обязательный по отношению ко всем выпускникам к моменту завершения ими обучения по ООП)	Обучающийся, обладает удовлетворительным владением навыками и современными техническими средствами для самостоятельного, методически правильного решения аналитических и исследовательских заданий и задач с использованием основных требований информационной безопасности и применением информационно-коммуникационных технологий; методами обработки собранной информации при помощи информационных технологий;
<b>Повышенный (продвинутый) уровень (Оценка «4», Зачтено)</b> (превосходит пороговый (базовый) уровень по одному или нескольким существенным признакам)	Обучающийся, обладает хорошим владением навыками и современными техническими средствами для самостоятельного, методически правильного решения аналитических и исследовательских заданий и задач с использованием основных требований информационной безопасности и применением информационно-коммуникационных технологий; методами обработки собранной информации при помощи информационных технологий;
<b>Высокий (превосходный) уровень (Оценка «5», Зачтено)</b> (превосходит пороговый (базовый) уровень по всем существенным признакам, предполагает максимально возможную выраженность компетенции)	Обучающийся, обладает отличным владением навыками и современными техническими средствами для самостоятельного, методически правильного решения аналитических и исследовательских заданий и задач с использованием основных требований информационной безопасности и применением информационно-коммуникационных технологий; методами обработки собранной информации при помощи информационных технологий;

## 2. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ

### 2.1 Задания для самостоятельной работы и средства текущего контроля

**Раздел 1. Механика.** Механическое движение, системы отсчета. Физические модели в механике (материальная точка, система частиц, абсолютно твердое тело, сплошная среда). Кинематическое описание движения. Перемещение, скорость, ускорение при поступательном и вращательном движениях; связь между линейными и угловыми кинематическими характеристиками. Основная задача кинематики. Относительность движения. Движение тела брошенного горизонтально, под углом к горизонту.

Динамика как раздел механики. Масса, импульс (количество движения), сила. Понятие состояния в классической (нерелятивистской) механике. Законы Ньютона, их физическое содержание и взаимная связь. Инерциальные системы отсчета, преобразования Галилея, закон сложения скоростей в классической механике; механический принцип относительности. Основная задача динамики. Границы применимости классической механики.

Система материальных точек (частиц). Внутренние и внешние силы. Замкнутая система. Второй закон динамики для системы материальных точек. Центр масс. Закон движения центра масс. Твердое тело как система материальных точек. Момент силы, момент импульса. Вращение абсолютно твердого тела вокруг неподвижной оси. Момент инерции. Теорема Штейнера. Основное уравнение движения абсолютно твердого тела. Упругое тело. Напряжение и деформации (упругие и пластические)\*. Закон Гука\*.

Работа постоянной и переменной силы. Мощность. Энергия как мера различных форм движения и взаимодействия. Кинетическая, потенциальная и полная механическая энергии. Закон сохранения импульса и его связь с однородностью пространства; закон сохранения момента импульса и его связь с изотропностью пространства; закон сохранения механической энергии и его связь с однородностью времени\*. Практическое применение законов сохранения к анализу движения упругих и неупругих тел (на примере ударов шаров)\*. Реактивное движение\*. Гироскопы.

Законы Кеплера и закон всемирного тяготения. Гравитационное поле. Напряженность гравитационного поля. Работа сил гравитационного поля. Потенциальная энергия тела в поле тяготения. Потенциал поля тяготения\*. Связь напряженности гравитационного поля с потенциалом. Принцип эквивалентности. Движение в гравитационном поле\*. Космические скорости\*.

Постулаты Эйнштейна. Скорость света – предельная скорость передачи сигнала. Преобразования Лоренца для координат и времени. Относительность одновременности. Длина отрезка и интервал времени в разных системах отсчета. Релятивистский закон сложения скоростей. Законы Ньютона в релятивистской динамике. Инвариантность уравнений движения относительно преобразований Лоренца. Полная энергия частицы и системы частиц. Взаимосвязь массы и энергии. Взаимосвязь энергии и импульса. Частицы с нулевой массой покоя.

Силы инерции в поступательно движущихся неинерциальных системах отсчета. Принцип Даламбера\*. Эквивалентность сил инерции и сил тяготения\*. Центробежная сила инерции\*. Сила Кориолиса\*. Понятие об общей теории относительности.

#### Задачи для самостоятельного решения и контрольных заданий

1. Движение материальной точки задано уравнением  $x = At + Bt^2$ , где  $A = 4$  м/с;  $B = -0,05$  м/с<sup>2</sup>. Определить момент времени, в который скорость точки  $v = 0$ . Найти координату и ускорение в этот момент. Построить графики координаты, пути, скорости и ускорения этого движения. [40с; 80 м; -0,1 м/с<sup>2</sup>]

2. Точка движется по прямой согласно уравнению  $x = At + Bt^3$ , где  $A = 6$  м/с,  $B = -0,125$  м/с<sup>2</sup>. Определить среднюю скорость движения точки в интервале времени от  $t_1 = 2$  с

до  $t_2 = 6$  с. Примечание. первоначально уравнение определить момент времени

3. Зависимость пути от времени задается  $s = 5 - 3t + 2t^2 + t^3$ . Определите времени от  $t_1=1$ с до  $t_2=4$ с: 1)

2) среднее ускорение. [28 м/с; 19 м/с<sup>2</sup>]

4. Путь, пройденный точкой по окружности радиусом  $R = 2$  м, выражен уравнением  $S = 3t^2 + t$ . Найти нормальное, тангенциальное и полное ускорения точки через  $t = 0,5$  с после начала движения. [ $a_n = 8$  м/с<sup>2</sup>,  $a_\tau = 6$  м/с<sup>2</sup>,  $a = 10$  м/с<sup>2</sup>]

5. Точка движется по окружности так, что зависимость пути от времени дается уравнением  $S = 6 - 2t + t^2$  м. Найти линейную скорость точки, ее тангенциальное, нормальное и полное ускорения через  $t_1 = 3$  с после начала движения, если известно, что нормальное ускорение точки при  $t_2 = 2$  с равно  $a_n = 0,5$  м/с<sup>2</sup>. [ $v = 4$  м/с,  $a_\tau = 2$  м/с<sup>2</sup>,  $a_n = 2$  м/с<sup>2</sup>,  $a = 2,83$  м/с<sup>2</sup>]

6. Зависимость скорости от времени для движения тела представлена на рис. 1.3. Определить среднюю скорость  $\langle v \rangle$  за время  $t=14$  с. [3,93 м/с]

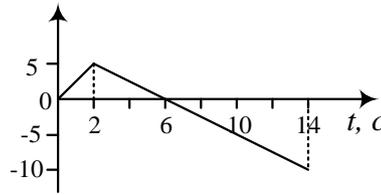


Рис. 1.3

Проанализировать скорости движения и возврата точки. [3 м/с] пройденного телом уравнением для тела в интервале среднюю скорость;

7. Зависимость ускорения некотором движении тела рис. 1.4. Определить среднюю время  $t = 8$  с. Начальная скорость

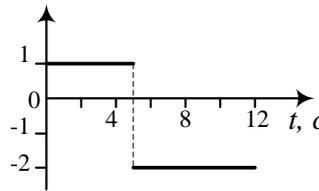


Рис. 1.4

от времени при представлена на скорость  $\langle v \rangle$  за  $v_0 = 0$ . [2,4 м/с]

8. Радиус-вектор частицы закону  $\vec{r} = 3t^2 \vec{i} + 2t \vec{j} + 1k$  (м).

скорости  $\vec{v}$  и ускорения  $\vec{a}$ ; б) модуль скорости  $v$  в момент  $t = 1$  с. [6,3 м/с]

9. Точка движется, замедляясь, по прямой с ускорением, модуль которого зависит от ее скорости  $v$  по закону  $a = c\sqrt{v}$ , где  $c$  – положительная постоянная. В начальный момент скорость точки равна  $v_0$ . Какой путь она пройдет до остановки? За какое время этот путь будет пройден? [ $(2/3c)v_0^{3/2}$ ;  $t = 2\sqrt{v_0/c}$ ]

10. С башни высотой  $h=30$  м в горизонтальном направлении брошено тело с начальной скоростью  $v_0=10$  м/с. Определите: 1) уравнение траектории тела; 2) скорость тела в момент падения на землю; 3) угол, который образует эта скорость с горизонтом в

точке его падения. [ $y = \frac{g}{2v_0^2} x^2$ ; 26,2 м/с; 67,60]

11. Тело брошено под углом к горизонту с начальной скоростью  $\vec{v}_0$ . Пренебрегая сопротивлением воздуха, найти среднее значение скорости  $\langle \vec{v} \rangle$  за первые  $\tau$  секунд полета.

$$[\langle \vec{v} \rangle = \vec{v}_0 + g\tau/2]$$

12. Тело брошено со скоростью  $v_0$  под углом  $\alpha$  к горизонту. Найти величины  $v_0$  и  $\alpha$ , если известно, что наибольшая высота подъема тела  $h = 3$  м и радиус кривизны траектории тела в верхней точке траектории  $R = 3$  м. [ $v_0 = 9,4$  м/с,  $\alpha = 54^\circ$ ]

13. Камень брошен с вышки в горизонтальном направлении со скоростью  $v_0 = 30$  м/с. Определить скорость, тангенциальное и нормальное ускорения камня в конце второй секунды после начала движения. [ $35,8$  м/с,  $a_\tau = 5,37$  м/с<sup>2</sup>,  $a_n = 8,22$  м/с<sup>2</sup>]

14. Камень бросают под углом  $\alpha$  к горизонту с начальной скоростью  $v_0$ . Сопротивлением воздуха пренебрегаем. Найти радиус кривизны траектории в верхней точке. [ $R = v_0^2 \cos \alpha / g$ ]

15. Точка движется по окружности радиусом  $R = 15$  см с постоянным тангенциальным ускорением. К концу четвертого оборота после начала движения линейная скорость точки  $v = 15$  см/с. Определите нормальное ускорение точки через  $t = 16$  с после начала движения. [ $1,5$  см/с<sup>2</sup>]

16. Якорь электромотора, вращавшийся со скоростью  $n = 50$  об/мин, двигаясь после выключения тока равномерно, остановился, сделав  $N = 1680$  об. Найти угловое ускорение якоря. [ $4,7$  рад/с<sup>2</sup>]

17. Колесо вращается вокруг неподвижной оси так, что угол  $\varphi$  его поворота зависит от времени, как  $\varphi = Bt^2$ , где  $B = 0,20$  рад/с<sup>2</sup>. Найти полное ускорение  $a$  точки, лежащей на ободе колеса, в момент  $t = 2,5$  с, если линейная скорость точки в этот момент  $v = 0,65$  м/с. [ $a = (v/t)\sqrt{1 + 4B^2t^4} = 0,7$  м/с<sup>2</sup>]

18. Точка движется по окружности радиусом  $R = 2$  м согласно уравнению  $S = At^3$  м. В какой момент времени нормальное ускорение точки будет равно тангенциальному? Определить полное ускорение в этот момент. [ $0,87$  с;  $14,8$  м/с<sup>2</sup>]

19. Ротор электродвигателя, имеющий частоту вращения  $955$  об/мин, после выключения остановился через  $10$  с. Считая вращение равнозамедленным, определить угловое ускорение ротора после выключения электродвигателя. Сколько оборотов сделал ротор до остановки? [ $\varepsilon = -10$  рад/с<sup>2</sup>,  $N = 80$  об]

20. Колесо радиусом  $R = 0,1$  м вращается так, что зависимость угла поворота радиуса колеса от времени дается уравнением  $\varphi = 3 + 2t + t^3$ . Для точек, лежащих на ободе колеса, найти через  $t = 2$  с после начала движения следующие величины: а) угловую скорость, б) линейную скорость, в) угловое ускорение, г) тангенциальное ускорение, д) нормальное ускорение. [ $14$  рад/с,  $1,4$  м/с,  $12$  рад/с<sup>2</sup>,  $a_\tau = 1,2$  м/с<sup>2</sup>,  $a_n = 19,6$  м/с<sup>2</sup>]

21. Тело вращается вокруг неподвижной оси по закону  $\varphi = 10 + 20t - 2t^2$ . Найти величину и направление полного ускорения точки, находящейся на расстоянии  $0,1$  м от оси вращения для момента времени  $t = 4$  с. [ $a = 1,65$  м/с<sup>2</sup>,  $\alpha = 760$ ]

22. Число оборотов ротора центрифуги достигает  $n = 2 \cdot 10^4$  об/мин. После отключения двигателя вращение прекращается через  $t = 8$  мин. Найдите угловое ускорение и зависимость угла поворота центрифуги от времени, считая движение равнопеременным. Укажите направления векторов  $\omega$  и  $\varepsilon$ . [ $4,36$  с<sup>-2</sup>,  $\varphi = 2,18t^2$ ]

23. Найти, во сколько раз нормальное ускорение точки, лежащей на ободе вращающегося колеса, больше ее тангенциального ускорения для того момента, когда вектор полного ускорения этой точки составляет угол  $30^\circ$  с вектором ее линейной скорости. [ $0,58$ ]

24. Диск радиусом  $R = 8$  см вращается так, что зависимость линейной скорости точек, лежащих на ободе диска, от времени задается уравнением  $v = 2t^2$  (см/с). Определите

момент времени, для которого вектор полного ускорения образует с радиусом колеса угол  $\varphi = 45^\circ$ . [2с]

25. Тело массой  $m$  движется в плоскости XY по закону  $x=A\cos\omega t$ ,  $y=B\sin\omega t$ , где  $A$ ,  $B$  и  $\omega$  – некоторые постоянные. Определите модуль силы, действующей на это тело.  $[F = m\omega^2\sqrt{x^2 + y^2}]$

26. Под каким углом  $\alpha$  к горизонту нужно тянуть тяжелый ящик массы  $m$  для того, чтобы передвигать его волоком по горизонтальной поверхности с наименьшим усилием, если коэффициент трения равен  $\mu$ ? Найти значение этой минимальной силы.  $[F_{min}=mgsina, \alpha=arctgu]$

27. На каждое колесо автомобиля приходится 25% его веса. Пусть коэффициент трения между колесом и дорогой равен 0,8. Тормоза действуют на все четыре колеса. Чему равно минимальное время полного торможения при исходной скорости 60 км/ч?  $[t_{торм.}=2,13 \text{ с}]$

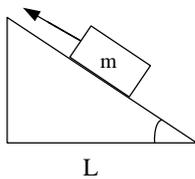


Рис. 2.4

28. На наклонной плоскости (рис.2.4) лежит брусок массой  $m$ . К нему приложена сила  $F = 2mg$ , направленная вдоль наклонной плоскости в сторону ее вершины. Коэффициент трения между бруском и наклонной плоскостью  $\mu = \sqrt{3}/3$ . При каком угле наклона ускорение бруска будет минимальным и чему равно это ускорение?  $[\alpha = 60^\circ, a=8,5 \text{ м/с}^2]$

29. Чему должен быть равен коэффициент трения между шинами и поверхностью наклонной дороги с уклоном  $\alpha = 30^\circ$ , чтобы автомобиль мог двигаться по ней вверх с ускорением  $a=0,6\text{м/с}^2$ ?  $[0,65]$

30. За какое время тело соскользнет с наклонной плоскости высотой  $h=9,8$  м и с углом наклона  $\beta = 60^\circ$ , если по наклонной плоскости с углом наклона  $\alpha = 30^\circ$  оно движется вниз равномерно?  $[2 \text{ с}]$

31. На автомобиль массой  $m=1\text{т}$  во время движения действует сила трения, равная 10% от его силы тяжести. Найдите силу тяги, развиваемую мотором автомобиля, если автомобиль движется с ускорением  $a=1\text{м/с}^2$  в гору с уклоном 1м на каждые 25м пути.  $[2,4 \text{ кН}]$

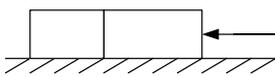


Рис. 2.5

32. На горизонтальной плоской поверхности расположены два соприкасающихся бруска с массами  $m_1=2\text{кг}$  и  $m_2=3\text{кг}$  (рис.2.5). Второй брусок толкают с силой  $F_0=10\text{Н}$ . Найдите силу, с которой бруски давят друг на друга, если коэффициент трения между первым бруском и плоскостью  $\mu_1 = 0,1$ , а между вторым бруском и

плоскостью  $\mu_2 = 0,2$ .  $[2,8 \text{ Н}]$ .

33. На горизонтальной поверхности одинаковых бруска массой 1кг каждый нерастяжимой нитью, такая же нить брусков с грузом массой  $m=0,5\text{кг}$ . первого бруска о стол  $\mu_1 = 0,1$ , второго Найдите силу натяжения нити между пренебречь).  $[2,7 \text{ Н}]$ .

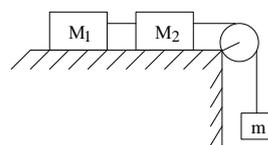


Рис. 2.6

стола лежат два (рис. 2.6). Бруски связывает связывает один из Коэффициент трения бруска  $\mu_2 = 0,15$ . брусками. (Массой блока

34. На наклонную плоскость, составляющую угол  $\alpha$  с горизонтом, поместили два соприкасающихся бруска. Массы брусков равны  $m_1$  и  $m_2$ , коэффициенты трения соответственно  $\mu_1$  и  $\mu_2$ , причем  $\mu_1 > \mu_2$ . Найти: а) ускорение, с которым движутся бруски; б) силу, с которой бруски давят друг на друга.

$$[a = \frac{(m_1 + m_2)g \sin \alpha - (m_1\mu_1 + m_2\mu_2)g \cos \alpha}{m_1 + m_2}, F = \frac{(\mu_1 - \mu_2)m_1m_2 \cos \alpha}{m_1 + m_2}]$$

35. Найти ускорение грузов в системе, грузов  $m_1$  и  $m_2$  ( $m_2 > m_1$ ) и угол  $\alpha$ , плоскостью с горизонтом (рис.2.7). наличия трения.

$$[a = \frac{m_2 - m_1(\sin \alpha + \mu \cos \alpha)}{m_1 + m_2} g]$$

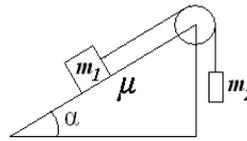


Рис. 2.7

если известны массы образуемый наклонной. Рассмотреть задачу при

36. Через невесомый блок, горизонтального стола, перекинута нить, связывающая грузы с массами  $m_1 = 1$  кг движется вверх с ускорением  $a_0 = 1$  м/с<sup>2</sup>.  $m_1$  относительно стола ( $a'$ ) и относительно пренебречь.

$$[a' = \frac{m_1(g + a_0)}{m_1 + m_2} = 3,6 \text{ м/с}^2; a = \frac{m_1 g - m_2 a_0}{m_1 + m_2} = 2,6 \text{ м/с}^2]$$

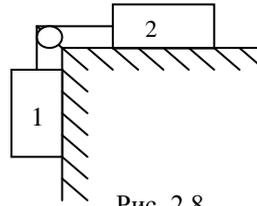


Рис. 2.8

укрепленный на краю нерастяжимая легкая и  $m_2 = 2$  кг (рис.2.8). Стол. Найти ускорение груза земли ( $a$ ). Трением

37. Тело массой  $m$  брошено под углом  $\alpha$  к горизонту с начальной скоростью  $v_0$ . Пренебрегая сопротивлением воздуха, найти: а) импульс силы  $F\Delta t$ , действующей на тело за время его полета; б) приращение  $\Delta P$  импульса тела за время полета. [ $F\Delta t = \Delta P = 2mv_0 \sin \alpha$ ]

38. Шар массой  $m$ , двигаясь со скоростью  $v_0$ , упруго ударяется о гладкую неподвижную стенку так, что скорость его направлена под углом  $\alpha$  к нормали. Определить импульс  $P$ , получаемый стенкой. [ $P = 2mv \cos \alpha$ ]

39. Шарик массой  $m$  помещен в высокий сосуд с некоторой жидкостью и пущен без толчка. При движении шарика возникает сила сопротивления среды, пропорциональная скорости движения  $F = -kv$ . Найти зависимость скорости шарика от времени.

$$[v = (mg/k) \left( 1 - e^{-\frac{kt}{m}} \right)]$$

40. Катер массой  $m = 2$  т с двигателем мощностью  $N = 50$  кВт развивает максимальную скорость  $v_{\max} = 25$  м/с. Определить время, в течение которого катер после выключения двигателя потеряет половину своей скорости. Принять, что сила сопротивления движению катера изменяется пропорционально квадрату скорости. [ $t = mv_{\max}^2 / N = 25$  с.]

41. Если тело движется со скоростью  $v$ , которая не слишком велика, то сила сопротивления воздуха  $F_c$ , действующая на тело, приблизительно пропорциональна скорости:  $F_c = kv$ . Найти зависимость  $v(t)$  для тела, начинающего падение из состояния покоя. [ $v(t) = (mg(1 - e^{-kt/m})) / k$ ]

42. При падении тела с большой высоты его максимальная скорость 80 м/с. Через какое время от начала падения скорость тела станет 20 м/с? Силу сопротивления воздуха принять пропорциональной скорости движения тела. [2,3 с]

43. Мотор речного катера обеспечивает постоянную силу тяги, равную  $F = 800$  Н. Масса катера  $m = 400$  кг. Определите мощность силы тяги через время  $t = 5$  с после начала движения, если сила сопротивления воды зависит от скорости по закону  $F_c = -\alpha v^2$ , где  $\alpha = 80$  кг/с. [5 кВт]

44. Диск радиусом  $R = 0,4$  м вращается вокруг вертикальной оси. На краю диска лежит кубик. Принимая коэффициент трения  $\mu = 0,4$ , найти частоту  $n$  вращения, при которой кубик соскальзывает с диска. Решить задачу двумя способами: в неподвижной системе отсчета и в системе отсчета, связанной с диском. [ $n = 0,5$  с<sup>-1</sup>]

45. Горизонтальный диск вращается с постоянной угловой скоростью  $\omega$  вокруг вертикальной оси, проходящей через его центр. По одному из диаметров диска движется тело массой  $m$  с постоянной относительно диска скоростью  $v'$ . Найти силу, с которой диск действует на это тело в момент, когда оно находится на расстоянии  $R$  от оси вращения.

$$[ F = m\sqrt{g^2 + \omega^4 R^2 + (2v' \omega)^2} ]$$

46. Небольшое тело падает без начальной скорости на Землю на экваторе,  $h = 10$  м. В какую сторону и на какое расстояние  $x$  отклонится тело от вертикали за время падения? Сопротивлением воздуха пренебречь.  $[ x = (2h\omega\sqrt{2h/g})/3 ]$

47. Ракета массой  $m = 3$  т, запущенная с поверхности Земли вертикально вверх, поднимается с ускорением  $a = 2g$ . Скорость  $u$  струи газов, вырывающихся из сопла, равна 1,2 км/с. Найти расход  $\mu$  горючего.  $[ \mu = m(g + a)/u ]$

48. Найти ускорение и скорость тележки, движущейся под действием горизонтальной силы  $F$ , если на тележке лежит песок, который высыпается через отверстие в платформе тележки со скоростью  $\mu$  кг/с. В начальный момент тележка имела скорость  $v_0 = 0$  и массу  $m_0$ .

$$[ a = \frac{F}{m_0 - \mu \cdot t}; v = \frac{F}{\mu} \ln \frac{m_0}{m_0 - \mu \cdot t} ]$$

49. Сила, действующая на частицу, имеет вид  $\vec{F} = a \vec{i}$ , где  $a = \text{const}$ . Вычислить работу, совершаемую над частицей этой силой на пути от точки С (1, 2, 3) м до точки D (7, 8, 9) м.  $[ A = 6a \text{ Дж} ]$

50. Тело массой  $m$  начинает двигаться под действием силы  $\vec{F} = 2t \vec{i} + 3t^2 \vec{j}$ . Найти мощность, развиваемую силой в момент времени  $t$ .  $[ N(t) = (2t^3 + 3t^5)/m ]$

51. Тело массой  $m = 1,0$  кг падает с высоты  $h = 20$  м. Пренебрегая сопротивлением воздуха, найти: среднюю по времени мощность  $\langle N \rangle$ , развиваемую силой тяжести на пути  $h$ ; мгновенную мощность  $N$  на высоте  $h/2$ .  $[ 97 \text{ Вт}; 137 \text{ Вт} ]$

52. Материальная точка массой  $m = 1$  кг двигалась под действием некоторой силы согласно уравнению  $S = 2 - 3t + 5t^2 - t^3$ . Определить мощность  $N$ , затрачиваемую на движение точки за время, равное 1 с.  $[ 16 \text{ Вт} ]$

53. Потенциальная энергия частицы имеет вид  $U = (kr^2)/2$ , где  $r$  – модуль радиус-вектора  $\vec{r}$  частицы;  $k$  – константа ( $k > 0$ ). Найти силу  $\vec{F}$ , действующую на частицу, и работу  $A$ , совершаемую над частицей при переходе ее из точки В(1, 2, 3) в точку С(2, 3, 4).  $[ \vec{F} = -kr \vec{r}, A = -7,5 k ]$

54. Сила упругости некоторой пружины записывается в виде  $F_x = -kx + ax^2 + bx^3$ . Записать функцию потенциальной энергии.  $[ U_x = \frac{kx^2}{2} - \frac{ax^3}{3} - \frac{bx^4}{4} ]$

55. Вычислить работу, совершаемую на пути  $S = 12$  м равномерно возрастающей силой, если в начале пути сила  $F_1 = 10$  Н, в конце пути  $F_2 = 46$  Н.  $[ 336 \text{ Дж} ]$

56. Вагон массой  $m = 20$  т, двигаясь равнозамедленно с начальной скоростью  $v_0 = 54$  км/час, под действием силы трения  $F = 6$  кН через некоторое время останавливается. Найти работу силы трения и расстояние, которое вагон пройдет до остановки.  $[ A = 2,25 \text{ МДж}; S = 375 \text{ м} ]$

57. Пуля массой  $m = 10$  г, имеющая горизонтальную скорость  $v = 600$  м/с, пробивает подвешенный на длинной нити деревянный брусок массой  $M = 1$  кг. Скорость пули на вылете остается горизонтальной и равной 287 м/с. На какую высоту поднимется брусок после удара.  $[ 0,49 \text{ м} ]$

58. Тело массой  $m = 0,4$  кг скользит с наклонной плоскости высотой  $h = 10$  см и длиной  $l = 1$  м. Коэффициент трения тела на всем пути  $k = 0,04$ . Определите: 1) кинетическую энергию тела у основания плоскости; 2) путь, пройденный телом на горизонтальном участке до остановки. [0,24 Дж; 1,53 м]

59. Цепочка массы  $m$ , длины  $l$  лежит на шероховатом столе так, что один ее конец свешивается. Цепочка начинает сама соскальзывать, когда ее свешивающаяся часть составляет  $\eta$  длины цепочки. Какую работу совершат силы трения, действующие на цепочку, при ее полном соскальзывании со стола?  
[  $A = -(1 - \eta)\eta \cdot mgl/2$  ]

60. Спортсмен с высоты  $h = 12$  м падает на упругую сетку. Пренебрегая массой сетки, определите, во сколько раз наибольшая сила давления спортсмена на сетку больше его силы тяжести, если прогиб сетки под действием только силы тяжести спортсмена  $x_0 = 15$  см. [в 13,7 раза]

61. Груз массой 700 кг падает с высоты 5 м для забивки сваи массой 300 кг. Найти среднюю силу сопротивления грунта, если в результате одного удара свая входит в грунт на глубину 4 см. Удар между грузом и сваем считать абсолютно неупругим. [6,11·10<sup>5</sup> Н]

62. Пуля массой  $m = 15$  г, летящая горизонтально со скоростью  $v = 200$  м/с, попадает в баллистический маятник длиной  $l = 1$  м и массой  $M = 1,5$  кг и застревает в нем. Определите угол отклонения  $\varphi$  маятника. [36,9°]

63. В баллистический маятник длиной  $l = 1$  м и массой  $M = 1,5$  кг попала пуля массой  $m = 15$  г и застряла в нем. Найти скорость пули, если маятник, отклонился после удара на 30°.  
[164 м/с]

64. Два шара, массами  $m_1 = 0,2$  кг и  $m_2 = 0,1$  кг, подвешены на параллельных нитях одинаковой длины так, что они соприкасаются. Первый шар отклоняют так, что его центр тяжести поднимается на высоту 4,5 см, и отпускают. На какую высоту поднимутся шары после соударения, если: а) удар упругий, б) удар неупругий? [а)  $h_1 = 0,005$  м,  $h_2 = 0,08$  м; б)  $h = 0,02$  м]

65. Шар массой 20 г, движущийся горизонтально с некоторой скоростью  $v_1$ , столкнулся с неподвижным шаром массой 40 г. Шары абсолютно упругие, удар прямой, центральный. Какую долю  $\varepsilon$  своей кинетической энергии первый шар передал второму? [0,89]

66. Во сколько раз уменьшается скорость  $\alpha$ -частицы после центрального упругого удара о неподвижный протон, масса которого  $m_2$  в 4 раза меньше массы  $m_1$   $\alpha$ -частицы? [5/3]

67. Найти момент инерции тонкого однородного стержня длиной  $l$  и массой  $m$ : а) относительно перпендикулярной к стержню оси, проходящей через центр масс стержня; б) относительно перпендикулярной к стержню оси, проходящей через конец стержня. [а)  $I_c = \frac{ml^2}{12}$ ; б)  $I = \frac{ml^2}{3}$ ]

68. Прямолинейная однородная проволока длиной  $l$  и массой  $m$  согнута так, что точка перегиба делит проволоку на две части, длины которых относятся как 1:2. Чему равен момент инерции проволоки относительно оси вращения, проходящей через точку перегиба и перпендикулярной плоскости проволоки? [ $ml^2/9$ ]

69. Рассчитайте момент инерции однородного кольца массой  $m = 1$  кг относительно оси вращения, совпадающей с его осью симметрии. Внутренний радиус кольца  $R_1 = 10$  см, внешний радиус  $R_2 = 30$  см. [ $5 \cdot 10^{-2}$  кг·м<sup>2</sup>]

70. Две частицы с массами  $m_1$  и  $m_2$  соединены жестким невесомым стержнем длиной  $l$ . Найти момент инерции  $I$  этой системы относительно перпендикулярной к стержню оси, проходящей через центр масс. [ $I = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} l^2$ ]

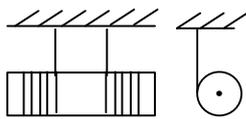


Рис. 4.7

71. Найти момент инерции гантели, состоящей из двух одинаковых шариков радиусами  $r$ , соединенных тонким однородным стержнем длиной  $l$  и диаметром  $d$ , причем  $r, d \ll l$ . Плотность вещества, из которого изготовлена гантель, равна  $\rho$ . Ось вращения проходит через центр симметрии гантели перпендикулярно соединяющему стержню.

$$\left[ I = \frac{8}{3} \pi r^3 \rho \left[ \frac{2}{5} r^2 + \left( r + \frac{l}{2} \right)^2 \right] + \frac{\pi}{48} d^2 l^3 \rho, \text{ при малых } r: I = \frac{56}{15} \pi \rho r^5 \right]$$

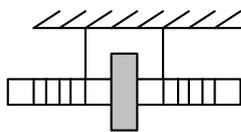


Рис. 4.8

72. Определить момент инерции тонкой прямоугольной пластины массы  $m$  с размерами  $a \times b$  относительно оси, проходящей через центр масс и перпендикулярной плоскости пластины.  $[ m(a^2 + b^2) / 12 ]$

73. Определить момент инерции однородного куба массой  $m$  с ребром  $l$  относительно оси, проходящей через центр масс и перпендикулярной одной из его граней.  $[ ml^2 / 6 ]$

74. Плотность цилиндра длиной  $l = 0,1$  м и радиусом  $R = 0,05$  м изменяется с расстоянием от оси линейно от значения  $\rho_1 = 500$  кг/м<sup>3</sup> до значения  $\rho_2 = 3\rho_1 = 1500$  кг/м<sup>3</sup>. Найти момент инерции  $I$  цилиндра относительно оси. Сравнить его с моментом инерции  $I_0$  однородного цилиндра такой же массы и размеров.  $[ I = 1,3 \cdot 10^3$  кг·м<sup>2</sup>;  $I = (39/35)I_0 ]$

75. Вычислить момент инерции однородного сплошного конуса относительно его оси симметрии, если масса конуса  $m$ , а радиус его основания  $R$ .  $[ I = (3/10) \cdot mR^2 ]$

76. На барабан, представляющий однородный цилиндр радиусом  $R = 0,2$  м и массой  $m_1 = 9$  кг, намотан шнур, к концу которого привязан груз массой  $m_2 = 2$  кг. Найти ускорение груза и кинетическую энергию системы, спустя время  $t = 3$  с.  $[ a = 3$  м/с<sup>2</sup>,  $T = 263,3$  Дж ]

77. Определите момент инерции диска относительно оси вращения, проходящей через центр диска перпендикулярно его плоскости, вырез в виде круга радиусом  $r = 0,3$  м, центр расстоянии  $l = 0,5$  м от центра диска  $m = 10$  кг, радиус  $R = 1$  м.  $[ 4,75$  кг·м<sup>2</sup> ]

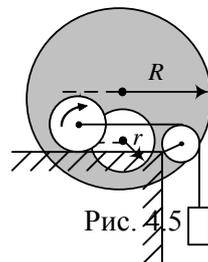


Рис. 4.5

если в диске сделан вырез в виде круга радиусом  $r$ , центр которого находится на (рис.4.5). Масса диска

78. Цилиндр массой  $m_1$  катится без действия груза массой  $m_3$  (рис.4.6). Масса ускорение центра инерции цилиндра.

скольжения под блока  $m_2$ . Найти

$$\left[ a = \frac{2m_3g}{m_2 + 2m_3 + 3m} \right]$$

Рис. 4.6

79. Однородный цилиндр массой  $m$  и радиусом  $R$  начинает опускаться под действием силы тяжести (рис. 4.7). Найти угловое ускорение цилиндра и натяжение каждой нити.  $[ \varepsilon = \frac{2}{3} \frac{g}{R}; T = \frac{1}{6} mg ]$

80. На стержень радиусом  $r$  наглухо насажен сплошной диск радиусом  $R$  и массой  $m$ . К стержню прикреплены нити, при помощи которых диск подвешивается к штативу (рис. 4.8). Найти ускорение, с которым опускается диск. Массой стержня пренебречь.  $[ a = g / (1 + R^2 / 2r^2) ]$

81. Маховик вращается по закону, выражаемому уравнением  $\varphi = 2 + 32t - 4t^2$  (рад). Найти среднюю мощность, развиваемую силами, действующими на маховик при его вращении до остановки, если его момент инерции  $I = 100$  кг·м<sup>2</sup>.  $[ 12,8$  кВт ]

82. Для определения мощности мотора на его шкив диаметром  $d = 20$  см накинута лента. К одному концу ленты прикреплен динамометр, к другому подвесили груз массой  $m = 1$  кг. Найти мощность  $N$  мотора, если мотор вращается с частотой  $n = 24$  с<sup>-1</sup> и показание динамометра  $F = 24$  Н.

$$[ N = \pi \cdot nd(F - mg) = 211 \text{ Вт} ]$$

83. Кинетическая энергия вращающегося маховика равна 1кДж. Под действием тормозящего момента маховик начал вращаться равнозамедленно и, сделав  $N=80$  оборотов, остановился. Определить момент силы торможения. [2 Нм]

84. Определить линейную скорость  $v$  центра шара, скатившегося без скольжения с наклонной плоскости высотой  $h$ . [ $v = \sqrt{10gh/7}$ ]

85. Человек стоит на скамье Жуковского и держит в руках стержень, расположенный вертикально вдоль оси вращения скамейки; стержень служит осью вращения колеса, расположенного на верхнем конце стержня. колесо вращается с частотой  $n_1 = 10 \text{ с}^{-1}$ . Радиус масса  $m = 3 \text{ кг}$ . Определить частоту вращения повернет стержень на угол  $180^\circ$ ? Суммарный скамьи равен  $6 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ . [ $n_2 = 2mR^2n_1/I$ ]

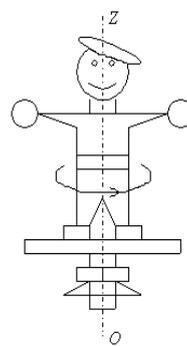


Рис. 4.9

Скамья неподвижна, колесо равен 20 см, его  $n_2$  скамьи, если человек момент инерции человека и

и держит в вытянутых Расстояние от каждой гири вращается с частотой  $n_1 = 1$  какую работу произведет расстояние от каждой гири момент инерции человека и

86. На скамье Жуковского стоит человек руках гири по 10 кг каждая (рис. 4.9). до оси вращения скамьи  $l_1 = 50 \text{ см}$ . Скамья  $\text{с}^{-1}$ . Как изменится частота вращения скамьи и человек, если он сожмет руки так, что до оси уменьшится до  $l_2 = 20 \text{ см}$ ? Суммарный скамьи относительно оси вращения  $I_0 = 2,6 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ . [ $n_2 = 2,3 \text{ с}^{-1}$ ,  $A = 190 \text{ Дж}$ ]

87. На краю вращающегося достаточно большого горизонтального диска, имеющего радиус  $R$  и момент инерции  $I_1$ , стоит человек массой  $m$ . Диск совершает  $n_1$  об/мин. Как изменится скорость вращения диска, если человек перейдет от края диска к центру? Какую работу совершит человек при переходе? Размерами человека по сравнению с радиусом диска можно пренебречь. [ $n_2 = n_1(1 + mR^2/I)$ ;  $A = 2\pi^2 n_1^2 (I + mR^2) \frac{mR^2}{I}$ ]

88. Шарик массой  $m = 0,1 \text{ г}$ , привязанный к концу нити длиной  $l_1 = 1 \text{ м}$ , вращается, опираясь на горизонтальную плоскость, с частотой  $n_1 = 1 \text{ об/с}$ . Нить укорачивается, приближая шарик к оси вращения до расстояния  $l_2 = 0,5 \text{ м}$ . С какой частотой будет при этом вращаться шарик? Какую работу совершит внешняя сила, укорачивая нить? Трением шарика о плоскость пренебречь.

$$\left[ n_2 = n_1 \left( \frac{l_1}{l_2} \right)^2 ; A = 2\pi^2 m l_1^2 n_1^2 \left( I - \frac{l_1^2}{l_2^2} \right) \right]$$

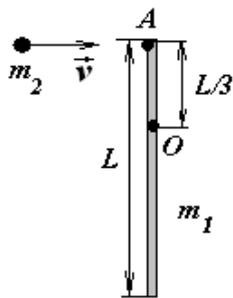


Рис. 4.10

89. Однородный тонкий стержень массой  $m_1 = 0,2 \text{ кг}$  и длиной  $L$  может свободно вращаться вокруг вертикальной оси, проходящей через точку  $O$  (рис.4.10). В точку  $A$  на конце стержня попадает пластилиновый шарик, летящий горизонтально со скоростью  $v = 10 \text{ м/с}$ , и прилипает к стержню. Масса шарика  $m_2 = 10 \text{ г}$ , расстояние между точками  $A$  и  $O$  равно  $L/3$ . Определите кинетическую энергию стержня после удара. [ $2,38 \cdot 10^{-2} \text{ Дж}$ ]

90. Человек стоит на скамье Жуковского и ловит рукой мяч массой  $m = 0,4 \text{ кг}$ , летящий в горизонтальном направлении со скоростью  $v=20 \text{ м/с}$ . Траектория мяча проходит на расстоянии  $r = 0,8 \text{ м}$  от вертикальной оси вращения скамьи. Суммарный момент инерции человека и скамьи относительно этой оси равен  $6 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ . Найдите кинетическую энергию системы после того, как человек поймает мяч. [ $6,55 \text{ Дж}$ ]

91. Платформа в виде однородного диска радиусом  $R=1 \text{ м}$  вращается с частотой  $n = 6 \text{ об/мин}$ . Масса платформы равна 240 кг. На краю платформы стоит человек, масса которого равна 80 кг. Как изменится кинетическая энергия системы, если человек перейдет в центр платформы? [ $25,5 \text{ Дж}$ ]

92. Два горизонтальных диска свободно вращаются в разных направлениях вокруг вертикальной оси, проходящей через их центры. Массы дисков равны 10 кг и 40 кг, их радиусы 0,2 м и 0,1 м, угловые скорости 10 рад/с и 20 рад/с соответственно. После падения верхнего диска на нижний оба диска благодаря трению между ними начали через некоторое время вращаться как единое целое. Найдите изменение суммарной кинетической энергии дисков. [95 Дж]

93. Покоящийся стержень длиной  $L = 1,5$  м и массой  $m_1 = 10$  кг подвешен шарнирно за верхний конец. В середину стержня ударяет пуля массой  $m_2 = 10$  г, летящая горизонтально со скоростью  $v = 500$  м/с, и застревает в стержне. На какой угол отклонится стержень после удара? [ $\approx 13^\circ$ ]

94. Горизонтальная платформа, имеющая форму диска, может свободно вращаться вокруг вертикальной оси симметрии. На краю платформы стоит человек. Определите кинетическую энергию платформы после того, как человек спрыгнет с нее со скоростью  $v = 4$  м/с, направленной по касательной к краю платформы. Масса платформы равна 240 кг, масса человека 70 кг. [327 Дж]

95. Однородный диск массой  $m_1 = 2$  кг и радиусом  $R = 20$  см вращается с частотой  $n = 1$  об/с вокруг вертикальной оси, перпендикулярной плоскости диска и проходящей через его центр. С высоты  $h = 44$  см на край диска падает кусок пластилина массой  $m_2 = 100$  г и прилипает к нему. Найдите потерю механической энергии системы. [0,242 Дж]

#### Вопросы к семинарским занятиям:

1. Закон движения (определение).
2. Уравнение движения (определение).
3. Уравнение траектории (определение).
4. Уравнение кинематической связи (определение).
5. Закон динамики (определение).
6. Основная задача механики (определение).
7. Формула сложения скоростей.
8. Формула сложения ускорений.
9. Переносная скорость (формула).
10. Переносное ускорение (формула).
11. Кориолисово ускорение (формула).
12. Прямое преобразование Галилея (формулы).
13. Обратное преобразование Галилея (формулы).
14. Изолированное тело (определение).
15. Первый закон Ньютона (формулировка).
16. Второй закон Ньютона (формулировка).
17. Третий закон Ньютона (формулировка).
18. Закон всемирного тяготения (формулировка).
19. Закон Гука (формулировка).
20. Закон Амонтона-Кулона (формулировка).
21. Закон для сил вязкого трения (формулировка).
22. Импульс материальной точки (определение).
23. Импульс силы (определение).
24. Изолированная система материальных точек (определение).
25. Замкнутая система материальных точек (определение).
26. Закон сохранения импульса (формулировка).
27. Центр масс (определение).
28. Теорема о движении центра масс (формулировка).
29. Уравнение Мещерского (формула).
30. Формула Циолковского.

31. Момент импульса материальной точки (определение).
32. Момент силы относительно точки (определение).
33. Закон сохранения момента импульса (формулировка).
34. Работа силы (определение).
35. Энергия системы материальных точек (определение).
36. Кинетическая энергия (определение).
37. Потенциальная энергия системы (определение).
38. Нормировка потенциальной энергии (определение).
39. Консервативные силы (определение).
40. Консервативные системы (определение).
41. Связь консервативной силы с потенциальной энергией (формула).
42. Закон сохранения механической энергии (формулировка).
43. Абсолютно упругий удар (определение).
44. Абсолютно неупругий удар (определение).
45. Переносная сила инерции (определение).
46. Кориолисова сила инерции (определение).
47. Центробежная сила инерции (определение).
48. Закон сохранения импульса в неинерциальной системе отсчета (формулировка).
49. Закон сохранения момента импульса в неинерциальной системе отсчета (формулировка).
50. Закон сохранения механической энергии в неинерциальной системе отсчета (формулировка).
51. Массовые силы (определение).
52. Принцип эквивалентности Эйнштейна (формулировка).
53. Первый постулат теории относительности (формулировка).
54. Второй постулат теории относительности (формулировка).
55. Прямое преобразование Лоренца (формулы).
56. Обратное преобразование Лоренца (формулы).
57. Собственная длина (определение).
58. Собственное время (определение).
59. Событие (определение).
60. Интервал между событиями (определение).
61. Светоподобные интервалы (определение).
62. Времени-подобные интервалы (определение).
63. Пространственно-подобные интервалы (определение).

### **Лабораторные работы по разделу Механика**

1. Изучение устройства и действия неподвижного блока
2. Изучение устройства и действия подвижного блока
3. Определение КПД при подъеме тела по наклонной плоскости
4. Изучение “золотого правила” механики
5. Измерение скорости неравномерного движения
6. Исследование зависимости скорости равноускоренного движения от времени
7. Измерение ускорения движения тела
8. Исследование зависимости перемещения от времени при равноускоренном движении
9. Исследование движения тела под действием нескольких сил
10. Измерение жесткости пружины
11. Измерение коэффициента трения скольжения
12. Определение ускорения тела по величине действующей на него силы и массе тела

## Раздел 2. Основы молекулярной физики и термодинамики

Статистический и термодинамический методы исследования. Основные положения молекулярно-кинетической теории строения вещества. Тепловое движение. Модель идеального газа. Понятия давления и температуры с точки зрения молекулярно-кинетической теории. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории. Уравнение состояния идеального газа. Газовые законы. Степени свободы. Классический закон распределения энергии по степеням свободы. Внутренняя энергия. Понятие о квантовании энергии вращения и колебания молекул\*.

Первое начало термодинамики. Внутренняя энергия. Количество теплоты. Работа идеального газа при изменении его объема. Применение первого начала термодинамики к изопроцессам изменения состояния идеального газа (изобарный, изохорный, изотермический), а также к адиабатному процессу. Классическая формула теплоемкости идеального газа. Формула Майера. Обратимые и необратимые процессы. Круговые процессы (циклы)\*. КПД кругового процесса\*. Цикл Карно. КПД цикла Карно. Две теоремы Карно\*. Понятия микро- и макросостояния термодинамической системы. Термодинамическая вероятность макроскопического состояния. Понятие энтропии. Формула Больцмана. Энтропия – функция состояния системы. Изменение энтропии при обратимых и необратимых процессах. Второе начало термодинамики и его статистический смысл. Третье начало термодинамики. Тепловые двигатели\*.

Микроскопические параметры. Вероятность и флуктуации. Распределения Максвелла молекул по скоростям. Скорости теплового движения молекул. Опыт Штерна\*. Распределение Больцмана частиц в потенциальном поле. Барометрическая формула. Опыт Перрена. Понятие о распределениях квантовых частиц (функции распределения Бозе-Эйнштейна и Ферми-Дирака)\*. Понятие о каноническом распределении Гиббса\*.

Понятие о физической кинетике. Время релаксации. Эффективное сечение рассеяния. Среднее число столкновений и средняя дина свободного пробега молекул. Явления переноса: диффузия, теплопроводность, внутреннее трение\*. Уравнения и коэффициенты переноса\*. Понятие о вакууме. Свойства газов при низких давлениях\*.

Реальные газы. Силы и потенциальная энергия межмолекулярного взаимодействия. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Критическое состояние. Внутренняя энергия реального газа. Эффект Джоуля-Томсона. Сжижение реальных газов. Фазы и условия равновесия фаз. Фазовые превращения. Фазовые диаграммы\*. Тройная точка\*. Метастабильные состояния\*. Особенности жидкого и твердого состояний вещества.

Энтропия как количественная мера хаотичности. Переход от порядка к беспорядку в состоянии теплового равновесия. Ближний и дальний порядок. Жидкие кристаллы. Макросистемы вдали от равновесия. Открытые диссипативные системы. Проявление самоорганизации в открытых системах. Идеи синергетики. Биоритмы\*. Динамический хаос. Самоорганизация в живой и неживой природе\*. Периодические химические реакции\*.

### Задачи для самостоятельного решения и контрольных заданий

#### 1. МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

1. Найти число молекул в  $1 \text{ см}^3$  и плотность азота при давлении  $1,0 \cdot 10^{11} \text{ мм.рт.ст.}$  и температуре  $15^\circ\text{C}$ . [ $n=3,4 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ ;  $\rho = 1,56 \cdot 10^{-14} \text{ кг/м}^3$ ]

2. В баллоне вместимостью  $V=25 \text{ л}$  находится водород при температуре  $T=290 \text{ К}$ . После того как часть водорода израсходовали, давление в баллоне понизилось на  $\Delta p=0,4 \text{ МПа}$ . Определить массу  $m$  израсходованного водорода. [8,3 г]

3. Оболочка аэростата вместимостью  $V=1600 \text{ м}^3$ , находящегося на поверхности Земли, на  $k=7/8$  наполнена водородом при давлении  $p_1=100 \text{ кПа}$  и температуре  $T_1=290 \text{ К}$ . Аэростат подняли на некоторую высоту, где давление  $p_2=80 \text{ кПа}$  и температура  $T_2=280 \text{ К}$ . Определить массу  $\Delta m$  водорода, вышедшего из оболочки при его подъеме. [6,16 кг]

4. В баллоне, объем которого  $0,250 \text{ м}^3$ , находится газ при температуре  $327^\circ\text{C}$ , состоящий из смеси  $\text{CO}_2$  и паров воды. Число молекул углекислого газа  $N_1 = 6,6 \cdot 10^{21}$ ,

молекул воды  $N_2 = 0,9 \cdot 10^{21}$ . Вычислить давление и молярную массу газовой смеси. [ $p = 244$  Па,  $M = 41$  г/моль]

5. Плотность газа, состоящего из смеси гелия и аргона при давлении 1,5 атм. и температуре  $27^\circ\text{C}$ , равна  $\rho = 2,0$  г/л. Сколько атомов гелия содержится в  $1 \text{ см}^3$  газовой смеси? [ $7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ].

6. В баллоне емкостью  $2 \text{ м}^3$  при температуре 300 К и давлении 0,6 мкПа содержится смесь азота ( $\text{N}_2$ ) и окиси азота ( $\text{NO}$ ) общей массой 14 кг. Определить массу окиси азота. [13,5 кг]

7. Найти плотность газовой смеси, состоящей по массе из одной части водорода к восьми частей кислорода при давлении  $P = 100$  кПа и температуре  $T = 300$  К. [ $0,4 \text{ кг/м}^3$ ]

8. В сосуде емкостью 0,5 л находится 1 г парообразного йода. При температуре  $1000^\circ\text{C}$  давление в сосуде оказалось равным 700 мм.рт.ст. Найти степень диссоциации молекул йода  $\text{J}_2$  на атомы  $\text{J}$  при этих условиях. Масса одного киломоля йода равна 234 кг/кмоль. [ $\alpha = 0,12$ ]

9. Найти относительное число молекул газа, скорости которых отличаются не более чем на  $\Delta\eta = 1\%$  от: а) наиболее вероятной скорости; б) средней квадратичной скорости. [а) 1,66%; б) 1,85%]

10. Какая часть молекул кислорода при  $0^\circ\text{C}$  обладает скоростью от 100 м/с до 110 м/с? [0,4%]

11. Найти отношение числа молекул газа, скорости которых лежат в интервале от  $\nu$  до  $(\nu + \Delta\nu)$  при температуре  $T_1$ , к числу молекул, скорости которых лежат в том же интервале при температуре  $T_2 = 2 T_1$ . Рассмотреть случаи: а)  $\nu = 1/2\nu_{e1}$ , б)  $\nu = 2\nu_{e2}$ . [а) 2,5; б) 0,052]

12. Установленная вертикально закрытая с обоих концов труба наполнена кислородом ( $\text{O}_2$ ). Высота трубы  $h = 200$  м, объем  $V = 200$  л. Стенки трубы имеют всюду одинаковую температуру  $T = 293$  К. Давление газа внутри трубы, вблизи ее основания равно  $P_0 = 10^5$  Па. Определить количество молекул кислорода, содержащихся в трубе. [ $N = 4,19 \cdot 10^{24}$ ]

13. На какой высоте  $h$  плотность кислорода уменьшается на 1%? Температура кислорода  $27^\circ\text{C}$ . [ $h = 78$  м]

14. У поверхности Земли отношение концентраций газов с массами  $m_1$  и  $m_2$  в атмосфере равно  $K_0$ . Каким будет это отношение на высоте  $h$  километров? Температуру считать постоянной и равной  $T$  К. [ $K = K_0 e^{\frac{1000gh}{RT}(m_2 - m_1)}$ ]

15. На какой высоте содержание водорода в воздухе по отношению к углекислому газу увеличится вдвое? Среднюю по высоте температуру считать равной  $40^\circ\text{C}$ . [ $h = 4,19$  км]

16. Зная закон распределения молекул по скоростям, получить его выражение для распределения молекул по относительной скорости  $u = \nu/\nu_B$ , где  $\nu_B$  - наиболее вероятная скорость молекул.

17. Считая атмосферу изотермической, а ускорение свободного падения не зависящим от высоты, вычислить давление а) на высоте 10 км, б) в шахте на глубине 2 км. Расчет произвести для  $T = 300$  К. Давление на уровне моря принять равным  $p_0$ . [ $p_1 = 0,33p_0$ ;  $p_2 = 1,26 p_0$ ]

## 2. ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА В ГАЗАХ

1. Найти среднюю длину свободного пробега и среднее время между столкновениями молекул азота, находящегося: а) при нормальных условиях; б) при температуре  $t = 0^\circ\text{C}$  и давлении  $p = 1$  нПа (такое давление позволяет получать современные вакуумные насосы). [а) 0,06 мкм, 0,13 нс; б) 6 нм, 3,8 ч]

2. Баллон вместимостью  $V = 10$  л содержит водород массой  $m = 1$  г. Определить среднюю длину свободного пробега молекул. [1,55 нм]

3. Определить плотность  $\rho$  разреженного водорода, если средняя длина свободного пробега  $\bar{l} = 1 \text{ см}$ . [ $1,55 \text{ кг/м}^3$ ]

4. Найти зависимость среднего числа столкновений  $\bar{z}$  молекулы идеального газа в 1 с от давления при следующих процессах: 1) изохорном; 2) изотермическом. Изобразить эти зависимости на графиках. [1)  $\bar{z} \sim \sqrt{p}$ ; 2)  $\bar{z} \sim p$ ]

5. Азот находится при нормальных условиях. Найти: а) число столкновений, испытываемых в среднем каждой молекулой за одну секунду; б) число всех столкновений, происходящих между молекулами в  $1 \text{ см}^3$  азота ежесекундно. [а)  $0,74 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$ ; б)  $1 \cdot 10^{29} \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-3}$ ]

6. Оценить среднюю длину свободного пробега  $\bar{l}$  и коэффициент диффузии  $D$  ионов в водородной плазме. Температура плазмы  $10^7 \text{ К}$ , число ионов в  $1 \text{ см}^3$  плазмы равно  $10^{15}$ . При указанной температуре эффективное сечение иона водорода считать равным  $4 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$ . [ $\lambda \sim 10^2 \text{ м}$ ,  $D \sim 10^7 \text{ м}^2/\text{с}$ ]

7. Найти, как зависят от давления средняя длина свободного пробега и число столкновений в 1 с молекул идеального газа, если газ совершает процесс: а) изохорический, б) изотермический, в) адиабатический. Эффективный диаметр молекул считать постоянным. а)  $\bar{l} = \text{const}$ ,  $\bar{z} \sim \sqrt{p}$ ; б)  $\bar{l} \sim 1/p$ ,  $\bar{z} \sim p$ .

8. Найти, как зависят от температуры средняя длина свободного пробега и число столкновений в 1 с молекул идеального газа, если масса газа постоянна и газ совершает процесс: а) изохорический, б) изобарический, в) адиабатический.

[а)  $\bar{l} = \text{const}$ ,  $\bar{z} \sim \sqrt{T}$ ; б)  $\bar{l} \sim T$ ,  $\bar{z} \sim 1/\sqrt{T}$ ]

9. Зная коэффициент вязкости гелия при нормальных условиях ( $\eta = 18,9 \text{ мкПа}\cdot\text{с}$ ), вычислить эффективный диаметр его атома. [ $d = 0,18 \text{ нм}$ ]

10. Коэффициент теплопроводности гелия в 8,7 раза больше, чем у аргона (при нормальных условиях). Найти отношение эффективных диаметров атомов аргона и гелия. [1,7]

11. Коэффициент диффузии кислорода ( $\text{O}_2$ ) при температуре  $0^\circ\text{C}$  равен  $0,19 \text{ см}^2/\text{с}$ . Определить среднюю длину свободного пробега молекул газа. [ $1,35 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ ]

12. Давление двухатомного газа вследствие сжатия увеличивается в 10 раз. Определить, как изменится длина свободного пробега молекул в газе и коэффициент вязкости газа. Рассмотреть случай, когда сжатие происходит: а) изотермически, б) адиабатически. [а)  $\bar{l}$  уменьшится в 10 раз;  $\eta$  останется неизменным, б)  $\bar{l}$  уменьшится в 5,2 раза,  $\eta$  увеличится в 1,39 раза]

13. Двухатомный газ адиабатически расширяется до объема, в два раза большего начального. Определить, как изменится коэффициент теплопроводности и коэффициент диффузии газа. [ $\lambda$  уменьшится в 1,15 раза;  $D$  увеличится в 1,75 раза]

14. Между двумя параллельными плоскими очень большими пластинами имеется зазор  $a = 1 \text{ см}$ . Между пластинами поддерживается разность температур  $\Delta T = 1 \text{ К}$  ( $T_1 = 299,5 \text{ К}$ ,  $T_2 = 300,5 \text{ К}$ ). Зазор заполнен аргоном при давлении  $1,0 \cdot 10^5 \text{ Па}$ . Оценить плотность потока тепла. [ $0,5 \text{ Вт/м}^2$ ]

15. Найти распределение температуры в пространстве между двумя коаксиальными цилиндрами с радиусами  $R_1$  и  $R_2$ , заполненным однородным теплопроводящим веществом, если температуры цилиндров постоянны и равны соответственно  $T_1$  и  $T_2$ .

$$[T = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \ln \frac{r}{R_1}]$$

16. Одноатомный идеальный газ заполняет пространство между двумя очень длинными коаксиальными цилиндрами с радиусами  $R_1$  и  $R_2$  ( $R_2 > R_1$ ). Внутренний цилиндр поддерживается при температуре  $T_1$ , внешний при температуре  $T_2$  ( $T_1 > T_2$ ). Найти поток тепла, приходящийся на единицу длины цилиндров. Считать, что длина свободного

пробега молекул газа много меньше расстояния между цилиндрами.

$$[j_Q = \frac{4k}{3d^2} \sqrt{\frac{\mu}{\pi m}} \frac{T_1^{3/2} - T_2^{3/2}}{\ln(z_2/z_1)}]$$

17. Через площадку  $S = 100 \text{ см}^2$  за время  $\tau = 10 \text{ с}$  вследствие диффузии проходит некоторое количество азота. Градиент плотности в направлении, перпендикулярном площадке равен  $1,26 \text{ кг/м}^4$ . Процесс идет при температуре  $300 \text{ К}$ , средняя длина свободного пробега молекул азота  $10^{-7} \text{ м}$ , эффективный диаметр его молекул  $3,75 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ . Определить количество продиффундировавшего азота за указанное время через площадку  $S$ .

$$[\Delta m = 2,1 \cdot 10^{-6} \text{ кг}]$$

18. Пространство между двумя большими параллельными пластинами заполнено средой, коэффициент теплопроводности которой изменяется с температурой по закону  $k = \alpha_0/T$ , где  $\alpha_0$  – постоянная для данной среды величина. Температуры пластин  $T_1$  и  $T_2$  поддерживаются постоянными ( $T_1 > T_2$ ). Расстояние между пластинами  $L$ . Найти плотность потока тепла и температуру  $T$  в среде как функцию  $x$ , где  $x$  – расстояние от пластины, температура которой  $T_1$ .

$$[j_Q = \frac{\alpha_0}{L} \ln T_1/T_2; T(x) = T_1(T_2/T_1)^{x/L}]$$

### 3. ПЕРВОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ К ИЗОПРОЦЕССАМ В ИДЕАЛЬНОМ ГАЗЕ. ТЕПЛОЕМКОСТЬ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

1. Определить удельные теплоемкости  $c_V$  и  $c_p$  газообразной окиси углерода (СО). Молекулы считать жесткими. [ $c_V = 7,42 \cdot 10^2 \text{ Дж/кг град}$ ;  $c_p = 1,04 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг град}$ ]

2. Чему равны удельные теплоемкости  $c_V$  и  $c_p$  некоторого двухатомного газа, если плотность этого газа при нормальных условиях равна  $\rho_0 = 1,43 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$  [ $c_V = 6,5 \cdot 10^2 \text{ Дж/кг град}$ ,  $c_p = 9,1 \cdot 10^2 \text{ Дж/кг град}$ ]

3. Определить удельные теплоемкости  $c_V$  и  $c_p$  для газа, состоящего по массе из 85%  $O_2$  и 15% озона ( $O_3$ ). Молекулы  $O_2$  и  $O_3$  считать жесткими. [ $c_V = 6,3 \cdot 10^2 \text{ Дж/кг-град}$ ,  $c_p = 8,8 \cdot 10^2 \text{ Дж/кг-град}$ ]

4. Смесь газов состоит из 8 г гелия и 16 г кислорода. Определить отношение  $c_p/c_V$  для данной смеси. [ $\gamma = 1,59$ ]

5. 25% молекул кислорода диссоциировано на атомы. Определить удельные теплоемкости  $c_V$  и  $c_p$  такого газа. [ $c_p = 1,05 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}$ ,  $c_V = 67 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}$ ]

6. Определить отношение  $\gamma = c_p/c_V$  для смеси 3 молей аргона и 5 молей кислорода. [ $\gamma = 1,46$ ]

7. Определить молярную массу  $M$  двухатомного газа и его удельные теплоемкости, если известно, что разность ( $c_p - c_V$ ) удельных теплоемкостей этого газа равна  $260 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$ . [ $c_p = 909 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$ ,  $c_V = 649 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$ ,  $M = 32 \text{ г/моль}$ ]

8. Определить показатель адиабаты  $\gamma$  идеального газа, который при температуре  $T = 350 \text{ К}$  и давлении  $p = 0,4 \text{ Мпа}$  занимает объем  $V = 300 \text{ л}$  и имеет теплоемкость  $C_V = 857 \text{ Дж/К}$ . [1,4]

9. В сосуде вместимостью  $V = 6 \text{ л}$  находится при нормальных условиях двухатомный газ. Определить теплоемкость  $C_V$  этого газа при постоянном объеме. [5,5 Дж/К]

10. Определить молярные теплоемкости газа, если удельные теплоемкости  $c_V = 10,4 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$  11. Вычислить удельные теплоемкости газа, зная, что его молярная масса  $M = 4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$  и отношение теплоемкостей  $C_p/C_V = 1,67$ . [ $c_p = 10,4 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$ ,  $c_V = 3,1 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$ ]

12. Трехатомный газ под давлением  $p = 240 \text{ кПа}$  и температуре  $t = 20^\circ \text{C}$  занимает объем  $V = 10 \text{ л}$ . Определить теплоемкость  $C_p$  этого газа при постоянном давлении. [32,8 Дж/К]

13. Одноатомный газ при нормальных условиях занимает объем  $V=5$  л. Вычислить теплоемкость  $C_V$  этого газа при постоянном объеме. [2,75 Дж/К]

14. При изотермическом расширении азота при температуре  $T=280$  К объем его увеличился в два раза. Определить: 1) совершенную при расширении газа работу  $A$ ; 2) изменение  $\Delta U$  внутренней энергии; 3) количество теплоты  $Q$ , полученное газом. Масса азота  $m=0,2$  кг. [ $Q=A=11,5$  кДж,  $\Delta U=0$ ]

15. При адиабатном сжатии давление воздуха было увеличено от  $p_1=50$  кПа до  $p_2=0,5$  МПа. Затем при неизменном объеме температура воздуха была понижена до первоначальной. Определить давление  $p_3$  газа в конце процесса. [0,26 МПа]

16. Кислород массой  $m=200$  г занимает объем  $V_1=100$  л и находится под давлением  $p_1=200$  кПа. При нагревании газ расширился при постоянном до объема  $V_2=300$  л, а затем его давление возросло до  $p_3=500$  кПа при неизменном объеме. Найти изменение внутренней энергии  $\Delta U$  газа, совершенную газом работу  $A$  и теплоту  $Q$ , переданную газу. Построить график процесса. [ $A=40$ кДж,  $\Delta U=325$  кДж,  $Q=365$  кДж]

17. Во сколько раз увеличится объем водорода, содержащий количество вещества  $\nu=0,4$  моль при изотермическом расширении, если при этом газ получит количество теплоты  $Q=800$  Дж? Температура водорода  $T=300$  К. [ $e^{0,8}=2,2$ ]

18. Какая работа совершается при изотермическом расширении водорода массой  $m=5$  г, взятого при температуре  $T=290$  К, если объем газа увеличился в три раза? [6,62 кДж]

19. Какая доля  $\omega_1$  количества теплоты  $Q$ , подводимого к идеальному двухатомному газу при изобарном процессе, расходуется на увеличение  $\Delta U$  и какая доля  $\omega_2$  – на работу  $A$  расширения? Рассмотреть три случая, если газ: 1) одноатомный; 2) двухатомный; 3) трехатомный. [1)  $\omega_1=0,6$ ,  $\omega_2=0,4$ ; 2)  $\omega_1=0,7$ ,  $\omega_2=0,3$ ; 3)  $\omega_1=0,75$ ,  $\omega_2=0,25$ ]

20. Определить работу  $A$ , которую совершит азот, если ему при постоянном давлении сообщить количество теплоты  $Q=21$  кДж. Найти также изменение  $\Delta U$  внутренней энергии газа. [ $A=6$  кДж,  $\Delta U=15$  кДж]

21. Азот занимает объем  $V_1=2$  м<sup>3</sup> и находится под давлением  $p_1=10^5$  Па. Газ нагревают, причем нагрев ведут сначала при постоянном объеме до давления  $p_2=5 \cdot 10^5$  Па, а затем при постоянном давлении до объема  $V_2=4$  м<sup>3</sup>. Масса азота  $m=3$  кг. Определить изменение внутренней энергии газа, совершенную им работу и количество тепла, переданное газу. [ $\Delta U=5 \cdot 10^6$  Дж,  $A=10^6$  Дж,  $Q=6 \cdot 10^6$  Дж]

22. При изобарическом нагревании от 0 до 100°C моль идеального газа поглощает  $Q=3,35$  кДж тепла. Определить: а) значение  $\gamma$ ; б) приращение внутренней энергии газа  $\Delta U$ , в) работу  $A$ , совершаемую газом. [ $\gamma=1,33$ ;  $\Delta U=2,5$  кДж;  $A=0,85$  кДж]

23. Идеальный газ с  $\gamma=1,4$  расширяется изотермически от объема  $V_1=0,1$  м<sup>3</sup> до объема  $V_2=0,3$  м<sup>3</sup>. Конечное давление газа  $p_2=2 \cdot 10^5$  Па. Определить приращение внутренней энергии газа  $\Delta U$ , совершенную газом работу  $A$ , количество полученного газом тепла  $Q$ . [ $\Delta U=0$ ;  $A=66$  кДж,  $Q=66$  кДж]

24. Некоторое количество идеального газа с одноатомными молекулами совершало при  $p=1,0 \cdot 10^5$  Па обратимый изобарический процесс, в ходе которого объем газа изменился от значения  $V_1=10$  л до  $V_2=20$  л. Определить приращение внутренней энергии газа, совершенную газом работу и полученное количество тепла. [ $\Delta U=1,5$ кДж,  $A=1$ кДж,  $Q=2,5$  кДж]

#### 4. ВТОРОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ. ЭНТРОПИЯ.

1. Один моль идеального двухатомного газа, находящийся под давлением  $p_1=0,1$  МПа при температуре  $T_1=300$  К, нагревают при постоянном объеме до давления  $p_2=0,2$  МПа. После этого газ изотермически расширялся до начального давления и затем изобарически был сжат до начального объема. Начертить график цикла. Определить температуру газа для характерных точек цикла и его К.П.Д. [ $T_2=T_3=\frac{T_1 p_2}{p_1}=600$  K]

2. В ходе цикла Карно рабочее вещество получает от нагревателя тепло  $Q = 300$  кДж. Температуры нагревателя и холодильника равны соответственно  $T_1 = 450$  К и  $T_2 = 280$  К. Определить работу  $A$ , совершаемую рабочим веществом за цикл.

[ $A = 113$  кДж]

3. Найти КПД цикла, состоящего из двух изотерм и двух изохор. Изотермические процессы протекают при температурах  $T_1$  и  $T_2$  ( $T_1 > T_2$ ), изохорические – при объемах  $V_1$  и  $V_2$  ( $V_2$  в  $\epsilon$  раз больше, чем  $V_1$ ). Рабочим веществом является идеальный газ с показателем адиабаты  $\gamma$ .

[ $\eta = (\gamma - 1)(T_1 - T_2) / (\gamma T_1 - T_2)$ ].

4. Идеальный газ совершает цикл Карно при температурах теплоприемника  $T_1$  теплоотдатчика в четыре раза ( $n=4$ ) больше температуры теплоприемника. Какую долю количества теплоты, полученного за один цикл от теплоотдатчика, газ отдаст теплоприемнику? [0,25]

5. Определить работу  $A_2$  изотермического сжатия газа совершающего цикл Карно, КПД которого  $\eta=0,4$ , если работа изотермического расширения равна  $A_1=8$  Дж. [4,8 Дж]

6. Идеальная тепловая машина работает по циклу Карно. Температура нагревателя  $T_1=500$  К. Температура холодильника  $T_2=250$  К. Определить КПД цикла, а также работу  $A_1$  рабочего вещества при изотермическом расширении, если при изотермическом сжатии совершена работа  $A_2=70$  Дж? [140 Дж]

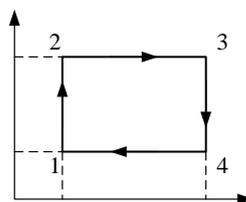
7. Вычислить КПД цикла, состоящего из изотермы, изобары и изохоры, если при изотермическом процессе объем идеального газа с показателем адиабаты  $\gamma$  увеличивается в  $n$  раз. [ $\eta = 1 - \gamma(n - 1) / [n - 1 + (\gamma - 1)n \ln n]$ ]

8. Тепловую машину, работающую по циклу Карно с КПД= 10%, используют при тех же тепловых резервуарах как холодильную машину. Найти ее холодильный коэффициент. [ $\epsilon = (1 - \eta) / \eta$ ]

9. Найти КПД цикла, состоящего из двух изохор и двух изотерм, если в пределах цикла объем изменяется в  $\nu$  раз, а абсолютная температура – в  $\tau$  раз. Рабочим веществом является идеальный газ с показателем адиабаты  $\gamma$ .

[ $\eta = \frac{(\tau - 1) \ln \nu}{\tau \ln \nu + (\tau - 1)(\gamma - 1)}$ ].

10. Рассчитать КПД тепловой машины использующей в качестве рабочего тела идеальный газ и изображенному на рис.5 по циклу, [17,4%]



машины использующей в одноатомный газ и изображенному на рис.5

11. Цикл состоит из изотермы изохоры (рис.6). Отношение  $V_2/V_3=2$ . идеальный газ ( $i=5$ ). Определить КПД

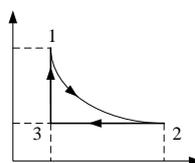


Рис. 6

( $T_1=600$  К), изобары и Рабочее вещество цикла. [10%].

12. Найти изменение энтропии его в пар, если начальная температура пара  $100^\circ$  С. Теплоемкость воды и все процессы – происходящими при Дж/К]

30 г льда при превращении льда  $-40^\circ$ С, а температура льда считать постоянными, а атмосферном давлении.[265

13. Найти приращение энтропии при превращении 1 кг воды при  $0^\circ$  С в пар при  $100^\circ$  С. [7,5 кДж/К]

14. Найти приращение энтропии одного моля углекислого газа при увеличении его абсолютной температуры в  $n = 2$  раза, если процесс нагревания: а) изохорический; б) изобарический.[а)  $\Delta S = R \ln n / (\gamma - 1) = 19$  Дж/кмоль б)  $\Delta S = 25$  Дж/кмоль]

15. Определить изменение энтропии при изотермическом расширении кислорода массой  $m=10$  г от объема  $V_1=25$  л до объема  $V_2=100$  л. [3,6 дж/К]

16. Кислорода массой  $m=2$  кг увеличил свой объем в 5 раз. Одина раз изотермически, другой - адиабатно. Найти изменение энтропии. [836,2 Дж/К]

17. Найти изменение энтропии при переходе 8 г кислорода от объема 10 л при температуре  $80^{\circ}\text{C}$  к объему 40 л при температуре  $300^{\circ}\text{C}$ . [5,4 Дж/К]

18. Подсчитать изменение энтропии для каждого участка цикла Карно; убедиться что полное изменение энтропии равно нулю.

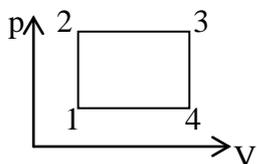


Рис.7

19. Вычислить изменение энтропии для идеального газа при следующих двух обратимых процессах 1-2-3 и 1-4-3 (рис.7).

$$\Delta S = \left(\frac{m}{M}\right) \left[ C_V \ln(P_2/P_1) + C_p \ln(V_2/V_1) \right]$$

20. Гелий массы = 1,7 г. адиабатически расширили в  $n = 3$  раза и затем изобарически сжали до первоначального объема. Найти

приращение энтропии газа в этом процессе.  $\left[ \Delta S = -\frac{m\gamma R}{\mu(\gamma - 1)} \ln n = -10 \right]$

Дж/К]

### Вопросы к семинарским занятиям:

1. Основная задача молекулярной физики
2. Что такое молекулярно-кинетическая теория (МКТ)?
3. Сформулируйте основные положения молекулярно-кинетической теории.
4. Что такое молекула? Атом?
5. Что называют броуновским движением?
6. Что называют диффузией? Приведите примеры диффузии в газах, жидкости и твердых телах.
7. Что называется относительной молекулярной массой? Какая формула выражает это понятие?
8. Чему равна относительная молекулярная масса воды?
9. Что называют количеством вещества? Какая формула выражает смысл этого понятия? Какова единица количества вещества? Дайте определение этой единицы.
10. Что называют постоянной Авогадро? Чему она равна?
11. Что такое молярная масса вещества? Какая формула выражает смысл этого понятия? Какова единица молярной массы?
12. Установите связь между молярной массой и относительной молекулярной массой вещества.
13. По какой формуле определяется число молекул в произвольной массе вещества?
14. Чему равна молярная масса углекислого газа?
15. Какова природа межмолекулярных сил?
16. Какими свойствами обладают силы межмолекулярного взаимодействия?
17. Перечислите агрегатные состояния вещества. Напишите соотношения между кинетической и потенциальной энергиями для газообразного, жидкого и твердого состояния вещества.
18. Перечислите основные свойства газов, жидкостей и твердых тел.
19. Что называют идеальным газом в МКТ? Назовите условия, при которых газ можно считать идеальным.
20. Каков механизм возникновения давления газа с точки зрения МКТ?
21. Какую скорость движения молекул называю средней квадратичной?
22. Что называют концентрацией молекул? Какая формула выражает смысл этого понятия?
23. Запишите и объясните физический смысл основного уравнения МКТ.

24. Какими приборами измеряется давление газа?
25. Что такое термодинамическая система?
26. Назовите макроскопические параметры тел.
27. Отличительные признаки состояния теплового равновесия. Примеры теплового равновесия тел.
28. Что такое температура и что она характеризует?
29. Какова зависимость объема жидкостей и газов от изменения температуры?
30. Как связаны объем, давление и число молекул различных газов в состоянии теплового равновесия?
31. Физический смысл постоянной Больцмана. Чему она равна?
32. Что называют абсолютным нулем температуры? Какой физический смысл этого понятия с точки зрения МКТ?
33. Чему равно давление идеального газа на стенки сосуда при абсолютном нуле температуры?
34. Запишите формулы:
35. Зависимость от температуры кинетической энергии поступательного движения молекул
36. Зависимость давления газа от его температуры и концентрации молекул
37. Напишите значение температуры и давление газа при нормальных условиях.
38. Как изменится средняя квадратичная скорость движения молекул при увеличении температуры в 2 раза?
39. Выведите уравнение Менделеева – Клапейрона для произвольной массы идеального газа
40. Чему равна универсальная газовая постоянная в СИ? Физический смысл универсальной газовой постоянной.
41. Запишите уравнение состояния для 1 моля.
42. Что называют изопроцессами?
43. Какой процесс называют изотермическим? Каким законом описывается этот процесс? Как формулируют и записывают этот закон? Начертите и объясните графики этого закона.
44. Какой процесс называют изохорным? Каким законом описывается этот процесс? Как формулируют и записывают этот закон? Начертите и объясните график этого закона.
45. Какой процесс называют изобарным? Каким законом описывается этот процесс? Как формулируют и записывают этот закон? Начертите и объясните график этого закона.
46. Постройте изотерму, изохору, изобару в координатах  $pV$ ,  $V/T$ ,  $pT$ .
47. Что такое внутренняя энергия? Механическая энергия?
48. Чем отличается внутренняя энергия идеального газа от внутренней энергии реального газа?
49. От каких физических величин зависит внутренняя энергия тела?
50. Выведите формулу внутренней энергии одноатомного идеального газа.
51. Почему газ при сжатии нагревается?
52. Чему равна работа внешних сил, действующих на газ?
53. Как графически определяют работу изобарного расширения газа?
54. Чему равна работа газа при изохорном процессе?
55. Что называют теплопередачей? Виды теплопередачи
56. По какой формуле определяют количество теплоты:

57. Затраченного на превращение в пар жидкости
58. Необходимого для нагревания тела
59. Затраченного на плавление кристаллического тела произвольной массы
60. Выделяемого при сгорании топлива?
61. Что называют уравнением теплового баланса? Как его записывают?
62. Что называют первым законом термодинамики? Как записывают и формулируют этот закон?
63. Запишите первый закон термодинамики для изотермического, изохорного, изобарного и адиабатного процессов.
64. Какой процесс называют адиабатным? При каких условиях он осуществляется?
65. Что называют тепловым двигателем?
66. Запишите КПД теплового двигателя.

### **Лабораторные работы по разделу Основы молекулярной физики и термодинамики**

1. Изучение изобарного процесса
2. Изучение изотермического процесса

**Раздел 3. Электричество и магнетизм** Предмет электростатики. Электрический заряд. Закон сохранения заряда. Дискретность заряда. Точечный заряд. Закон Кулона – основной закон электростатики\*. Электрическое поле. Напряженность электрического поля. Принцип суперпозиции для напряженности. Линейная, поверхностная и объемная плотности заряда. Электрический диполь. Поле диполя. Силовые линии электрического поля. Поток вектора напряженности электрического поля. Закон Гаусса в интегральной форме. Примеры применения закона Гаусса для вычисления электрических полей: поле равномерно заряженной сферы, поле равномерно заряженной бесконечной плоскости, поле двух равномерно заряженных бесконечных плоскостей, поле бесконечной равномерно заряженной нити, поле равномерно заряженного шара. Понятие о дивергенции векторной функции\*. Закон Гаусса в дифференциальной форме\*. Работа сил электростатического поля. Консервативность электростатических сил. Циркуляция вектора напряженности электрического поля\*. Потенциальная энергия заряда в поле другого заряда. Потенциал. Потенциал поля точечного заряда. Потенциальная энергия заряда в поле системы зарядов. Принцип суперпозиции для потенциалов. Разность потенциалов. Эквипотенциальные поверхности. Связь между вектором напряженности и потенциалом\*.

Проводники и диэлектрики. Полярные и неполярные молекулы. Полярные и неполярные молекулы в электрическом поле. Поляризация диэлектриков. Вектор поляризации. Вектор электростатической индукции. Закон Гаусса для вектора электростатической индукции. Диэлектрическая проницаемость. Вектор электростатической индукции на границе раздела диэлектриков. Поляризация ориентационная и деформационная\*. Пьезоэлектрический эффект\*. Сегнетоэлектрики и их свойства\*. Проводники в электрическом поле. Равновесие зарядов на проводниках. Поле вблизи поверхности заряженного проводника. Электростатическая индукция. Емкость проводников. Взаимная емкость. Конденсаторы. Плоский, цилиндрический и сферический конденсаторы\*. Соединения конденсаторов\*. Энергия электрического поля. Объемная плотность энергии электрического поля.

Электрический ток. Условие существования тока. Сила тока. Вектор плотности тока. Уравнение непрерывности. Закон Ома для участка цепи. Закон Ома в дифференциальной форме. Сопротивление проводников. Сторонние силы. Закон Ома для неоднородного участка цепи. Закон Ома для полной цепи. Закон Джоуля-Ленца в интегральной и дифференциальной формах. Работа и мощность электрического тока. Классическая теория электропроводности металлов и ее затруднения. Электропроводность газов.

Несамостоятельный газовый разряд. Теория несамостоятельного газового разряда. Самостоятельный газовый разряд. Процессы, способствующие возникновению самостоятельного газового разряда. Типы самостоятельных разрядов: тлеющий, коронный, искровой, дуговой. Понятие о плазме\*. Электропроводность плазмы\*. Ток в вакууме. Закон Богуславского-Лэнгмюра\*. Контактные явления.

Магнитное поле. Вектор магнитной индукции. Силовые линии магнитного поля. Поток вектора магнитной индукции. Закон Гаусса для магнитного потока в интегральной и дифференциальной формах. Закон Био-Савара-Лапласа. Применение закона Био-Савара-Лапласа для вычисления магнитных полей: поле прямого тока, поле в центре кругового тока, поле движущегося заряда. Закон полного тока в интегральной форме. Применение закона полного тока для вычисления простейших магнитных полей: поле бесконечного прямого тока, поле соленоида, поле тороида. Ротор векторной функции. Закон полного тока в дифференциальной форме. Действие магнитного поля на проводники с током. Закон Ампера. Взаимодействие параллельных токов. Единица силы тока – ампер. Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле. Контур с током в магнитном поле. Магнитный момент контура с током. Движение заряженных частиц в однородном магнитном поле. Сила Лоренца. Циклотрон\*. Эффект Холла\*. Удельный заряд частиц. Масс-спектрометрия\*. Явление электромагнитной индукции. Закон электромагнитной индукции. Правило Ленца. Закон электромагнитной индукции как следствие закона сохранения энергии. Явление самоиндукции. Индуктивность. Токи при замыкании и размыкании цепи. Энергия магнитного поля. Объемная плотность энергии магнитного поля.

Магнитные моменты атомов. Типы магнетиков. Молекулярные токи. Намагниченность. Напряженность магнитного поля. Магнитная восприимчивость и магнитная проницаемость. Элементарная теория диа- и парамагнетизма. Ферромагнетики. Опыты Столетова. Кривая намагничивания. Магнитный гистерезис. Точка Кюри. Домены. Спиновая природа ферромагнетизма\*. Магнитострикция\*.

Фарадеевская и максвелловская трактовки явления электромагнитной индукции. Вихревое электрическое поле. Ток смещения. Система уравнений Максвелла в интегральной и дифференциальной формах. Относительность разделения электромагнитного поля на электрическое и магнитное. Бетатрон\*.

### **Задачи для самостоятельного решения и контрольных заданий**

#### **1. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ВАКУУМЕ**

1. В вершинах квадрата со стороной  $a = 5$  см находятся одинаковые положительные заряды  $q = 2$  нКл. Определить напряженность и потенциал поля в середине одной из сторон квадрата.

$$\text{Ответ: } E = \frac{4\sqrt{5}}{25} \cdot \frac{q}{\pi\epsilon_0 a^2}; \quad \varphi = \frac{q}{\pi\epsilon_0 a} \left(1 + \frac{\sqrt{5}}{5}\right).$$

2. Заряды по 1 нКл помещены в вершинах равностороннего треугольника со стороной 0,2 м. Равнодействующая сил, действующих на четвертый заряд, помещенный на середине одной из сторон треугольника, равна 0,6 мкН. Определить этот заряд, напряженность и потенциал поля в точке его расположения.

$$\text{Ответ: } 2 \cdot 10^{-9} \text{ Кл, } 300 \text{ В/м, } 232 \text{ В.}$$

3. 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 и потенциал электростатического поля в точках, лежащих от центра сфер на расстояниях: 1)  $r_1 = 5$  см; 2)  $r_2 = 6$  см; 3)  $r_3 = 10$  см.

$$\text{Ответ: } 7,2 \text{ кВ/м, } 5 \text{ кВ/м, } 0,9 \text{ кВ/м, } 0,25 \text{ кВ, } 0,19 \text{ кВ, } 90 \text{ В.}$$

4. Полный шар несет на себе равномерно распределенный заряд. Определите радиус шара, если потенциал в центре шара равен  $\varphi_1 = 200$  В, а в точке, лежащей от его центра на расстоянии  $r = 50$  см,  $\varphi_2 = 40$  В.

Ответ: 10 см.

5. Тонкий стержень длиной  $l=10$  см заряжен с линейной плотностью  $\tau = 4 \cdot 10^{-7}$  Кл/м. Найти напряженность электрического поля в точке, расположенной на перпендикуляре к стержню, проведенному через один из его концов, на расстоянии  $r = 8$  см от этого конца.

Ответ:  $E = 35,6$  кВ/м.

6. Найти силу, действующую на точечный заряд  $q_1$ , расположенный в центре полукольца радиусом  $r$ , по которому равномерно распределен заряд  $q_2$ .

Ответ:  $F = q_1 q_2 / 2\pi^2 \varepsilon_0 r^2$ .

7. Тонкий стержень длиной  $L = 10$  см равномерно заряжен с линейной плотностью  $\tau = 1$  мкКл/м. На продолжении оси стержня на расстоянии  $d = 20$  см от ближайшего его конца находится точечный заряд  $Q = 100$  нКл. Определите силу взаимодействия стержня и точечного заряда.

Ответ: 1,5 мН.

8. Тонкое полукольцо радиусом  $R = 20$  см заряжено равномерно зарядом  $Q = 0,7$  нКл. Найдите модуль вектора напряженности электрического поля в центре кривизны этого полукольца.

Ответ: 20 В/м.

9. Тонкий провод длиной 20 см согнут посередине под прямым углом и равномерно заряжен с линейной плотностью  $\tau = 10$  нКл/м. Определите потенциал электрического поля в точке, удаленной от концов стержня на расстояние  $a = 10$  см.

Ответ: 61,8 В.

10. Тонкая нить изогнута по дуге окружности радиусом  $R = 10$  см и несет отрицательный заряд с линейной плотностью  $\tau = -10$  нКл/м. Определите потенциал электрического поля в центре окружности.

Ответ: -282,6 В.

11. Полубесконечная прямая равномерно заряжена с линейной плотностью  $\tau$ . Найти модуль и направление напряженности поля в точке, которая отстоит от нити на расстоянии  $y$  и находится на перпендикуляре к нити, проходящем через ее конец.

Ответ:  $E = \sqrt{2}\tau / 4\pi\varepsilon_0 y$ ,  $\alpha = 45^\circ$ .

12. Найти напряженность и потенциал поля в центре полусферы радиусом  $R$ , заряженной с постоянной поверхностной плотностью  $\sigma$ .

Ответ:  $E = \sigma / 4\varepsilon_0$ ,  $\varphi = \sigma R / 2\varepsilon_0$ .

13. Бесконечная тонкая прямая нить заряжена с линейной плотностью  $\tau = 2,0$  мкКл/м. Найти  $E$  и  $\varphi$  как функции расстояния  $r$  от нити. Потенциал на расстоянии  $r_0 = 1$  м положить равным нулю.

Ответ:  $E = \tau / 2\pi\varepsilon_0 r$ ,  $\varphi = -\frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0} \ln r / r_0$ .

14. Электростатическое поле создается двумя бесконечными параллельными плоскостями, заряженными с поверхностной плотностью  $\sigma_1 = 1$  нКл/м<sup>2</sup> и  $\sigma_2 = -2$  нКл/м<sup>2</sup>. Определить напряженность электростатического поля:

1) между плоскостями;

2) за пределами плоскостей. Построить график  $E(x)$ ,

Ответ:  $E_1 = 169$  В/м;  $E_2 = 56,5$  В/м.

15. Пространство заполнено зарядом, плотность которого изменяется по закону  $\rho = \rho_0 / r$ , где  $\rho_0$  - константа,  $r$  - расстояние от начала координат. Найти зависимость  $E(r)$ .

Ответ:  $E = \rho_0 / 2\epsilon_0$ .

16. Длинный цилиндр радиусом  $R = 2$  см несет заряд, равномерно распределенный по его объему с плотностью  $\rho = 10$  нКл/м<sup>3</sup>. Определите разность потенциалов между точками, отстоящими от оси цилиндра на расстояниях  $r_1 = 1$  см и  $r_2 = 3$  см. Постройте график зависимости напряженности от расстояния до оси цилиндра.

Ответ: 0,175 В.

17. Электростатическое поле создается в вакууме шаром радиусом  $R = 10$  см, равномерно заряженным с объемной плотностью  $\rho = 20$  нКл/м<sup>3</sup>. Определите разность потенциалов между точками, лежащими внутри шара на расстояниях  $r_1 = 2$  см и  $r_2 = 8$  см от его центра.

Ответ: 2,26 В.

18. Шар, имеющий радиус  $R = 10$  см, заряжен так, что объемная плотность электрического заряда изменяется по закону  $\rho = \beta r$ , где  $\beta = 1$  мкКл/м<sup>4</sup>. Определите разность потенциалов между поверхностью и центром шара. Постройте график зависимости напряженности от расстояния до центра шара.

Ответ: 9,4 В.

19. Внутри длинного цилиндра радиусом  $R = 10$  см находится электрический заряд, объемная плотность которого зависит от расстояния  $r$  до оси по закону  $\rho = \rho_0 R / r$ , где  $\rho_0 = 10$  нКл/м<sup>3</sup>. Определите разность потенциалов между осью и поверхностью цилиндра. Постройте график зависимости напряженности поля от  $r$ .

Ответ: 11,3 В.

20. Пространство между двумя коаксиальными длинными цилиндрами заполнено электрическим зарядом с объемной плотностью, изменяющейся по закону  $\rho = b / r^2$ , где  $b = 10$  нКл/м. Радиусы цилиндров  $R_1 = 1$  см,  $R_2 = 2$  см. Определите разность потенциалов между цилиндрами.

Ответ: 54 В.

21. По кольцу радиусом  $R$  равномерно распределен заряд  $q_0$ . Какую работу надо совершить, чтобы перенести заряд  $q$  из центра кольца в точку, расположенную на оси кольца на расстоянии  $R$  от его центра.

Ответ:  $A = \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{2}\right) \frac{q_0 q_1}{4\pi\epsilon_0 R}$ .

22. Бесконечная плоскость заряжена отрицательно с поверхностной плотностью  $\sigma = -35,4$  нКл/м<sup>2</sup>. По направлению силовой линии поля, созданного плоскостью, летит электрон. Определите минимальное расстояние, на которое может приблизиться к плоскости электрон, если на расстоянии  $s = 5$  см он имел кинетическую энергию  $T = 80$  эВ.

Ответ: 2 см.

23. Вдоль линии напряженности однородного электрического поля движется протон. В точке поля с потенциалом  $\varphi_1 = 445$  В протон имел скорость  $v = 100$  км/с. Определите потенциал  $\varphi_2$  точки поля, в которой скорость протона возрастает в два раза. Отношение заряда протона к его массе равно 95,8 МКл/кг.

Ответ: 288,5 В.

24. От поверхности отрицательно заряженного шара отделяется без начальной скорости электрон. Какой будет его скорость на большом расстоянии от шара, если радиус шара  $R = 1$  см, заряд шара  $Q = -1$  нКл?

Ответ:  $1,78 \cdot 10^7$  м/с.

25. Кольцо радиусом  $R = 1$  см имеет равномерно распределенный отрицательный заряд  $Q = -1$  нКл. Какую скорость приобретет электрон, удаляясь без начальной скорости из центра кольца в бесконечность?

Ответ:  $1,78 \cdot 10^7$  м/с.

26. Заряд 1 нКл переносится из точки, находящейся на расстоянии 1 м от бесконечно длинной, равномерно заряженной нити, в точку на расстоянии 10 см от нее. Определить работу, совершаемую против сил поля, если линейная плотность заряда нити 1 мкКл/м. Какая работа совершается на последних 20 см пути?

Ответ:  $4,1 \cdot 10^{-5}$  Дж;  $1,24 \cdot 10^{-5}$  Дж.

## 2. ПРОВОДНИКИ И ДИЭЛЕКТРИКИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

1. Сторонние заряды равномерно распределены с объемной плотностью  $\rho > 0$  по шару радиусом  $R$  из однородного диэлектрика с проницаемостью  $\varepsilon$ . Найти  $E$  и  $\varphi$  как функции расстояния  $r$  от центра шара. Изобразить примерные графики функций  $E(r)$  и  $\varphi(r)$ . Найти поверхностную плотность связанных зарядов.

Ответ:  $E(r < R) = \rho r / 3\varepsilon_0\varepsilon$ ;  $E(r > R) = \rho R^3 / 3\varepsilon_0 r^2$ ;

$\sigma' = \rho R(\varepsilon - 1) / 3\varepsilon$ .

2. Однородный диэлектрик имеет вид сферического слоя, внутренний и внешний радиусы которого равны  $R_1$  и  $R_2$ . Найти  $E(r)$  и  $\varphi(r)$ , где  $r$  - расстояние от центра, если диэлектрику сообщили положительный сторонний заряд  $q$ , распределенный равномерно по внутренней поверхности слоя;

Ответ:  $E(r < R) = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r^2}$ ,  $E(r > R) = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$ ;

$\varphi(r < R) = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 R} + \frac{q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right)$ ,  $\varphi(r > R) = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r}$ .

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

Ответ: 100 В/м; 6,19 нКл/м<sup>2</sup>; 5,31 нКл/м<sup>2</sup>; 5,31 нКл/м<sup>2</sup>.

4. Стеклянная пластинка с проницаемостью  $\varepsilon = 6$  внесена в однородное электрическое поле напряженностью  $E_1 = 10$  В/м и расположена так, что угол  $\alpha_1$  между нормалью к пластинке и направлением внешнего поля равен  $30^\circ$ . Найти напряженность  $E_2$  поля в пластинке, угол  $\alpha_2$ , который это поле образует с нормалью к пластинке, а также плотность  $\sigma'$  связанных зарядов, возникших на поверхностях пластинки,

Ответ:  $E_2 = 5,2$  В/м,  $\alpha_2 = 74^\circ$ ,  $\sigma' = 64$  нКл/м<sup>2</sup>.

5. Точечный сторонний заряд  $q$  находится в центре диэлектрического шара радиусом  $a$  с проницаемостью  $\varepsilon$ . Шар окружен безграничным диэлектриком с проницаемостью  $\varepsilon_1$ . Найти поверхностную плотность связанных зарядов на границе раздела этих диэлектриков.

Ответ:  $\sigma' = (q / 4\pi a^2) (\varepsilon_1 - \varepsilon) / \varepsilon_1 \varepsilon$ .

6. Точечный заряд  $q$  находится в вакууме на расстоянии  $l$  от плоской поверхности однородного изотропного диэлектрика, заполняющего все полупространство. Проницаемость диэлектрика равна  $\varepsilon$ . Найти поверхностную плотность связанных зарядов как функцию расстояния  $r$  от точечного заряда. Рассмотреть случай  $l \rightarrow 0$ .

Ответ:  $\sigma' = -ql(\varepsilon_1 - 1) / 2\pi r^3 (\varepsilon + 1)$ .

7. Пространство между пластинами заполнено парафином ( $\varepsilon = 2$ ). Расстояние между пластинами  $d = 8,85$  мм. Какую разность потенциалов необходимо подать на пластины, чтобы поверхностная плотность связанных зарядов на парафине составляла  $0,1$  нКл/см<sup>2</sup>?

Ответ: 1 кВ.

8. Металлический шар радиусом  $R = 5$  см окружен равномерно слоем фарфора толщиной  $d = 2$  см. Определить поверхностные плотности  $\sigma'_1$  и  $\sigma'_2$  связанных зарядов

соответственно на внутренней и внешней поверхности диэлектрика. Заряд  $Q$  шара равен 10 нКл.

Ответ:  $-0,255 \text{ мкКл/м}^2$ ;  $0,130 \text{ мкКл/м}^2$ .

### 3. ЭЛЕКТРОЁМКОСТЬ. ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

1. Расстояние между пластинами плоского конденсатора составляет  $d=1\text{см}$ , разность потенциалов  $U=200\text{ В}$ . Определите поверхностную плотность  $\sigma'$  связанных зарядов эбонитовой пластинки ( $\varepsilon=3$ ) толщиной  $d=8\text{ мм}$ , помещенной на нижнюю пластину конденсатора.

Ответ:  $253 \text{ нКл/м}^2$ .

2. Зазор между обкладками плоского конденсатора заполнен изотропным диэлектриком, проницаемость которого изменяется в перпендикулярном к обкладкам направлении по линейному закону от  $\varepsilon_1$  до  $\varepsilon_2$ , причем  $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$ . Площадь каждой обкладки  $S$ , расстояние между ними  $d$ . Найти емкость конденсатора.

Ответ:  $C = \varepsilon_0(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)S / d \ln(\varepsilon_2 / \varepsilon_1)$ .

3. Найти емкость сферического конденсатора, радиусы обкладок которого равны  $a$  и  $b$  ( $b > a$ ), если пространство между обкладками заполнено: а) однородным диэлектриком с проницаемостью  $\varepsilon$ ; б) диэлектриком, проницаемость которого зависит от расстояния  $r$  до центра конденсатора как  $\varepsilon = \alpha / r$ , где  $\alpha = \text{const}$ .

Ответ: а)  $C = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon ab / (b - a)$ ; б)  $C = 4\pi\varepsilon_0\alpha / \ln(b/a)$ .

4. То же, что и в предыдущей задаче, но конденсатор цилиндрический длиной  $l$  и  $r$ -расстояние до оси системы.

Ответ: а)  $C = 2\pi\varepsilon_0\varepsilon l / \ln(b/a)$ ; б)  $C = 2\pi\varepsilon_0l\alpha / (b - a)$ .

5. Определить суммарную энергию взаимодействия точечных зарядов, расположенных в вершинах квадрата со стороной  $a$ , для случаев: а)  $q_1=q_2=q$ ;  $q_3=q_4=-q$ ; б)  $q_1=q_3=q$ ;  $q_2=q_4=q$ .

Ответ: а)  $W = -\sqrt{2}q^2 / 4\pi\varepsilon_0a$ ; б)  $W = (\sqrt{2} - 4)q^2 / 4\pi\varepsilon_0a$ .

6. Точечный заряд  $q = 3,0 \text{ мкКл}$  находится в центре шарового слоя из однородного диэлектрика с проницаемостью  $\varepsilon = 3$ . Внутренний радиус слоя  $a=350 \text{ мм}$ , внешний  $b=600 \text{ мм}$ . Найти электрическую энергию в данном слое.

Ответ:  $W = (q^2 / 8\pi\varepsilon_0\varepsilon)(1/a - 1/b) = 27 \text{ мкДж}$ .

7. Уединенная металлическая сфера электроемкостью  $C = 4 \text{ пФ}$  заряжена до потенциала  $\varphi = 1 \text{ кВ}$ . Определите энергию поля, заключенную в сферическом слое между сферой и концентрической с ней сферической поверхностью, радиус которой в 4 раза больше радиуса уединенной сферы.

Ответ:  $1,5 \text{ мкДж}$ .

8. Сплошной эбонитовый шар ( $\varepsilon = 3$ ) радиусом  $R = 5 \text{ см}$  заряжен равномерно с объемной плотностью  $\rho = 10 \text{ нКл/м}^3$ . Определите энергию электростатического поля, заключенную внутри шара.

Ответ:  $0,164 \text{ пДж}$ .

9. Разность потенциалов между пластинами плоского конденсатора  $U = 100 \text{ В}$ . Площадь каждой пластины  $S = 200 \text{ см}^2$ , расстояние между пластинами  $d = 0,5 \text{ мм}$ , пространство между ними заполнено парафином ( $\varepsilon = 2$ ). Определите силу притяжения пластин друг к другу.

Ответ:  $7,08 \text{ мН}$ .

10. Сферическую оболочку радиусом  $R_1$ , равномерно заряженную зарядом  $q$ , расширили до радиуса  $R_2$ . Найти работу, совершенную электрическими силами.

Ответ:  $A = (q^2 / 8\pi\varepsilon_0)(1/R_1 - 1/R_2)$ .

11. Первоначально заряд  $q = 1,0 \cdot 10^{-10} \text{ Кл}$  распределяется равномерно по объему шара радиусом  $r = 1,0 \text{ см}$ . Затем вследствие взаимного отталкивания заряды переходят на

поверхность шара. Какую работу совершают при этом электрические силы над зарядами? ( $\varepsilon = 1$ )

Ответ:  $A = 0,9$  нДж.

12. Плоский воздушный конденсатор с площадью пластин  $S = 800 \text{ см}^2$  подключен к батарее, ЭДС которой  $300 \text{ В}$ . Определите работу внешних сил по раздвижению пластин от  $d_1 = 1 \text{ см}$  до  $d_2 = 3 \text{ см}$  в случаях: а) перед раздвижением пластины отключаются от батареи; б) пластины в процессе раздвижения остаются подключенными к батарее.

Ответ: а)  $A = 3,9$  мкДж; б)  $A = 2,66$  мкДж.

13. Две пластины площадью  $100 \text{ см}^2$  погружены в масло, диэлектрическая проницаемость которого  $\varepsilon = 2$ , и подключены к полюсам батареи с ЭДС, равной  $300 \text{ В}$ . Какую работу необходимо совершить, чтобы после отключения батареи расстояние между пластинами уменьшилось от  $5$  до  $1 \text{ см}$ ?

Ответ:  $0,127$  мкДж.

14. Энергия заряженного плоского конденсатора, заполненного диэлектриком, равна  $W = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}$ . После отключения конденсатора от источника напряжения диэлектрик из конденсатора вынули, совершив при этом работу  $A = 7 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}$ . Найти диэлектрическую проницаемость диэлектрика.

Ответ:  $4,5$ .

15. Площадь каждой обкладки воздушного конденсатора  $314 \text{ см}^2$ , расстояние между ними  $2 \text{ мм}$ . Напряженность поля между обкладками  $60 \text{ кВ/м}$ . Какую работу нужно совершить, чтобы вдвинуть между обкладками конденсатора стеклянную пластинку, если она полостью заполняет конденсатор и конденсатор после зарядки отключен от источника напряжения?

Ответ:  $-0,86$  мкДж.

16. Расстояние между обкладками плоского конденсатора равно  $8 \text{ мм}$ , площадь обкладок  $62,8 \text{ см}^2$ . Какую работу нужно совершить, чтобы вдвинуть между обкладками конденсатора стеклянную пластинку той же площади и толщиной  $6 \text{ мм}$ , если конденсатор присоединен к источнику напряжения  $600 \text{ В}$ ?

Ответ:  $2,25$  мкДж.

#### 4. ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

1. По медному проводнику сечением  $0,8 \text{ мм}^2$  течет ток  $80 \text{ мА}$ . Найдите среднюю скорость упорядоченного движения электронов вдоль проводника, предполагая, что на каждый атом меди приходится один свободный электрон. Плотность меди  $\rho = 8,9 \text{ г/см}^3$ .

Ответ:  $7,41$  мкм/с.

2. Напряжение на концах проводника сопротивлением  $5 \text{ Ом}$  за  $0,5 \text{ с}$  равномерно возрастает от  $0$  до  $20 \text{ В}$ . Какой заряд проходит через проводник за это время?

Ответ:  $1 \text{ Кл}$ .

3. Определите суммарный импульс электронов в прямом проводнике длиной  $l = 500 \text{ м}$ , по которому течет ток  $I = 20 \text{ А}$ .

Ответ:  $5,69 \cdot 10^{-8} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$ .

4. По алюминиевому проводу сечением  $S = 0,2 \text{ мм}^2$  течет ток  $I = 0,2 \text{ А}$ . Определите силу, действующую на отдельные свободные электроны со стороны электрического поля. Удельное сопротивление алюминия  $\rho = 26 \text{ нОм} \cdot \text{м}$ .

Ответ:  $14,6 \cdot 10^{-21} \text{ Н}$ .

5. Из материала с удельным сопротивлением  $\rho$  изготовлено плоское кольцо толщиной  $d$ . Радиусы кольца равны  $a$  и  $b$  ( $b > a$ ). Между внешней и внутренней цилиндрическими поверхностями кольца поддерживается некоторая разность потенциалов. Найти сопротивление  $R$  кольца в этих условиях.

Ответ:  $R = (\rho/2\pi d) \ln(b/a)$ .

6. Зазор между обкладками плоского конденсатора заполнен диэлектриком, удельная проницаемость  $\sigma$  которого изменяется в направлении, перпендикулярном к обкладкам, по

линейному закону от  $\sigma_1 = 1,0 \cdot 10^{-12}$  до  $\sigma_2 = 1,0 \cdot 10^{-11}$  см/м. Найти ток утечки через конденсатор при условии, что напряжение на обкладках  $U = 300$  В. Площадь обкладок  $S = 100$  см<sup>2</sup>, зазор между обкладками  $d = 2,0$  мм.

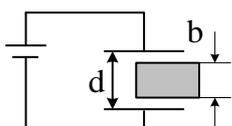
Ответ:  $I = 5,9$  нА.

7. Аккумулятор заряжается от сети напряжением  $U = 13$  В током  $I_3 = 5$  А. Найти внутреннее сопротивление и ЭДС аккумулятора, если известно, что при замыкании его на внешнее сопротивление  $R = 20$  Ом в цепи течет ток разрядки  $I_p = 0,5$  А.

Ответ:  $0,54$  Ом,  $10,27$  В.

8. Зазор между обкладками плоского конденсатора заполнен веществом с проницаемостью  $\varepsilon = 7,0$  и удельным сопротивлением  $\rho = 100$  ГОм·м. Емкость конденсатора  $C = 3000$  пФ. Найти ток утечки через конденсатор при подаче на него напряжения  $2000$  В.

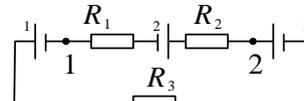
Ответ:  $I = 0,97$  мкА.



9. В плоский конденсатор, расстояние между пластинами которого  $d = 5$  мм, вдвигают стеклянную пластинку ( $\varepsilon = 7$ ) с постоянной скоростью  $v = 50$  мм/с. Ширина пластинки  $b = 4,5$  мм, ЭДС батареи  $\varepsilon = 220$  В. Определить силу тока в цепи.

Ответ:  $I = 52,6$  нА.

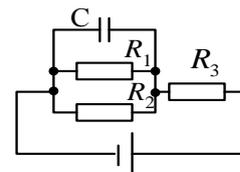
10. Определить разность потенциалов между точками 1 и 2 представленной цепи:  $\varepsilon_1 = 2,0$  В,  $\varepsilon_2 = 5,0$  В,  $\varepsilon_3 = 2,0$  В,  $R_1 = 1,0$  Ом,  $R_2 = 2,0$  Ом,  $R_3 = 2,0$  Ом.



Ответ:  $\varphi_1 - \varphi_2 = -4,5$  В.

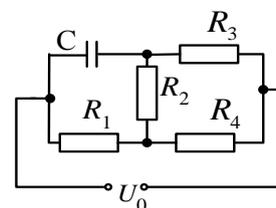
11. Определите ЭДС источника, пренебрегая его внутренним сопротивлением, если заряд на конденсаторе  $Q = 2,2$  мкКл,  $R_1 = R_2 = 50$  Ом,  $R_3 = 100$  Ом,  $C = 50$  нФ.

Ответ:  $220$  В.



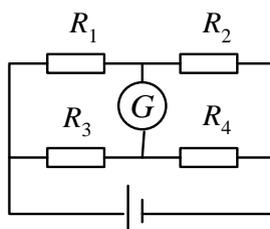
12. Определить заряд на конденсаторе, если  $R_1 = R$ ,  $R_2 = 2R$ ,  $R_3 = 3R$ ,  $R_4 = 4R$ .

Ответ:  $17U_0C/29$ .



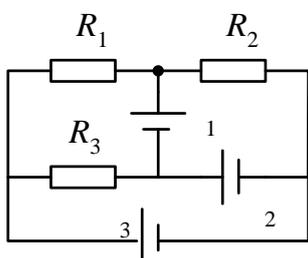
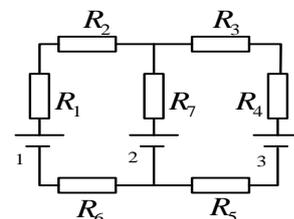
13. Определите силу тока  $I_G$ , протекающего через гальванометр, если  $\varepsilon = 2$  В,  $R_1 = 60$  Ом,  $R_2 = 40$  Ом,  $R_3 = 20$  Ом,  $R_4 = 20$  Ом и  $R_G = 100$  Ом.

Ответ:  $1,49$  мА.



14. В схеме, изображенной на рисунке,  $\varepsilon_1 = 10,0$  В,  $\varepsilon_2 = 20,0$  В,  $\varepsilon_3 = 30,0$  В,  $R_1 = 1,0$  Ом,  $R_2 = 2,0$  Ом,  $R_3 = 2,0$  Ом,  $R_4 = 4,0$  Ом,  $R_5 = 5,0$  Ом,  $R_6 = 6,0$  Ом,  $R_7 = 7,0$  Ом. Внутреннее сопротивление источников мало. Найти силы токов.

Ответ:  $I_1 = 0,6$  А,  $I_2 = 2,9$  А,  $I_3 = 2,3$  А.



15. На рисунке  $\varepsilon_1 = 10$  В,  $\varepsilon_2 = 20$  В,  $\varepsilon_3 = 40$  В, а сопротивление  $R_1 = R_2 = R_3 = 10$  Ом. Определить силы токов  $I_1$  и  $I_2$  через сопротивления и источники ЭДС соответственно.

Ответ:  $I_1 = 1$  А,  $I_2 = 3$  А,  $I_3 = 3$  А,  $I'_1 = 2$  А,  $I'_2 = 0$ ,  $I'_3 = 3$  А.

16. Обкладкам конденсатора емкостью  $C = 2$  мкФ сообщаются разноименные заряды величиной  $q_0 = 1$  мКл. Затем

обкладки замыкаются через сопротивление  $R = 5000$  Ом. Найти: а) закон изменения тока, текущего через сопротивление; б) заряд  $q$ , прошедший через сопротивление за 2 мс; в) количество тепла, выделившееся в сопротивление за то же время.

Ответ: а)  $I = (q_0/RC)\exp(-t/RC)$ ; б)  $q = 0,18$  мКл; в)  $Q = 92$  мДж.

17. Сила тока в проводнике сопротивлением  $R = 15$  Ом равномерно возрастает от  $I_0 = 0$  до некоторого максимального значения в течение времени  $\tau = 5$  с. За это время в проводнике выделилось количество теплоты  $Q = 10$  кДж. Найти среднюю силу тока в проводнике за этот промежуток времени.

Ответ:  $\langle I \rangle = \frac{1}{2} \sqrt{3Q/R\tau} = 10$  А.

18. Сила тока в проводнике сопротивлением  $R = 120$  Ом равномерно возрастает от  $I_0 = 0$  до  $I_{\max} = 5$  А за время  $\tau = 30$  с. Определите выделившееся за это время в проводнике количество теплоты.

Ответ: 100 кДж.

### 1. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВАКУУМЕ ДВИЖУЩЕГОСЯ ЗАРЯДА И ПОСТОЯННОГО ТОКА

Задачи для самостоятельного решения и контрольных заданий

1. Электрон движется прямолинейно и равномерно со скоростью  $v = 3,0 \cdot 10^5$  м/с. Найти индукцию поля, создаваемого электроном в точке, находящейся на расстоянии  $r = 1,0 \cdot 10^{-9}$  м от него и лежащей на перпендикуляре к  $\vec{v}$ , проходящем через мгновенное положение электрона.

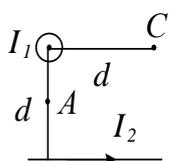
Ответ:  $B = 4,6$  мТл.

2. Электрон движется прямолинейно с постоянной скоростью  $v = 0,2$  Мм/с. Определите магнитную индукцию  $B$  поля, создаваемого электроном в точке, находящейся на расстоянии  $r = 2$  нм от электрона и лежащей на прямой, проходящей через мгновенное положение электрона и составляющей угол  $\alpha = 45^\circ$  со скоростью движения электрона.

Ответ:  $B = 566$  мкТл.

3. Два прямолинейных длинных проводника расположены параллельно на расстоянии 10 см друг от друга. По проводникам текут токи  $I_1 = I_2 = 5$  А в противоположных направлениях. Найти величину и направление магнитной индукции поля в точке, находящейся на расстоянии 10 см от каждого проводника.

Ответ:  $B = 1 \cdot 10^{-5}$  Тл.

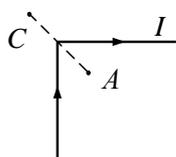


4. Два бесконечно длинных прямых проводника скрещены под прямым углом. По проводникам текут токи  $I_1 = 80$  А и  $I_2 = 60$  А. Расстояние между проводниками  $d = 10$  см. Чему равна магнитная индукция в точках А и С, одинаково удаленных от обоих проводников?

Ответ:  $B_A = \frac{\mu_0}{\pi d} \sqrt{I_1^2 + I_2^2}$   $B_C = \frac{\mu_0}{2\pi d} \sqrt{I_1^2 + I_2^2}$

5. Вычислить магнитную индукцию поля, создаваемого отрезком АВ прямолинейного проводника с током в точке С, расположенной на перпендикуляре к середине этого отрезка на расстоянии 6 см от него. По проводнику течет ток 30 А. Отрезок АВ проводника виден из точки С под углом  $90^\circ$ .

Ответ:  $7,05 \cdot 10^{-5}$  Тл.

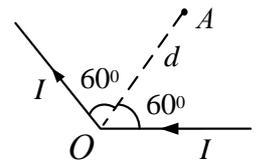


6. Бесконечно длинный прямой проводник согнут под прямым углом. По проводнику течет ток  $I = 100$  А. Вычислить магнитную индукцию в точках, лежащих на биссектрисе угла и удаленных от вершины угла на  $a = 20$  см.

Ответ:  $B_C = 0.4 \cdot 10^{-4} \text{ Тл}$ ,  $B_A = 2.4 \cdot 10^{-4} \text{ Тл}$ .

7. Длинный провод с током  $I = 50 \text{ А}$  изогнут в точке  $O$  под углом  $120^\circ$ . Определить магнитную индукцию в точке  $A$ , расположенной на биссектрисе этого угла на расстоянии  $d = 5 \text{ см}$  от точки  $O$ .

Ответ:  $3,46 \cdot 10^{-4} \text{ Тл}$ .



8. По тонкому проводящему кольцу радиусом  $R = 10 \text{ см}$  течет ток  $I = 80 \text{ А}$ . Найти магнитную индукцию в точке, равноудаленной от всех точек кольца на  $r = 20 \text{ см}$ .

Ответ:  $B = (\mu_0 I R^2) / 2r^3 = 6.28 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}$ .

9. По тонкому проволочному кольцу течет ток. Не изменяя силы тока в проводнике, ему придали форму квадрата. Во сколько раз изменилась магнитная индукция в центре контура?

Ответ:  $B_2 / B_1 = 1,14$

10. Катушка длиной  $l = 20 \text{ см}$  содержит  $N = 100$  витков. По обмотке катушки идет ток  $I = 5 \text{ А}$ . Диаметр катушки  $d = 20 \text{ см}$ . Определить магнитную индукцию в точке, лежащей на оси катушки на расстоянии  $a = 10 \text{ см}$  от ее конца.

Ответ:  $B = \frac{\mu_0 N I}{2l} \left( \frac{a+l}{\sqrt{d^2 + (a+l)^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + d^2}} \right) = 6,06 \cdot 10^{-4} \text{ Тл}$

11. Магнитная индукция  $B$  на оси тороида без сердечника (внешний диаметр тороида  $d_1 = 60 \text{ см}$ , внутренний  $d_2 = 40 \text{ см}$ ), содержащего  $N = 200$  витков, составляет  $0,16 \text{ мТл}$ . Пользуясь теоремой о циркуляции вектора  $B$ , определить силу тока в обмотке тороида.

Ответ:  $I = 1 \text{ А}$

12. По сплошному бесконечному цилиндрическому проводнику радиуса  $R = 2 \text{ см}$  течет ток плотностью  $j = 104 \text{ а/м}^2$ . Рассчитать индукцию магнитного поля на расстоянии  $r_1 = 1 \text{ см}$  и  $r_2 = 3 \text{ см}$  от оси проводника.

Ответ:  $B_1 = 6,3 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}$ ;  $B_2 = 8,4 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}$ .

2. СИЛА И МОМЕНТ СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ПРОВОДНИК С ТОКОМ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ. РАБОТА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ КОНТУРА С ТОКОМ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ.

1. По трем параллельным прямым проводам, находящимся на одинаковом расстоянии  $a = 10 \text{ см}$  друг от друга, текут одинаковые токи по  $100 \text{ А}$ . В двух проводах направления токов совпадают. Вычислить силу, действующую на единицу длины каждого провода.

Ответ:  $F_1 = F_2 = \frac{\mu_0 I^2}{2\pi a} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ Н}$ ,  $F_3 = \frac{\sqrt{3} \mu_0 I^2}{2\pi a} = 3.46 \cdot 10^{-2} \text{ Н}$ .

2. По двум тонким проводникам, изогнутым в виде кольца радиусом  $R = 10 \text{ см}$ , текут одинаковые токи по  $10 \text{ А}$  в каждом. Найти силу взаимодействия этих колец, если плоскости, в которых лежат кольца, параллельны, а расстояние между центрами колец  $d = 1 \text{ мм}$ .

Ответ:  $F = \frac{\mu_0 I^2 r}{d} = 1.26 \cdot 10^{-2} \text{ Н}$ .

3. По кольцу течет ток. На оси кольца на расстоянии  $d = 1 \text{ м}$  от его плоскости магнитная индукция  $B = 10 \text{ Тл}$ . Чему равен магнитный момент  $P_m$  кольца с током? Радиус кольца много меньше величины  $d$ .

Ответ:  $P_m = \frac{2\pi d^3 B}{\mu_0} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ Ам}^2$ .

4. Электрон в атоме водорода движется вокруг ядра по круговой орбите некоторого радиуса. Чему равно отношение магнитного момента  $P_m$  эквивалентного кругового тока к величине момента импульса орбитального движения электрона?

$$\frac{P_m}{L} = \frac{e}{2m} = 8.79 \cdot 10^{10} \text{ Кл/кг}$$

Ответ:  $\frac{P_m}{L} = \frac{e}{2m} = 8.79 \cdot 10^{10} \text{ Кл/кг}$ .

5. Проводник в виде тонкого полукольца радиусом 10 см находится в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 5.0 \cdot 10^{-2}$  Тл. По проводнику течет ток  $I = 10$  А. Найти силу, действующую на проводник, если плоскость полукольца перпендикулярна линиям индукции, а концы провода находятся вне поля.

Ответ:  $F = 2BIR = 0.1 \text{ Н}$

6. По тонкому проводнику в виде кольца радиусом  $R = 20$  см течет ток  $I = 100$  А. Перпендикулярно плоскости кольца возбуждено однородное магнитное поле с индукцией  $B = 2.0 \cdot 10^{-2}$  Тл. Чему равна сила, растягивающая кольцо?

Ответ:  $F = IBR = 0,4 \text{ Н}$ .

7. По тонкому проволочному полукольцу радиусом  $R = 50$  см течет ток  $I = 1$  А. Перпендикулярно плоскости полукольца возбуждено однородное магнитное поле с индукцией  $B = 0,01$  Тл. Найдите силу, растягивающую полукольцо. Действие на полукольцо магнитного поля подводющих проводов и взаимодействие отдельных элементов полукольца не учитывать.

Ответ: 0,01Н.

8. Тонкий провод в виде дуги, составляющей треть кольца радиусом  $R = 15$  см находится в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 20$  мТл. По проводу течет ток  $I = 30$  А. Плоскость, в которой лежит дуга, перпендикулярна линиям магнитной индукции, и подводные провода находятся вне поля. Определите результирующую силу, действующую на провод со стороны магнитного поля.

Ответ: 0,15 Н.

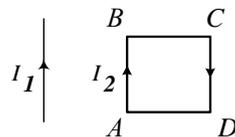
9. Линейный проводник с током расположен перпендикулярно линиям магнитной индукции однородного магнитного поля. Во сколько раз изменится сила, действующая на проводник со стороны магнитного поля, если его изогнуть в виде полуокружности? Плоскость окружности перпендикулярна магнитному полю.

Ответ: 0,64.

10. Квадратная проволочная рамка расположена в одной плоскости с длинным прямым проводом так, что две ее стороны параллельны проводу. По рамке и проводу текут одинаковые токи  $I = 10$  А. Определите силу, действующую на рамку, если ближайшая к проводу сторона рамки находится на расстоянии, равном ее длине.

Ответ: 10<sup>-5</sup> Н.

11. Квадратная проволочная рамка со стороной длиной  $L = 10$  см расположена в одной плоскости с проводом так, что две ее стороны параллельны проводу. Сторона АВ рамки закреплена и от провода, равном ее длине. По проводу течет ток  $I_1 = 10$  А, по рамке – ток  $I_2 = 0,1$  А. Определите момент силы относительно точки В, действующей на участок ВС. Магнитным полем тока в рамке пренебречь.



сторонай длиной  $L = 10$  см расположена в одной плоскости с проводом так, что две ее стороны параллельны проводу. Сторона АВ рамки закреплена и от провода, равном ее длине. По проводу течет ток  $I_1 = 10$  А, по рамке – ток  $I_2 = 0,1$  А. Определите момент силы относительно точки В, действующей на участок ВС. Магнитным полем тока в рамке пренебречь.

Ответ:  $6 \cdot 10^{-9} \text{ Н}\cdot\text{м}$ .

12. Квадратная рамка помещена в однородное магнитное поле, перпендикулярное ее плоскости. Сторона квадрата  $a = 0,2$  м. По рамке протекает ток  $I = 10$  А. Какова сила натяжения провода, если индукция магнитного поля  $B = 1$  Тл? Деформацией и магнитным полем провода пренебречь.

Ответ: 1 Н.

13. Диск радиусом  $R = 10$  см несет равномерно распределенный по поверхности заряд  $q = 0,2$  мкКл. Диск равномерно вращается относительно оси, перпендикулярной плоскости диска и проходящей через его центр. Частота вращения  $n = 20$  с<sup>-1</sup>. Определить: 1) магнитный момент  $P_m$  кругового тока, создаваемого диском; 2) отношение магнитного момента к моменту импульса  $P_m / L$  если масса диска  $m = 100$  г.

Ответ:  $6,28 \cdot 10^{-8} \text{ А} \cdot \text{м}^2$ ;  $2 \text{ мкКл/кг}$ .

14. Короткая катушка площадью поперечного сечения  $S = 160$  см<sup>2</sup>, содержащая  $N = 200$  витков провода, по которому течет ток  $I = 4$  А, помещена в однородное магнитное поле напряженностью  $H = 8 \cdot 10^3$  А/м. Определить магнитный момента катушки, а также вращающий момент  $M$ , действующий на нее со стороны поля, если ось катушки составляет угол  $\alpha = 60^\circ$  с линиями поля.

Ответ:  $P_m = ISN = 12 \text{ А} \cdot \text{м}^2$ ;  $M = \mu_0 P_m H \sin \alpha = 0,1 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

15. Рамка гальванометра, содержащая  $N = 200$  витков тонкого провода, подвешена на упругой нитке. Площадь рамки  $S = 1$  см<sup>2</sup>. Нормаль к плоскости рамки перпендикулярна к линиям магнитной индукции ( $B = 5 \cdot 10^{-3}$  Тл). Когда через гальванометр был пущен ток  $I = 2 \cdot 10^{-6}$  А, то рамка повернулась на угол  $\alpha = 30^\circ$ . Найти величину постоянной кручения  $C$  нити.

$$C = M/\varphi = \frac{NISB \cos \alpha}{\alpha} = 3,32 \cdot 10^{-7} \text{ Н} \cdot \text{м/рад}$$

Ответ;

16. Подвижный элемент гальванометра представляет квадратную рамку, содержащую  $N = 100$  витков тонкой проволоки, помещенную в однородное магнитное поле с индукцией  $B = 0,1$  Тл. Плоскость рамки параллельна линиям индукции. Сторона рамки  $a = 4$  см. Найти работу, совершаемую этими силами при повороте рамки в положение, при котором вектор магнитной индукции противоположен вектору дополнительного магнитного момента.

Ответ:  $-16 \text{ мкДж}$ .

17. Магнитная стрелка, помещенная в центре кругового проводника радиусом  $R = 10$  см, образует угол  $\alpha = 20^\circ$  с вертикальной плоскостью, в которой находится проводник. Когда по проводнику пустили ток силой  $I = 3$  А, то стрелка повернулась в таком направлении, что угол  $\alpha$  увеличился. Определить угол поворота стрелки.

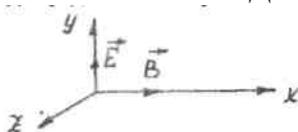
Ответ:  $33,5^\circ$ .

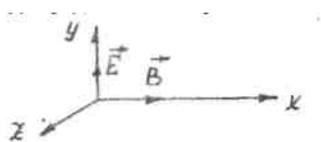
18. По кольцу, сделанному из тонкого гибкого проводника радиусом  $R = 10$  см, течет ток  $I = 100$  А. Перпендикулярно плоскости кольца возбуждено магнитное поле, индукция которого  $B = 0,1$  Тл. Собственное магнитное поле кольца и внешнее поле совпадают. Определить работу внешних сил, которые, действуя на проводник, деформировали его и придали ему форму квадрата. Сила тока при этом поддерживалась неизменной.

Ответ:  $A = \pi I B R^2 (1 - \pi/4) = 6,75 \cdot 10^{-2} \text{ Дж}$ .

19. Виток, по которому течет ток силой  $I = 20$  А, свободно установился в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 0,016$  Тл, Диаметр витка  $d = 10$  см. Какую работу нужно совершить, чтобы повернуть виток на угол  $\alpha = \pi/2$  относительно оси, совпадающей с диаметром?

Ответ:  $A = 5,02 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}$ .





### 3. ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ И МАГНИТНОМ ПОЛЯХ

1. Ион, несущий один элементарный заряд, движется в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 0,015$  Тл по окружности радиусом  $r = 10$  см. Чему равен импульс иона?

Ответ:  $P = 2,4 \cdot 10^{-22}$  кг·м/с.

2. Заряженная частица движется в однородном магнитном поле по окружности радиусом  $R = 1$  мм. Ее кинетическая энергия равна 1 кэВ. Найдите силу, действующую на частицу со стороны поля.

Ответ:  $F = 2T/r = 0,32 \cdot 10^{-12}$  Н.

3. Перпендикулярно магнитному полю с индукцией  $B = 0,1$  Тл возбуждено электрическое поле напряженностью  $E = 100$  кВ/м. Перпендикулярно обоим полям движется, не отклоняясь от прямолинейной траектории, заряженная частица. Вычислить скорость частицы.

Ответ:  $v = 106$  м/с.

4. Заряженная частица прошла ускоряющую разность потенциалов  $U = 104$  В и влетела в скрещенное под прямым углом электрическое ( $E = 10$  кВ/м) и магнитное ( $B = 0,1$  Тл) поля. Найдите отношение заряда частицы к ее массе, если, двигаясь перпендикулярно обоим полям, частица не испытывает отклонений от прямолинейной траектории.

Ответ:  $4,8 \cdot 10^7$  Кл/кг.

5. Частица, несущая один элементарный заряд, влетела в однородное магнитное поле с индукцией  $B = 0,5$  Тл. Определить момент импульса, которым обладала частица при движении в магнитном поле, если ее траектория представляла дугу окружности радиусом 0,2 см.

Ответ:  $L = 3,2 \cdot 10^{-25}$  кг·м<sup>2</sup>/с.

6. Протон, прошедший ускоряющую разность потенциалов 600 В, влетел в однородное магнитное поле с индукцией  $B = 0,3$  Тл и начал двигаться по окружности. Вычислить радиус окружности.

Ответ:  $r = 12$  мм.

7. Заряженная частица, обладающая скоростью  $v = 2 \cdot 10^6$  м/с, влетела в однородное магнитное поле с индукцией  $B = 0,52$  Тл. Найдите отношение заряда частицы к его массе, если частица в поле описала дугу окружности радиусом  $R = 4$  см. Определите по отношению, какая это частица.

Ответ:  $\frac{q}{m} = \frac{v}{RB} = 96,3 \cdot 10^6$  Кл/кг, протон.

8. Заряженная частица прошла ускоряющую разность потенциалов  $U = 2$  кВ и, попав в однородное магнитное поле, стала двигаться по окружности радиусом  $R = 1$  см. Определите отношение заряда частицы к ее массе, если индукция магнитного поля  $B = 15,1$  мТл.

Ответ:  $17,5 \cdot 10^{10}$  Кл/кг.

9. Электрон в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 0,1$  Тл движется по окружности. Найдите величину эквивалентного кругового тока, создаваемого движением электрона.

Ответ:  $I = \frac{Be^2}{2\pi m} = 4,48 \cdot 10^{-10}$  А.

10. Однозарядные ионы аргона, пройдя ускоряющее напряжение  $U = 800$  В, попадают в однородное магнитное поле, где разделяются на два пучка, движущиеся в вакууме по дугам

окружностей радиусами  $R_1 = 7,66$  см и  $R_2 = 8,08$  см. Определите массовые числа изотопов аргона, если индукция магнитного поля  $B = 0,32$  Тл.

Ответ: 35,9; 39,9.

11. Электрон движется в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 10^{-4}$  Тл по винтовой линии. Чему равна скорость электрона, если шаг винтовой линии  $h = 20$  см, а радиус  $R = 5$  см?

Ответ:  $v = \frac{Be}{m} \sqrt{R^2 + \frac{h^2}{4\pi^2}} = 1,04 \cdot 10^9$  м/с.

12. Электрон движется в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 9 \cdot 10^{-3}$  Тл по винтовой линии, радиус которой  $r = 1$  см и шаг  $h = 7,8$  см. Определить период обращения электрона и его скорость.

Ответ:  $T = 3,97 \cdot 10^{-9}$  с;  $v = 25 \cdot 10^6$  м/с.

13. Электрон движется в однородном магнитном поле так, что вектор его скорости, равной  $2 \cdot 10^6$  м/с, составляет с направлением вектора индукции магнитного поля угол  $\alpha = \pi/3$ . Определите шаг винтовой линии, по которой движется электрон, если  $B = 0,01$  Тл.

Ответ: 3,57 мм.

14. Какую энергию приобретет протон, сделав 40 оборотов в магнитном поле циклотрона, если максимальное значение переменной разности потенциалов между дуантами  $U = 60$  кВ? На сколько процентов масса протона, обладающего такой кинетической энергией, больше массы покоя? Какую скорость приобретет протон?

Ответ:  $T = 2evN = 4,8 \cdot 10^6$  эВ;  $\frac{\Delta m}{m_0} = \frac{T}{E_0} = 0,5\%$ ;  $v = 3 \cdot 10^7$  м/с.

15. В циклотроне требуется ускорить ионы гелия ( $He^{++}$ ). Частота переменной разности потенциалов, приложенной к дуантам, 107 Гц. Какова должна быть индукция  $B$  магнитного поля, чтобы период обращения ионов совпадал с периодом изменения разности потенциалов?

Ответ:  $B = 1,3$  Тл.

16. Сколько оборотов должен сделать протон в магнитном поле циклотрона, чтобы приобрести кинетическую энергию  $T = 107$  эВ, если протон проходит между дуантами всегда при максимальной разности потенциалов  $U = 30$  кВ?

Ответ:  $N = 167$ .

17. Определите удельный заряд частиц, ускоренных в циклотроне в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 1,7$  Тл при частоте ускоряющего напряжения  $\nu = 25,9$  МГц.

Ответ:  $9,57 \cdot 10^7$  Кл/кг.

18. Определите постоянную Холла для натрия, если для него отношение концентрации электронов проводимости к концентрации атомов составляет 0,984. Плотность натрия  $\rho = 0,97$  г/см<sup>3</sup>.

Ответ:  $2,5 \cdot 10^{-10}$  м<sup>3</sup>/(А·с)

#### 4. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В Веществе

##### 4.4. Задачи для самостоятельного решения и контрольных заданий

1. Тороид со стальным сердечником имеет  $n = 10$  витков на каждый сантиметр длины. По тороиду течет ток силой  $I = 2$  А. Вычислить магнитный поток  $\Phi$  в сердечнике, если его сечение  $S = 4$  см<sup>2</sup>.

Ответ:  $\Phi = 0,52 \cdot 10^{-2}$  Вб.

2. Сколько ампер-витков требуется для того, чтобы получить магнитный поток  $\Phi = 3 \cdot 10^{-3}$  Вб в железном сердечнике тороида, если длина средней линии сердечника  $l = 120$  см и сечение  $S = 2,5$  см<sup>2</sup>?

Ответ:  $IN = 840$  А.

3. Тороид со стальным сердечником, длина которого по средней линии  $l = 1$  м, имеет вакуумный зазор  $l_0 = 4$  мм. Обмотка содержит  $n = 8$  витков/см. При какой силе тока  $J$  индукция  $B$  в зазоре будет равна 1 Тл?

Ответ:  $I = 5 \text{ А}$ .

4. Обмотка тороида, имеющего стальной сердечник с узким вакуумным зазором, содержит  $N = 1000$  витков. По обмотке течет ток  $I = 1 \text{ А}$ . При какой величине вакуумного зазора  $l_0$  индукция  $B$  магнитного поля в нем будет равна  $0,5 \text{ Тл}$ ? Длина тороида по средней линии  $l = 1 \text{ м}$ .

Ответ:  $l_0 = 2,25 \text{ мм}$ .

5. Определить число ампер-витков тороида с железным сердечником, при котором индукция  $B$  в узком вакуумном зазоре шириной  $l_0 = 3,6 \text{ мм}$  составляет  $1,4 \text{ Тл}$ . Длина тороида по средней линии  $l = 0,8 \text{ м}$ .

Ответ:  $IN = 5,8 \cdot 10^3 \text{ А}$ .

6. По обмотке тора течет ток, создающий в узком вакуумном зазоре магнитный поток  $\Phi = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}$ . Ширина зазора  $l_0 = 8 \text{ мм}$ . Какова должна быть ширина зазора, чтобы магнитный поток в нем при той же силе тока увеличился в два раза?

Ответ:  $l = 1,8 \text{ мм}$ .

7. Железное кольцо средним диаметром  $11,4 \text{ см}$  имеет обмотку из  $200$  витков, по которой течет ток силой  $5 \text{ А}$ . Какой ток должен проходить через обмотку, чтобы индукция в сердечнике осталась прежней, если в кольце сделать прорезь шириной в  $1 \text{ мм}$ ? Найти магнитную проницаемость в материале сердечнике при этих условиях.

Ответ:  $I = 11,3 \text{ А}$ ;  $\mu = 457$ .

8. По обмотке соленоида, в который вставлен железный сердечник 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.

Ответ:  $2,88 \text{ Дж}$ .

9. Обмотка тороида с железным сердечником имеет  $N = 151$  виток. Средний радиус  $r$  тороида составляет  $3 \text{ см}$ . Сила тока  $I$  через обмотку равна  $1 \text{ А}$ . Определите для этих условий: 1) индукцию магнитного поля внутри тороида; 2) намагниченность сердечника; 3) магнитную проницаемость сердечника. Используйте график зависимости  $B$  от  $H$ .

Ответ: 1)  $1,5 \text{ Тл}$ ; 2)  $1,2 \cdot 10^6 \text{ А/м}$ ; 3)  $1,5 \cdot 10^3$ .

10. Напряженность однородного магнитного поля в платине равна  $5 \text{ А/м}$ . Определите магнитную индукцию поля, создаваемого молекулярными токами, если магнитная восприимчивость платины равна  $3,6 \cdot 10^{-4}$ .

Ответ:  $2,26 \text{ нТл}$ .

11. По круговому контуру радиусом  $r = 40 \text{ см}$ , погруженному в жидкий кислород, течет ток  $I = 1 \text{ А}$ . Определите намагниченность в центре этого контура. Магнитная восприимчивость жидкого кислорода  $\chi = 3,4 \cdot 10^{-3}$ .

Ответ:  $4,25 \text{ мА/м}$ .

## 5. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ. ЭНЕРГИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

1. Прямой проводник длиной  $10 \text{ см}$  помещен в однородном магнитном поле с индукцией  $1 \text{ Тл}$ . Концы проводника замкнуты гибким проводом, находящимся вне поля. Сопротивление всей цепи  $0,4 \text{ Ом}$ . Какая мощность потребуется для того, чтобы двигать проводник перпендикулярно линиям индукции со скоростью  $20 \text{ м/с}$ ?

Ответ:  $P = 10 \text{ Вт}$ .

2. В проволочное кольцо, присоединенное к баллистическому гальванометру, вставили прямой магнит. По цепи протекло количество электричества  $10^{-5} \text{ Кл}$ . Определить магнитный поток  $\Phi$ , пересеченный кольцом, если сопротивление цепи гальванометра равно  $30 \text{ Ом}$ .

Ответ:  $\Phi = 3 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}$ .

3. На расстоянии  $1 \text{ м}$  от длинного прямого проводника с током  $10^3 \text{ А}$  расположено кольцо радиусом  $1 \text{ см}$ . Кольцо расположено так, что поток, пронизывающий кольцо, максимален.

Чему равно количество электричества, которое протечет по кольцу, если ток в проводнике будет выключен? Сопротивление кольца 10 Ом.

Ответ:  $q = 62,8 \cdot 10^{-6}$  Кл.

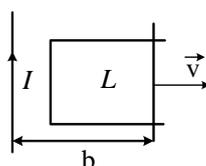
4. В однородном магнитном поле с индукцией  $B = 0,4$  Тл в плоскости, перпендикулярной силовым линиям поля, вращается стержень длиной  $l = 10$  см. Ось вращения проходит через один из концов стержня. Определить разность потенциалов на концах стержня при частоте его вращения  $n = 16$  об/с.

Ответ:  $U = \pi l^2 B n = 0,2$  В.

5. Тонкий медный проводник массой 1 г согнут в виде квадрата, и концы его замкнуты. Квадрат помещен в однородное магнитное поле ( $B = 0,1$  Тл) так, что плоскость его перпендикулярна линиям поля. Определить количество электричества  $q$ , которое протечет по проводнику, если квадрат, потянув за противоположные вершины, вытянуть в линию.

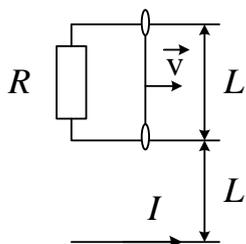
Ответ:  $q = 41,4 \cdot 10^{-3}$  Кл

6. Длинный прямой проводник с током  $I = 10$  А и П-образный проводник с подвижной перемычкой расположены в одной плоскости. Перемычку, длина которой вправо с постоянной скоростью  $v = 0,1$  м/с. индуцируемую в контуре в тот момент, перемычки до проводника с током равно



10 А и П-образный расположены в одной плоскости. Перемычку, длина которой  $L = 10$  см, перемещают вправо с постоянной скоростью  $v = 0,1$  м/с. Найдите ЭДС, индуцируемую в контуре в тот момент, когда перемычка находится на расстоянии  $b = 0,1$  м от проводника с током.

Ответ:  $2 \cdot 10^{-7}$  В.

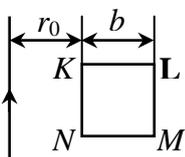


7. По длинному прямому проводу пропускают ток  $I = 10$  А. На расстояниях  $L$  и  $2L$  от него расположены два параллельных ему провода, замкнутых на одном конце резистором с сопротивлением  $R = 1$  Ом. По проводам перемещают стержень-перемычку с постоянной скоростью  $v = 1$  м/с. Найдите силу индуцируемого тока.

Ответ: 1,39 мкА.

= 20 см расположен бесконечный проводник с током  $I = \alpha t^3$ , где  $\alpha$  — постоянная. Определите ЭДС, индуцируемую в контуре в тот момент, когда перемычка находится на расстоянии  $b = 0,1$  м от проводника с током.

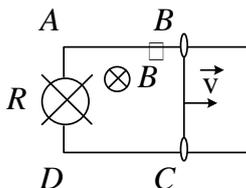
Ответ: 2,38 мкА.



8. В плоскости квадратной рамки KLMN с омическим сопротивлением  $R = 7$  Ом и стороной  $b$  на расстоянии  $r_0 = 20$  см от рамки расположена прямая проводник с током  $I = \alpha t^3$ . Сила тока в проводнике изменяется по закону  $I = \alpha t^3$ . Проводник параллелен одной из сторон рамки. Найдите ЭДС, индуцируемую в контуре в тот момент, когда перемычка находится на расстоянии  $b = 0,1$  м от проводника с током.

9. Рамка (см. задачу 8) удаляется от бесконечного прямого проводника со скоростью  $v = 10$  м/с в направлении, перпендикулярном проводнику и параллельном плоскости рамки. По проводнику течет постоянный ток  $I = 10$  А. Определите ЭДС индукции в рамке через  $t = 0,01$  с от начала движения, если в начальный момент времени рамка находилась на расстоянии  $r_0 = 20$  см от проводника.

Ответ: 5,3 мкВ.



10. Плоскость прямоугольной проволочной рамки ABCD перпендикулярна однородному магнитному полю с индукцией  $B = 0,001$  Тл. Одна сторона рамки BC подвижна и скользит без нарушения контакта с постоянной скоростью  $v = 10$  см/с по сторонам AB и CD. Между точками A и D включена лампа сопротивлением 5 Ом. Какую силу необходимо приложить к стороне BC для осуществления такого движения, если  $l = 10$  см?

Ответ:  $2 \cdot 10^{-10}$  Н.

11. В однородном магнитном поле с индукцией 0,35 Тл равномерно с частотой  $n = 480$  об/мин вращается рамка, содержащая  $N = 1500$  витков площадью  $S = 50$  см<sup>2</sup>. Ось вращения

лежит в плоскости рамки и перпендикулярна линиям индукции. Определить максимальную ЭДС индукции, возникающую в рамке.

Ответ:  $\varepsilon_{\max} = 2\pi n N B S = 132 \text{ В}$ .

12. Рамка из провода сопротивлением  $0,01 \text{ Ом}$  равномерно вращается в однородном магнитном поле с индукцией  $0,05 \text{ Тл}$ . Ось вращения лежит в плоскости рамки и перпендикулярна линиям индукции. Площадь рамки  $100 \text{ см}^2$ . Какое количество электричества протекает через рамку за время поворота ее на угол  $30^\circ$  в следующих трех случаях: 1) от  $0$  до  $30^\circ$ ; 2) от  $30$  до  $60^\circ$ ; 3) от  $60$  до  $90^\circ$ ?

Ответ:  $q = \frac{\Delta\Phi}{r}$ ;  $q_1 = BS(1 - \cos\alpha_1)/r = 6,7 \cdot 10^{-3} \text{ Кл}$ ;  $q_2 = BS(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2)/r$ ;  $q_3 = BS(\cos\alpha_2 - \cos\alpha_3)/r$ .

13. В однородном магнитном поле с индукцией  $B = 0,1 \text{ Тл}$  равномерно вращается рамка, содержащая  $N = 1000$  витков, с частотой  $\nu = 16 \text{ с}^{-1}$ . Площадь рамки равна  $150 \text{ см}^2$ . Определите значение ЭДС, возникающей в рамке в момент времени, когда угол между вектором  $\vec{B}$  и плоскостью рамки равен  $30^\circ$ . Ось вращения лежит в плоскости рамки перпендикулярно вектору  $\vec{B}$ .

Ответ:  $75,4 \text{ В}$ .

14. Соленоид содержит  $1000$  витков. Сечение сердечника равно  $10 \text{ см}^2$ . По обмотке течет ток, создающий поле с индукцией  $B = 1,5 \text{ Тл}$ . Найти среднее значение ЭДС, которая возникает в соленоиде, если ток уменьшится до нуля за время, равное  $5 \cdot 10^{-4} \text{ с}$ .

Ответ:  $\varepsilon = NBS/t = 3 \cdot 10^3 \text{ В}$ .

15. Соленоид сечением  $5 \text{ см}^2$  содержит  $1200$  витков. Индукция магнитного поля внутри соленоида при токе, равном  $2 \text{ А}$ , составляет  $0,01 \text{ Тл}$ . Определить индуктивность соленоида.

Ответ:  $L = BSN/I = 3 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$ .

16. В середине длинного соленоида находится коаксиальное ему кольцо. Радиус соленоида  $r_1 = 0,1 \text{ м}$ , радиус кольца  $r_2 = 0,05 \text{ м}$ , электрическое сопротивление кольца  $R = 25 \text{ мОм}$ . Найдите силу индукционного тока в кольце, если индукция магнитного поля соленоида начинает меняться во времени по закону  $B = 3,18 \cdot t \text{ мТл}$ . Индуктивностью кольца можно пренебречь.

Ответ:  $1 \text{ мА}$ .

17. Идеальная цепь состоит из источника постоянного тока с ЭДС  $\varepsilon = 1,5 \text{ В}$  и катушки индуктивностью  $L = 0,1 \text{ Гн}$ . Полное сопротивление цепи равно нулю. Какая будет сила тока в цепи спустя  $1 \text{ с}$  после замыкания ключа К?

Ответ:  $0,15 \text{ А}$ .

18. Катушку индуктивностью  $L = 0,3 \text{ Гн}$  и сопротивлением  $R_1 = 0,3 \text{ Ом}$  в некоторый момент времени подключают к источнику, ЭДС которого  $\varepsilon = 12 \text{ В}$ , через резистор сопротивлением  $R_2 = 2,72 \text{ Ом}$ . Определите напряжение на сопротивлении  $R_2$  через  $0,1 \text{ с}$ .

Ответ:  $3,9 \text{ В}$ .

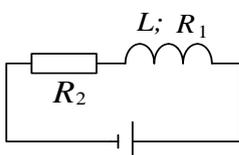
19. Две катушки расположены на небольшом расстоянии одна от другой. Когда сила тока в первой катушке изменяется с быстротой  $\Delta I / \Delta t = 5 \text{ А/с}$ , во второй катушке возникает ЭДС индукции  $\varepsilon_{\text{инд}} = 0,1$

В. Определить коэффициент  $L_{12}$  взаимной индукции катушек.

Ответ:  $L_{12} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ Гн}$ .

20. Источник тока замкнули на катушку с сопротивлением  $10 \text{ Ом}$  и индуктивностью  $1 \text{ Гн}$ . Через какое время сила тока замыкания достигнет  $0,9$  предельного значения?

Ответ:  $t = 0,23 \text{ с}$ .



21. Цепь состоит из катушки индуктивностью 1 Гн и сопротивлением 10 Ом. Источник тока можно отключить, не разрывая цепи. Определить время, по истечении которого сила тока уменьшится до 0,001 первоначального значения.

Ответ:  $t = 0,69$  с.

22. К источнику тока с внутренним сопротивлением 2 Ом была подключена катушка, индуктивность которой 0,5 Гн, а сопротивление 8 Ом. Найти время, в течение которого ток в катушке, нарастая, достигнет значения, отличающегося от максимального на 1%.

Ответ:  $t = (L \ln I_0 / \Delta I) / (R_1 + R_2) = 0,23$  с.

23. Соленоид содержит 1000 витков. Сила тока в обмотке соленоида 1 А, магнитный поток  $\Phi = 0,01$  Вб. Вычислить энергию магнитного поля.

Ответ:  $W = NI\Phi / 2 = 0,5$  Дж.

24. На железное кольцо намотано в один слой 200 витков. Чему равна энергия магнитного поля, если при токе 2,5 А магнитный поток в железе  $\Phi = 5 \cdot 10^{-3}$  Вб?

Ответ:  $W = 0,15$  Дж.

25. По обмотке тороида течет ток 0,6 А. Витки провода диаметром 0,4 мм плотно прилегают друг к другу (толщиной изоляции пренебречь). Найти энергию магнитного поля в стальном сердечнике тороида, если площадь сечения его равна 4 см<sup>2</sup>, диаметр средней линии  $D = 30$  см (явление гистерезиса не учитывать).

Ответ:  $W = 3,24$  Дж.

26. Индукция магнитного поля тороида со стальным сердечником возросла от  $B_1 = 0,5$  Тл до  $B_2 = 1$  Тл. Найти, во сколько раз изменилась объемная плотность энергии магнитного поля.

$$\frac{B_2 H_2}{B_1 H_1} = 6,4$$

Ответ:  $\frac{B_2 H_2}{B_1 H_1}$ .

27. При некоторой силе тока плотность энергии магнитного поля соленоида (без сердечника) равна 0,2 Дж/м<sup>3</sup>. Во сколько раз увеличится плотность энергии поля при той же силе тока, если соленоид будет иметь железный сердечник?

Ответ:  $1,6 \cdot 10^3$ .

28. Обмотка тороида с немагнитным сердечником имеет 10 витков на каждый сантиметр длины. Чему равна плотность энергии поля при силе тока 16 А?

Ответ:  $w = 161$  Дж/м<sup>3</sup>.

### Вопросы к семинарским занятиям:

1. Электрический заряд и его свойства. Закон Кулона.
2. Напряженность электрического поля и ее вычисление для простейших случаев.
3. Принцип суперпозиции.
4. Поток вектора напряженности. Теорема Остроградского-Гаусса.
5. Теорема Остроградского-Гаусса и ее применение для расчета поля заряженной плоскости и двух параллельных плоскостей.
6. Теорема Остроградского-Гаусса и ее применение для расчетов поля заряженной нити и цилиндра.
7. Теорема Остроградского-Гаусса и ее применение для расчетов поля сплошного заряженного шара.
8. Работа электрического поля по перемещению заряда. Потенциал электростатического поля.
9. Потенциал и потенциальная энергия. Эквипотенциальная поверхность. Связь напряженности и потенциала.
10. Электрический диполь. Поле диполя. Диполь в однородном и неоднородном электрическом поле.

11. Понятие о свободных и связанных зарядах. Поляризация диэлектриков. Вектор поляризации и вектор электрической индукции.
12. Проводники в электрическом поле. Эквипотенциальность проводника. Электрическое поле заряженного проводника.
13. Емкость. Конденсаторы. Расчет емкости плоского и сферического конденсаторов.
14. Расчет емкости цилиндрического конденсатора. Соединение конденсаторов.
15. Энергия системы неподвижных зарядов заряженного проводника и конденсаторов.
16. Энергия и плотность энергии электростатического поля.
17. Электрический ток. Условия существования электрического постоянного тока. ЭДС. Закон Ома.
18. Правило Кирхгофа для расчета разветвленных электрических цепей. Мост Уитстона.
19. Работа и мощность постоянного тока. Закон Джоуля-Ленца.
20. Природа электрического тока в металлах. Опыты Мандельштама-Папалекси и Стюарта-Голмена.
21. Основы классической электронной теории проводимости металлов. Закон Ома и Джоуля-Ленца в дифференциальной форме. Трудности классической электронной теории.
22. Собственная и примесная проводимость полупроводников. Зависимость сопротивления полупроводника от температуры и освещенности.
23. Особенности p-n перехода. Полупроводниковый диод. Применение полупроводников.
24. Природа электрического тока в жидкостях. Закон Ома для электролитов. Закон Фарадея. Применение электролиза.
25. Ионизация и рекомбинация молекул. Несамостоятельный и самостоятельный газовый разряд. Вольтамперная характеристика газового разряда.
26. Виды и особенности протекания газовых разрядов (тлеющий, искровой, дуговой, коронный).
27. Магнитное взаимодействие и магнитное поле. Силовые характеристики магнитного поля  $B$  и  $H$ .
28. Закон Био-Савара-Лапласа и его применение к расчету магнитного поля прямого тока.
29. Закон Био-Савара-Лапласа и его применение к расчету магнитного поля кругового тока соленоида.
30. Закон Ампера. Контур с током в магнитном поле. Магнитный момент контура.
31. Магнитное поле движущейся заряженной частицы. Действие магнитного поля на движущийся заряд. Сила Лоренца.
32. Магнитные поля системы токов.
33. Магнитный момент атома. Магнетики. Вектор намагниченности и вектор напряженности. Магнитная восприимчивость и проницаемость.
34. Электрическое и магнитное поле в веществе и их свойства.
35. Диа-, пара- и ферромагнетики. Домены. Точка Кюри. Ферромагнитные материалы.
36. Опыты Фарадея, закон электромагнитной индукции. Правило Ленца.
37. Явление самоиндукции. Индуктивность. Экстратоки замыкания и размыкания.
38. Энергия и плотность энергии магнитного поля.
39. Вихревое электрическое поле. Ток смещения, плотность тока смещения.
40. Циркуляция вектора напряженности магнитного поля. Закон полного тока и его применение к расчету магнитных полей.
41. Система уравнений электромагнитного поля (Уравнения Максвелла)
42. Принцип получения переменного тока. Действующее значение переменного

тока.

43. Активное сопротивление индуктивность и емкость в цепи переменного тока.
44. Метод векторных диаграмм. Закон Ома для цепи переменного тока.
45. Работа и мощность переменного тока.  $\cos \varphi$  и способы его повышения.

Трансформаторы.

#### **Лабораторные работы по разделу Электричество и магнетизм**

1. Сборка электрической цепи и измерение силы тока на ее различных участках;
2. Измерение напряжения на различных участках электрической цепи;
3. Наблюдение химического действия электрического тока;
4. Исследование зависимости силы тока на участке цепи от напряжения;
5. Измерение сопротивления проводника;
6. Изучение электродвигателя постоянного тока;
7. Измерение удельного сопротивления проводника;
8. Изучение последовательного соединения проводников;
9. Изучение параллельного соединения проводников;
10. Определение заряда электрона;
11. Наблюдение действия магнитного поля на ток;
12. Изучение явления электромагнитной индукции.

#### **Раздел 4. Колебания и волны**

Кинематика гармонических колебаний. Энергия гармонических колебаний. Математический, пружинный и физический маятники. Сложение двух одинаково направленных гармонических колебаний. Биения. Сложение двух взаимно перпендикулярных колебаний. Фигуры Лиссажу\*. Затухающие колебания. Коэффициент затухания. Логарифмический декремент. Добротность. Вынужденные колебания. Амплитуда и фаза вынужденных колебаний. Резонанс. Волны в упругой среде. Продольные и поперечные волны. Механизм образования упругих волн. Уравнение плоской бегущей волны. Длина волны, волновое число, волновой вектор, фазовая скорость. Одномерное волновое уравнение. Упругие волны в газах, жидкостях и твердых телах. Энергия упругих волн. Объемная плотность энергии упругих волн. Вектор Умова. Стоячие волны. Эффект Доплера. Распространение волн в атмосфере\*. Электромагнитные колебания и волны. Квазистационарные токи. Колебательный контур. Свободные электромагнитные колебания в контуре без активного сопротивления. Затухающие и вынужденные колебания. Электрический резонанс. Переменный ток. Электромагнитные волны. Дифференциальные уравнения плоской электромагнитной волны и их решения. Свойства электромагнитных волн. Вектор Пойнтинга. Диаграмма направленности\*. Шкала электромагнитных волн\*.

#### **Вопросы к семинарским занятиям:**

Механические колебания.

1. Колебательное движение. Условия возникновения колебаний. Параметры колебательного движения. Гармонические колебания.
2. Колебания груза на пружине.
3. Математический маятник. Формула Гюйгенса.
4. Физический маятник. Период свободных колебаний физического маятника.
5. Превращение энергии в гармонических колебаниях.
6. Сложение гармонических колебаний, происходящих по одной прямой и по двум взаимно-перпендикулярным направлениям. Фигуры Лиссажу.
7. Затухающие механические колебания. Уравнение для затухающих колебаний и его решение.

8. Характеристики затухающих колебаний: коэффициент затухания, время релаксации, логарифмический декремент затухания, добротность.
9. Вынужденные механические колебания. Резонанс.
10. Автоколебания. Примеры автоколебательных систем.

Электрические колебания. Переменный ток.

1. Электрические колебания. Колебательный контур. Формула Томсона.
2. Переменный электрический ток. Рамка, вращающаяся в магнитном поле. Генератор переменного тока.
3. Трансформаторы.
4. Электрические машины постоянного тока.
5. Резистор в цепи переменного тока. Действующее значение ЭДС, напряжения и силы тока.
6. Конденсатор в цепи переменного тока.
7. Катушка индуктивности в цепи переменного тока.
8. Вынужденные колебания в цепи переменного тока. Резонанс напряжений и токов.
9. Закон Ома для цепи переменного тока.
10. Мощность, выделяющаяся в цепи переменного тока.

Волны.

1. Механические волны. Виды волн и их характеристики.
  2. Уравнение бегущей волны. Плоские и сферические волны.
  3. Интерференция волн. Условия минимума и максимума интерференции.
  4. Дифракция волн.
  5. Принцип Гюйгенса. Законы отражения и преломления механических волн.
  6. Стоячая волна. Уравнение стоячей волны. Возникновение стоячей волны.
- Собственные частоты колебаний.
7. Звуковые волны. Скорость звука.
  8. Движение тел со скоростью большей скорости звука.
  9. Эффект Доплера в акустике.
  10. Электромагнитные волны. Предсказание и открытие электромагнитных волн.
- Физический смысл уравнений Максвелла. опыты Герца. Свойства электромагнитных волн. Шкала электромагнитных волн.
11. Излучение электромагнитных волн. Перенос энергии электромагнитной волной. Вектор Умова-Пойнтинга.

#### **Лабораторные работы по разделу Колебания и волны**

1. Исследование зависимости периода колебаний маятника от длины подвеса
2. Измерение ускорения свободного падения с помощью маятника

#### **Раздел 5. Оптика. Квантовая природа излучения**

Законы геометрической оптики. Полное отражение. Линзы. Аберрации оптических систем. Основные фотометрические величины и их единицы\*.

Корпускулярно-волновой дуализм свойств света. Волны оптического диапазона.

Интерференция плоских монохроматических световых волн. Когерентность. Время и длина когерентности. Методы получения когерентных световых волн и наблюдения интерференции. Интерференция света в тонких пленках. Кольца Ньютона. Практические применения интерференции\*.

Дифракция света. Принцип Гюйгенса. Принцип Гюйгенса-Френеля. Дифракция Френеля. Дифракция на круглом отверстии и диске. Дифракция Фраунгофера. Дифракция на щели. Дифракционная решетка. Дифракционная решетка как спектральный прибор. Разрешающая способность спектральных приборов. Дифракция рентгеновских лучей. Формула Вульфа-Брэгга. Изучение структуры кристаллов. Принцип голографии.

Голограммы Френеля и Денисюка\*. Применения голографии\*. Взаимодействие электромагнитных волн с веществом Дисперсия света. Нормальная и аномальная дисперсии. Классическая теория дисперсии. Поглощение света. Рассеяние света.

Естественный и поляризованный свет. Поляризация света при отражении. Закон Брюстера. Двойное лучепреломление. Закон Малюса. Дихроизм. Интерференция поляризованных лучей. Электрические и магнитооптические явления.

### Вопросы к семинарским занятиям:

1. Основные понятия геометрической оптики. Принцип Ферма. Прямолинейное распространение света. Закон отражения света. Зеркальное и диффузное отражения. Плоское зеркало.

2. Сферическое зеркало. Формула сферического зеркала. Построение изображений. Увеличения сферического зеркала.

3. Преломление света на плоской поверхности. Законы преломления. Абсолютный и относительный показатели преломления. Полное отражение света. Предельный угол.

4. Прохождение света через плоскопараллельную пластинку и через трехгранную призму.

5. Преломление света на сферической поверхности. Линзы собирающие и рассеивающие. Формула тонкой линзы. Оптическая сила линзы. Получение изображения с помощью линз. Линейное увеличение.

6. Фотометрия. Лоток энергии излучения. Телесный угол. Световой лоток. Сила света. Единицы силы света и светового потока. Освещенность. Яркость, Законы освещенности.

7. Оптические приборы. Глаз как оптическая система. Угол зрения, расстояние наилучшего зрения. Оптические дефекты глаза. Лупа. Микроскоп. Увеличение оптического прибора. Телескопы. Труба Кеплера. Труба Галилея.

Волновая оптика.

1. Интерференция света. Опыт Юнга. Условия существования интерференции. Принцип Гюйгенса-Френеля.

2. Способы разделения света на когерентные пучки в бисеркале Френеля, бипризме Френеля, билинзе Бийе. Интерференция в тонких пленках. Кольца Ньютона, Применение явления интерференции света.

3. Дифракция света. Метод зон Френеля. Дифракция Френеля от круглого отверстия и от круглого диска.

4. Дифракция Фраунгофера. Дифракционная решетка и дифракционный спектр.

5. Дисперсия света. Цвет. Поляризация света. Поперечность световых волн. Законы Малюса и Брюстера.

### Задачи для самостоятельного решения

#### 1. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

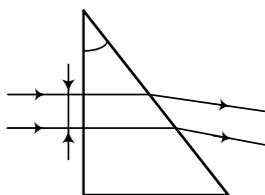


Рис. 4

1. Два параллельных световых пучка, отстоящих друг от друга на расстоянии  $d = 5$  см, падают на кварцевую призму ( $n = 1,49$ ) с преломляющим углом  $\alpha = 25^\circ$  (рис.4). Определите оптическую разность хода этих пучков на выходе их из призмы.

Ответ: 3,47 см.

2. В опыте Юнга расстояние от щелей до экрана равно  $l = 3$  м. Определите угловое расстояние между соседними светлыми

полосами, если третья светлая полоса на экране отстоит от центра интерференционной картины на расстоянии 4,5 мм.

Ответ:  $5 \cdot 10^{-4}$  рад.

3. Если в опыте Юнга на пути одного из интерферирующих лучей поместить перпендикулярно этому лучу тонкую стеклянную пластинку ( $n = 1,5$ ), то центральная светлая полоса смещается в положение, первоначально занимаемое пятой светлой полосой. Длина волны  $\lambda = 0,5$  мкм. Определите толщину пластинки.

Ответ: 5 мкм.

4. В опыте Юнга на пути одного из интерферирующих лучей помещалась стеклянная пластинка ( $n = 1,5$ ) толщиной 10 мкм. На какое расстояние и в какую сторону смещаются при этом интерференционные полосы на экране, если расстояние между щелями 2,5 мм, а их расстояние до экрана 100 см?

Ответ: 2 мм.

5. Лучи от двух когерентных источников ( $\lambda = 0,68$  мкм) падают на экран. На экране наблюдается интерференционная картина. Когда на пути одного из лучей перпендикулярно ему поместили мыльную пленку ( $n = 1,33$ ), интерференционная картина изменилась на противоположную. При какой наименьшей толщине пленки это возможно?

Ответ: 1,03 мкм.

6. В опыте Юнга расстояние  $d$  между щелями равно 0,5 мм. На каком расстоянии  $l$  от щелей следует расположить экран, чтобы ширина  $\Delta x$  интерференционной полосы оказалась равной 2 мм?

Ответ:  $l = d\Delta x/\lambda = 2,5$  м.

7. Плоская монохроматическая волна падает нормально на диафрагму с двумя узкими щелями, отстоящими друг от друга на расстоянии  $d = 0,25$  см. На экране, расположенном на расстоянии  $l = 1$  м, наблюдается система интерференционных полос. На какое расстояние и в какую сторону сместятся полосы, если одну из щелей перекрыть стеклянной пластиной толщиной  $h = 1 \cdot 10^{-2}$  мм?

Ответ: В сторону перекрытой щели на расстояние 2 мм.

8. Расстояния от бипризмы Френеля до узкой щели и экрана соответственно равны  $a = 30$  см и  $b = 1,5$  м. Бипризма стеклянная ( $n = 1,5$ ) с преломляющим углом  $\alpha = 20^\circ$ . Определите длину волны света, если ширина интерференционных полос  $\Delta x = 0,65$  мм.

Ответ: 0,63 мкм.

9. На пленку с показателем преломления  $n = 1,4$  под некоторым углом падает белый свет. Толщина пленки  $b = 2,8 \cdot 10^{-1}$  мм. При каком наименьшем угле падения пленка будет казаться красной в проходящем свете?

Ответ:  $\alpha = 46^\circ$ .

10. На линзу с показателем преломления  $n = 1,58$  нормально падает монохроматический свет с длиной волны  $\lambda = 0,55$  мкм. Для устранения потерь света в результате отражения на линзу наносится тонкая пленка. Определите: 1) оптимальный коэффициент преломления для пленки; 2) толщину пленки.

Ответ: 1) 1,26; 2) 109 нм.

11. На стеклянный клин ( $n = 1,5$ ) нормально падает монохроматический свет ( $\lambda = 698$  нм). Определите угол между поверхностями клина, если расстояние между двумя соседними интерференционными минимумами в отраженном свете равно 2 мм.

Ответ:  $24''$ .

12. Монохроматический свет падает нормально на поверхность воздушного клина, причем расстояние между интерференционными полосами  $\Delta x_1 = 0,4$  мм. Определите расстояние  $\Delta x_2$  между интерференционными полосами, если пространство между пластинками, образующими клин, заполнить прозрачной жидкостью с показателем преломления  $n = 1,33$ .

Ответ: 0,3 мм.

13. Плоская волна монохроматического света падает нормально на тонкую пленку масла постоянной толщины, покрывающую стеклянную пластинку. Длина волны источника может меняться непрерывно. Полное отсутствие отраженного света наблюдается только на волнах 500 и 700 нм. Какова толщина масляной пленки, если показатель преломления масла 1,3, а стекла 1,5?

Ответ:  $d = 670$  нм

14. Белый свет, падающий на мыльную пленку нормально ( $n = 1,33$ ) и отраженный от нее, дает в видимом спектре интерференционный максимум на волне длиной 630 нм и соседний минимум на волне 450 нм. Какова толщина пленки, если считать ее постоянной?

Ответ: 296 нм.

15. На плоской стеклянной поверхности образована тонкая прозрачная пленка толщиной  $d = 0,396$  мкм. Какую окраску примет пленка при освещении ее белым светом, падающим под углом  $\theta = 30^\circ$ ? Показатель преломления стекла  $n_1 = 1,753$ , пленки  $n_2 = 1,324$ . При какой толщине пленки она будет просветляющей для зеленых лучей ( $\lambda = 530$  нм) при нормальном падении?

Ответ: 485 нм, 0,3 мкм.

16. На поверхность стеклянного объектива нанесена тонкая пленка с показателем преломления  $n_2 = 1,2$  ("просветляющая" пленка). Какова наименьшая  $d$  толщина этой пленки, при которой произойдет максимальное ослабление отраженного света в средней части видимого спектра (зеленый свет  $\lambda = 550$  нм)?

Ответ:  $d = 1,5 \cdot 10^{-4}$  мм.

17. Между двумя стеклянными пластинками протянут волос так, что образовался воздушный клин. Диаметр волоса  $d = 0,05$  мм. При нормальном падении на пластинку лучи с длиной волны  $\lambda = 500$  нм дают в отраженном свете 8 интерференционных полос на 1 см длины пластинки. Определить расстояние от волоса до вершины клина.

Ответ: 0,286 м.

18. Две пластинки из стекла образуют воздушный клин с углом  $\varphi_1 = 20^\circ$ . Свет падает нормально ( $\lambda_1 = 500$  нм). Во сколько раз нужно увеличить угол клина, чтобы число темных интерференционных полос на единицу длины увеличилось в 1,3 раза? При какой длине волны падающего света число полос станет прежним? Наблюдение проводится в отраженном свете.

Ответ:  $\varphi_2/\varphi_1 = 1,3$ ;  $\lambda_2 = 1,3 \lambda_1 = 650$  нм.

19. Мыльная пленка, расположенная вертикально, образует клин вследствие стекания жидкости. При наблюдении интерференционных полос в отраженном свете ( $\lambda = 546$  нм) оказалось, что расстояние между пятью полосами  $l = 20$  мм. Угол клина  $\varphi = 11''$ . Найти показатель преломления мыльной воды. Свет падает нормально.

Ответ:  $n = 1,33$ .

20. На установку для получения колец Ньютона падает нормально монохроматический свет ( $\lambda = 500$  нм). Определить толщину воздушного слоя там, где наблюдается пятое светлое кольцо в отраженном свете.

Ответ:  $d = 1,375$  мкм.

21. Между плосковыпуклой линзой и стеклянной пластиной, на которой она лежит, нет контакта вследствие попадания пыли. При этом радиус пятого темного кольца Ньютона  $r = 0,08$  см. Если пыль удалить, то радиус этого кольца станет  $r' = 0,1$  см. Найти толщину слоя пыли, если радиус кривизны линзы  $R = 10$  см. (Ответ:  $d = r'^2 - r^2 / 2R = 1,8 \cdot 10^{-4}$  см.)

22. Плосковыпуклая стеклянная линза с радиусом кривизны  $R = 12,5$  см прижата к стеклянной пластине. Диаметры десятого и пятнадцатого темных колец Ньютона в отраженном свете равны  $d_1 = 1$  мм,  $d_2 = 1,5$  мм. Определить длину волны света.

Ответ:  $\lambda = (d_2^2 - d_1^2) / 4R(k_2 - k_1) = 0,5$  мкм.

23. Расстояние между пятым  $k_1=5$  и двадцатым  $k_2=20$  светлыми кольцами Ньютона  $l = 8$  мм. Радиус кривизны линзы  $R = 20$  м. Найти длину волны монохроматического света, падающего на установку, если наблюдение проводилось в отраженном свете.

Ответ:  $\lambda = \frac{l^2}{R(k_1 + k_2 - l - \sqrt{(2k_1 - l)(2k_2 - l)})} = 6,04 \cdot 10^{-7}$  м.

24. Диаметры  $d_1$  и  $d_2$  двух светлых колец Ньютона соответственно равны 2,24 и 3,6 мм. Известно, что между двумя измеренными кольцами расположены три светлых кольца. Кольца наблюдались в отраженном свете. Длина волны  $\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$  м. Найти номера колец и радиус кривизны плосковыпуклой линзы.

Ответ:  $i = 3, k = 7, R = \frac{r_k^2 - r_i^2}{4\lambda} = 1$  м.

25. Между стеклянной пластинкой и лежащей на ней плосковыпуклой стеклянной линзой налита жидкость, показатель преломления которой меньше показателя преломления стекла. Радиус восьмого темного кольца в схеме на отражение  $r_8 = 2 \cdot 10^{-3}$  м. Длина волны  $\lambda = 7 \cdot 10^{-7}$  м. Радиус кривизны линзы  $R = 1$  м. Определить показатель преломления жидкости. Как изменится радиус восьмого кольца, если жидкость удалить из зазора?

Ответ:  $n = 1,4; r'_8 = 2,36 \cdot 10^{-3}$  м.

## 2. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

1. Между точечным источником света ( $\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$  м) и экраном поместили диафрагму с круглым отверстием радиусом  $r = 1$  мм. Расстояния от источника до диафрагмы и от диафрагмы до экрана равны соответственно:  $a = 1$  м и  $b = 2$  м. Как изменится интенсивность света в точке, лежащей против центра отверстия, если диафрагму убрать?

Ответ: уменьшится в 4 раза.

2. Радиус четвертой зоны Френеля для плоского волнового фронта  $r_4 = 3$  мм. Определить радиус шестой зоны Френеля,

Ответ:  $r_6 = 3,69$  мм.

3. Между точечным источником света и экраном поместили диафрагму с круглым отверстием, радиус которого  $r$  можно менять. Расстояния от диафрагмы до источника и экрана равны:  $a = 1$  м и  $b = 1,25$  м. Определить длину волны света, если максимум интенсивности в центре дифракционной картины на экране наблюдается при  $r_1 = 1$  мм, а следующий максимум при  $r_2 = 1,29$  м.

Ответ:  $\lambda = \frac{(r_2^2 - r_1^2)(a + b)}{2ab} = 0,6$  мкм.

4. Дифракция наблюдается на расстоянии  $l$  от точечного источника монохроматического света ( $\lambda = 0,5$  мкм). Посередине между источником света и экраном находится непрозрачный диск диаметром 5 мм. Определите расстояние  $l$ , если диск закрывает только центральную зону Френеля.

Ответ: 50 м.

5. На диафрагму с круглым отверстием падает нормально параллельный пучок монохроматического света ( $\lambda = 6 \cdot 10^{-7}$  м). На экране наблюдается дифракционная картина. При каком наибольшем расстоянии между диафрагмой и экраном в центре дифракционной картины еще будет наблюдаться темное пятно? Диаметр отверстия равен 1,96 мм.

Ответ:  $b = 0,8$  м.

6. Плоская монохроматическая волна падает нормально на круглое отверстие. На расстоянии  $b=9$  м от него находится экран, где наблюдают некоторую дифракционную картину. Диаметр отверстия уменьшили в  $k=3$  раза. Найти новое расстояние  $b'$ , на котором надо поместить экран, чтобы получить на нем дифракционную картину, подобную той, что в предыдущем случае, но уменьшенную в  $k$  раз.

Ответ:  $b' = b/k^2 = 1$  м.

7. На узкую щель падает нормально монохроматический свет. Угол отклонения пучков света, соответствующих второй светлой дифракционной полосе, равен  $1^\circ$ . Скольким длинам волн падающего света равна ширина щели?

Ответ: 143.

8. На щель шириной  $2 \cdot 10^{-6}$  м падает нормально параллельный пучок монохроматического света с длиной волны  $\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$  м. Найти ширину изображений щели на экране, удаленном от щели на  $L=1$  м. Шириной изображения считать расстояние между первыми дифракционными минимумами, расположенными по обе стороны от главного максимума освещенности.

Ответ: 0,05 м.

9. На щель шириной  $a = 0,1$  мм падает нормально монохроматический свет с длиной волны  $\lambda = 0,5$  мкм. Дифракционная картина наблюдается на экране, расположенном параллельно щели. Определите расстояние  $L$  от щели до экрана, если ширина центрального дифракционного максимума  $b = 1$  см.

Ответ:  $L = 1$  м.

10. Чему равна постоянная дифракционной решетки, если для того, чтобы увидеть красную линию ( $\lambda = 0,7 \cdot 10^{-7}$  м) в спектре третьего порядка, зрительную трубу пришлось установить под углом  $\varphi = 48^\circ 36'$  к оси коллиматора? Какое число штрихов нанесено на 1 см длины этой решетки? Свет падает на решетку нормально.

Ответ:  $3570 \text{ см}^{-1}$ .

11. На поверхность дифракционной решетки нормально к ее поверхности падает монохроматический свет. Постоянная дифракционной решетки в  $n = 4,6$  раза больше длины световой волны. Найти общее число  $m$  дифракционных максимумов, которые теоретически можно наблюдать в данном случае.

Ответ: 9.

12. На дифракционную решетку падает нормально монохроматический свет ( $\lambda = 410$  нм). Угол  $\Delta\varphi$  между направлениями на максимумы первого и второго порядков равен  $2^\circ 21'$ . Определить число  $n$  штрихов на 1 мм дифракционной решетки.

Ответ: 100.

13. Постоянная дифракционной решетки в  $n = 4$  раза больше длины световой волны монохроматического света, нормально падающего на ее поверхность. Определить угол  $\alpha$  между двумя первыми симметричными дифракционными максимумами.

Ответ:  $30^\circ$ .

14. Определить число штрихов на 1 см дифракционной решетки, если при нормальном падении света с длиной волны  $\lambda = 6 \cdot 10^{-7}$  м решетка дает первый максимум на расстоянии  $l = 3,3$  см от центрального. Расстояние от решетки до экрана  $L = 1,1$  м.

Ответ:  $N_0 = 500 \text{ см}^{-1}$ .

15. При нормальном падении света на дифракционную решетку угол дифракции для линии  $\lambda_1 = 0,65$  мкм во втором порядке равен  $45^\circ$ . Найти угол дифракции для линии  $\lambda_2 = 0,5$  мкм в третьем порядке.

Ответ:  $55^\circ$ .

16. На дифракционную решетку нормально падает монохроматический свет. В спектре, полученном с помощью этой дифракционной решетки, некоторая спектральная линия наблюдается в первом порядке под углом  $\varphi = 11^\circ$ . Определите наивысший порядок спектра, в котором может наблюдаться эта линия.

Ответ: 5.

17. Определите длину волны монохроматического света, падающего нормально на дифракционную решетку, имеющую 300 штрихов на 1 мм, если угол между направлениями на максимумы первого и второго порядков составляет  $12^\circ$ .

Ответ: 644 нм.

18. Какое наименьшее число штрихов должна содержать решетка, чтобы в спектре первого порядка можно было разделить две желтые линии натрия с длинами волн  $\lambda_1 = 5,89 \cdot 10^{-7}$  м и  $\lambda_2 = 5,896 \cdot 10^{-7}$  м? Какова мина такой решетки, если постоянная решетки  $d = 10$  мкм?

Ответ:  $N = 982 \text{ см}^{-1}$ ;  $l = 9,8$  мм.

19. На дифракционную решетку с периодом  $d = 2$  мкм падает нормально свет с длиной волны  $\lambda = 700$  нм. За решеткой помещена собирающая линза с фокусным расстоянием  $F = 0,5$  м. В фокальной плоскости линзы расположен экран. Определить линейную дисперсию такой системы для максимума третьего порядка.

Ответ:  $D = 1 \text{ мм/нм}$ .

20. Угловая дисперсия дифракционной решетки для  $\lambda = 6,68 \cdot 10^{-7}$  м в спектре первого порядка равна  $2,02 \cdot 10^5$  рад/м. Найти период дифракционной решетки.

Ответ:  $d = 5 \cdot 10^{-6}$  м.

21. На каком расстоянии  $\Delta x$  друг от друга будут находиться на экране две линии ртутной дуги ( $\lambda_1 = 577$  нм и  $\lambda_2 = 579$  нм) в спектре первого порядка, полученные при помощи дифракционной решетки с периодом  $2 \cdot 10^{-6}$  м? Фокусное расстояние линзы, проектирующей спектр на экран, равно 0,6 м.

Ответ:  $\Delta x = 0,65$  мм.

22. Определите длину волны, для которой дифракционная решетка с постоянной  $d = 3$  мкм в спектре второго порядка имеет угловую дисперсию  $D = 7 \cdot 10^5$  рад/м.

Ответ: 457 нм.

23. На дифракционную решетку нормально падает монохроматический свет с длиной волны  $\lambda = 0,6$  мкм. Угол дифракции для пятого максимума равен  $30^\circ$ , а минимальная

разрешаемая решеткой разность длин волн составляет  $\delta\lambda = 0,2$  нм. Определите: 1) постоянную дифракционной решетки; 2) длину дифракционной решетки.

Ответ: 1) 6 мкм; 2) 3,6 мм.

24. Сравните наибольшую разрешающую способность для красной линии кадмия ( $\lambda = 644$  нм) двух дифракционных решеток одинаковой длины ( $l = 5$  мм), но разных периодов ( $d_1 = 4$  мкм,  $d_2 = 8$  мкм).

Ответ:  $R_{1\max} = R_{2\max} = 7500$ .

25. Определите постоянную дифракционной решетки, если она в первом порядке разрешает две спектральные линии калия ( $\lambda_1 = 578$  нм и  $\lambda_2 = 580$  нм). Длина решетки  $l = 1$  см.

Ответ: 34,6 мкм.

### 3. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

1. Угол  $\varphi$  между плоскостями пропускания поляризатора и анализатора равен  $30^\circ$ . Во сколько раз уменьшится интенсивность света, выходящего из анализатора, если угол увеличить до  $60^\circ$ ?

Ответ: в 3 раза

2. Определите, во сколько раз уменьшится интенсивность естественного света, прошедшего через два николя, главные плоскости которых образуют угол в  $60^\circ$ , если каждый из николей как поглощает, так и отражает 5% падающего на них света.

Ответ: в 9,88 раза.

3. Естественный свет проходит через поляризатор и анализатор. Поляризатор поглощает и отражает 12% падающего на него света, анализатор - 10%. Оказалось, что интенсивность луча, вышедшего из анализатора, в 10 раз меньше интенсивности естественного света. Найти угол между плоскостями пропускания поляризатора и анализатора.

Ответ:  $\varphi = 59^\circ 50'$ .

4. Угол  $\alpha$  между плоскостями пропускания поляризаторов равен  $50^\circ$ . Естественный свет, проходя через такую систему, ослабляется в  $n = 8$  раз. Пренебрегая потерей света при отражении, определить коэффициент поглощения  $k$  света в поляризаторах.

5. При падении естественного света на некоторый поляризатор через него проходит  $\eta_1 = 30\%$  светового потока, а через два таких поляризатора  $\eta_2 = 13,5\%$ . Найти угол между плоскостями пропускания этих поляризаторов.

Ответ:  $64^\circ$ .

6. Во сколько раз уменьшится интенсивность естественного света, прошедшего через три Николя, если угол между плоскостями поляризации 1-го и 2-го Николей составляет  $30^\circ$ , а угол между плоскостями поляризации 2-го и 3-го -  $60^\circ$ ? Потерей света в Николях пренебречь. Изменится ли интенсивность выходящего пучка, если 2-й и 3-й Николи поменять местами?

Ответ: 10,67.

7. Естественный свет интенсивностью  $I_0$  проходит через поляризатор и анализатор, угол между главными плоскостями которых составляет  $\alpha$ . После прохождения света через эту систему он падает на зеркало и, отразившись, проходит вновь через нее. Пренебрегая поглощением света, определите интенсивность  $I$  света после его обратного прохождения.

Ответ:  $I = \frac{1}{2} I_0 \cos^4 \alpha$ .

8. Пучок естественного света падает на систему из 4 поляризаторов, плоскость пропускания каждого из которых повернута на угол  $\varphi = 30^\circ$  относительно плоскости пропускания предыдущего поляризатора. Какая часть светового потока проходит через эту систему?

Ответ:  $\eta = 0,22$ .

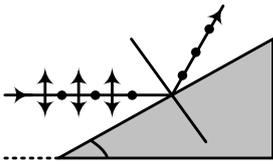


Рис. 10

9. Пучок естественного света падает (рис.10) на стеклянную призму с углом  $\alpha = 30^\circ$ . Определите показатель преломления стекла, если отраженный луч является плоскополяризованным

Ответ: 1,73.

10. На стеклянную пластинку ( $n = 1,54$ ) падает естественный свет. Отраженный луч максимально поляризован. Определить угол между падающим и отраженным лучами.

Ответ:  $114^\circ$ .

11. Предельный угол полного отражения для пучка света на границе кристалла каменной соли с воздухом равен  $40,5^\circ$ . Определите угол Брюстера при падении света из воздуха на поверхность этого кристалла.

Ответ:  $57^\circ$ .

12. Естественный луч света падает на полированную поверхность стеклянной пластины, погруженной в жидкость. Отраженный от пластины луч составляет угол  $\varphi = 97^\circ$  с падающим лучем. Определить показатель преломления жидкости, если отраженный луч полностью поляризован.

Ответ:  $n_2 = 1,33$ .

13. Предельный угол полного внутреннего отражения некоторого вещества равен  $45^\circ$ . Чему равен для этого вещества угол полной поляризации?

Ответ:  $\varphi = 54,7^\circ$ .

14. Чему равен показатель преломления стекла, если отраженный луч будет полностью поляризован при угле преломления  $30^\circ$ ?

Ответ:  $n = 1,73$ .

15. Угол полной поляризации при отражении света от поверхности некоторого вещества равен  $56^\circ 20'$ . Определить скорость распространения света в этом веществе, считая его изотропным.

Ответ:  $\nu = 2 \cdot 10^8$  м/с

16. Определите степень поляризации частично поляризованного света, если амплитуда светового вектора, соответствующая максимальной интенсивности света, в 3 раза больше амплитуды, соответствующей его минимальной интенсивности.

Ответ: 0,8.

17. Степень поляризации частично поляризованного света составляет 0,75. Определите отношение максимальной интенсивности света, пропускаемого анализатором, к минимальной.

Ответ:  $I_{\max}/I_{\min}=7$ .

18. Степень поляризации света равна  $P = 0,25$ . Найти отношение интенсивности поляризованной составляющей к интенсивности естественной составляющей.

Ответ:  $1/3$ .

19. На плоскопараллельную стеклянную пластину падает под углом Брюстера узкий пучок естественного света. Коэффициент отражения стекла  $\rho = 0,08$ . Определить степень поляризации света, прошедшего через пластину.

Ответ:  $0,087$ .

20. На пути частично поляризованного света, степень поляризации  $P$  которого равна  $0,6$ , поставили анализатор так, что интенсивность света, прошедшего через него, стала максимальной. Во сколько раз уменьшится интенсивность света, если плоскость пропускания анализатора повернуть на угол  $\alpha = 30^\circ$ ?

Ответ: в  $1,23$  раз.

21. На николю падает пучок частично поляризованного света. При некотором положении николя интенсивность света, прошедшего через него, стала минимальной. Когда плоскость пропускания николя повернули на угол  $\varphi = 45^\circ$ , интенсивность света возросла в  $k=1,5$  раза. Определится степень поляризации света.

Ответ:  $0,348$ .

22. Кристаллическая пластинка из исландского шпата с наименьшей толщиной  $d = 0,86$  мкм служит пластинкой в четверть волны для  $\lambda = 0,59$  мкм. Определите разность  $\Delta n$  показателей преломления обыкновенного и необыкновенного лучей.

Ответ:  $0,171$ .

23. Плоскополяризованный монохроматический пучок света падает на поляризатор и полностью им гасится. Когда на пути пучка поместили кварцевую пластину, интенсивность света после поляризатора оказалась равна половине интенсивности света, падающего на поляризатор. Определить минимальную толщину кварцевой пластинки. Постоянная вращения кварца  $\alpha = 48,9$  град/мм.

Ответ:  $d = 16$  мкм.

24. Определите толщину кварцевой пластинки, для которой угол поворота плоскости поляризации монохроматического света определенной длины волны  $\varphi = 180^\circ$ . Удельное вращение в кварце для данной длины волны  $\varphi = 0,52$  рад/мм.

Ответ:  $6,04$  мм.

25. 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  $\varphi = 10^\circ$ . Удельное вращение сахара  $\alpha = 1,17 \cdot 10^{-2}$  рад·м<sup>2</sup>/кг.

Ответ:  $74,8$  кг/м<sup>3</sup>.

26. Раствор глюкозы с массовой концентрацией  $C_1 = 0,21$  г/см<sup>3</sup>, находящийся в стеклянной трубке, поворачивает плоскость поляризации монохроматического света, проходящего через раствор, на угол  $\varphi_1 = 24^\circ$ . Определите массовую концентрацию  $C_2$  глюкозы в другом растворе в трубке такой же длины, если он поворачивает плоскость поляризации на угол  $\varphi_2 = 18^\circ$ .

Ответ:  $157$  кг/м<sup>3</sup>.

27. При прохождении света через трубку длиной  $l_1 = 20$  см, содержащую раствор сахара концентрацией  $C_1 = 10\%$ , плоскость поляризации света повернулась на угол  $\varphi_1 = 13,3^\circ$ . В другом растворе сахара, налитом в трубку длиной  $l_2 = 15$

см, плоскость поляризации повернулась на угол  
концентрацию  $C_2$  второго раствора.

$\varphi_2 = 5,2^\circ$ . Определить

### Лабораторные работы по разделу Оптика.

1. Наблюдение дисперсии света при преломлении света призмой
2. Изучение особенностей преломления световых лучей на криволинейных поверхностях. Лучевое приближение в цилиндрической геометрии позволяет проследить ход лучей в линзах, увидеть зависимость хода лучей от формы линзы, установить взаимосвязь, а также проверить формулу линзы и определить оптическую силу системы из нескольких линз.
3. Измерение фокусного расстояния и оптической силы рассеивающей линзы
4. Наблюдение поляризации, дифракции и интерференции света
5. Измерение показателя преломления воды
6. Изучение взаимосвязи линейного увеличения собирающей линзы с расстоянием до предмета и его изображения. Источник света, установленный в фокусе линзы, дает плоскопараллельный пучок. Проходя через слайд с изображением и линзу, плоскопараллельный пучок формирует на экране изображение в соответствии с формулой линзы.
7. Изучение взаимосвязи оптической силы линзы с ее формой
8. Исследование зависимости угла отражения света от угла падения.

### Раздел 6. Элементы квантовой физики атомов, молекул и твердых тел

Тепловое излучение и его характеристики. Абсолютно черное тело. Законы теплового излучения (Кирхгофа, Стефана-Больцмана, Вина). Спектральная плотность излучения абсолютно черного тела в рамках классической физики. Формула Релея-Джинса. Ультрафиолетовая катастрофа. Квантовая гипотеза Планка. Формула Планка. Вывод законов теплового излучения абсолютно черного тела из формулы Планка..

Световые кванты. Энергия, импульс и масса фотонов. Фотоэффект и его законы. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта и экспериментальные методы его проверки. Фотоэлементы. Эффект Комптона. Давление света. Опыты Лебедева\*. Аннигиляция электрон-позитронной пары.

Корпускулярно-волновой дуализм материи и его опытное обоснование. Гипотеза де Бройля. Дифракция электронов и нейтронов. Соотношение неопределенностей. Оценка энергии основного состояния атома водорода и энергии нулевых колебаний осциллятора. Задание состояния микрочастиц. Волновая функция и ее статистический смысл. Амплитуда вероятностей. Различие между квантово-механической и статистической вероятностями. Уравнение Шредингера (временное и стационарное). Частица в одномерной потенциальной яме. Туннельный эффект.

Элементы зонной теории кристаллов. Квантовая теория электропроводности и теплопроводности металлов. Электропроводность полупроводников. Электронная и дырочная проводимость. Собственные и примесные полупроводники. Понятие о p-n-переходе. Транзистор\*. Явление сверхпроводимости. Куперовские пары\*. Эффект Джозефсона и его применение\*. Высокотемпературная сверхпроводимость.

Строение кристаллов. Типы межатомной связи в твердых телах. Дефекты в кристаллах (точечные, линейные – дислокации). Пластичность и прочность твердых тел. Колебания кристаллической решетки. Фононы. Дисперсионные кривые. Теплоемкость кристаллов. Решеточная теплопроводность. Эффект Мёссбауэра и его применение\*. Физические основы методов контроля качества материалов

### Задачи для самостоятельного решения и контрольных заданий

#### I. КВАНТОВАЯ ОПТИКА

## 1.1. Тепловое излучение

1. Чему равна поглощательная и испускательная способности в состоянии теплового равновесия с излучением: а) идеальной отражающей поверхности; б) абсолютно черного тела? [а) 0, 0; б) 1, 1]

2. При переходе от температуры  $T_1$  к температуре  $T_2$  площадь под кривой  $r_{\lambda,T}^*(\lambda)$  увеличилась в  $n$  раз. Как изменилась при этом длина волны, на которую приходится максимум испускательной способности? [уменьшилась в  $n^{1/4}$  раз]

3. В излучении абсолютно черного тела максимум энергии падает на длину волны 680 нм. Сколько энергии излучает  $1 \text{ см}^2$  этого тела и какова потеря его массы за 1 с вследствие излучения? [1880 Дж;  $2,1 \cdot 10^{-14} \text{ кг}$ ]

4. Какова температура печи, если известно, что из смотрового окошка площадью  $S = 6 \text{ см}^2$  излучается за 1 с энергия  $W = 34 \text{ Дж}$ . [ $T = 1000 \text{ K}$ ]

5. Определить относительное увеличение энергетической светимости черного тела при увеличении его температуры на 1%. [4%]

6. Абсолютно черное тело имеет температуру  $T_1 = 2900 \text{ K}$ . В результате остывания тела длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости, изменилась на 9 мкм. До какой температуры  $T_2$  охладилось тело? [ $T_2 = 290 \text{ K}$ ]

7. Принимая, что Солнце излучает, как абсолютно черное тело, и температура его поверхности равна 5800 К, вычислить: а) энергию, излучаемую с  $1 \text{ м}^2$  поверхности Солнца за время  $t = 1 \text{ мин}$ ; б) массу, теряемую Солнцем вследствие лучеиспускания за время  $t = 1 \text{ с}$ . [ $W = 19,7 \cdot 10^6 \text{ Дж}$ ;  $\Delta m = 3,4 \cdot 10^{10} \text{ кг}$ ]

8. Волосок лампы накаливания, рассчитанной на напряжение 2 В, имеет длину 10 см и диаметр 0,03 мм. Полагая, что волосок излучает, как абсолютно черное тело, определите температуру нити и длину волны, на которую приходится максимум энергии в спектре излучения. Вследствие теплопроводности лампа рассеивает 8 % потребляемой мощности, удельное сопротивление материала волоска  $5,5 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ . [ $T = 2400 \text{ K}$ ;  $\lambda_{\text{max}} = 1,22 \text{ мкм}$ ]

9. Диаметр вольфрамовой спирали в электрической лампочке  $d = 0,3 \text{ мм}$ , длина спирали 5 см. При включении лампочки в сеть напряжением  $U = 127 \text{ В}$  через лампочку течет ток 0,31 А. Найти температуру спирали. Считать, что при установлении равновесия все выделяющееся в нити тепло теряется в результате излучения. Отношение энергетических светимостей вольфрама и абсолютно черного тела для данной температуры  $\epsilon = 0,31$ . [ $T = 2500 \text{ K}$ ]

10. На сколько градусов понизилась бы температура земного шара за столетие, если бы на Землю не поступала солнечная энергия? Радиус Земли принять равным  $6,4 \cdot 10^6 \text{ м}$ , удельную теплоемкость принять равной  $200 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ , плотность  $5500 \text{ кг}/\text{м}^3$ , среднюю температуру 300 К. Коэффициент поглощения 0,8. За какое время температура понизилась бы на 27 К? [ $T = 0,5 \text{ K}$ ;  $t = 84 \text{ столетия}$ ]

11. Какую мощность надо подводить к зачерненному металлическому шару радиусом 2 см, чтобы поддерживать его температуру на 27 К выше температуры окружающей среды? Температура окружающей среды  $T = 293 \text{ K}$ . Считать, что тепло теряется только вследствие излучения. [ $P = 0,2 \text{ Вт}$ ]

12. В электрической лампе вольфрамовый волосок диаметром  $d = 0,05 \text{ мм}$  накаливается при работе лампы до  $T_1 = 2700 \text{ K}$ . Через сколько времени после выключения тока температура волоска упадет до  $T_2 = 600 \text{ K}$ ? При расчете принять, что волосок излучает, как серое тело, с коэффициентом поглощения 0,3. Пренебречь всеми другими причинами потери теплоты. [0,033 с]

13. Металлический шарик диаметром  $d$  поместили в откачанный сосуд с абсолютно черными стенками, поддерживаемыми при температуре  $T = 0 \text{ K}$ . Начальная температура шарика  $T_0$ . Считая поверхность шарика абсолютно черной, найти температуру, которую будет иметь шарик спустя время  $t$ . Плотность вещества шарика  $\rho$ , удельная теплоемкость  $c$ . [ $T = T_0 \cdot \sqrt[3]{\rho c d / (\rho c d + 186 T_0^3)}$ ]

14. Муфельная печь потребляет мощность  $P=1\text{кВт}$ . Температура ее внутренней поверхности при открытом отверстии площадью  $S=25\text{ см}^2$  равна  $1200\text{ К}$ . Считая, что отверстие печи излучает как абсолютно черное тело, определите, какая часть мощности рассеивается стенками. [0,7]

15. После изменения температуры абсолютно черного тела максимум спектральной плотности энергетической светимости сместился с  $\lambda_1 = 0,8\text{ мкм}$  на  $\lambda_2 = 2,4\text{ мкм}$ . Во сколько раз изменилась максимальная спектральная плотность энергетической светимости? [243]

### 1.2. Фотоэффект

1. Какую задерживающую разность потенциалов нужно приложить к фотоэлементу, чтобы прекратить эмиссию электронов, испускаемых под действием лучей с длиной волны  $\lambda = 260\text{ нм}$  с поверхности алюминия, если работа выхода  $A = 3,74\text{ эВ}$ ? [1,0 В]

2. Красной границе фотоэффекта для никеля соответствует длина волны, равная  $248\text{ нм}$ . Найти длину световой волны, при которой величина задерживающего напряжения равна  $1,2\text{ В}$ . [200 нм]

3. Фотоны с энергией  $E = 4,9\text{ эВ}$  вырывают электроны из металла. Найти максимальный импульс, передаваемый поверхности металла при вылете каждого электрона. [ $3,45 \cdot 10^{-25}\text{ кг м/с}$ ]

4. На металл падает рентгеновские лучи с длиной волны, равной  $4\text{ пм}$ . Пренебрегая работой выхода, определить максимальную скорость фотоэлектронов. [электрон релятивистский,  $\beta = 0,8$ ,  $v = 2,4 \cdot 10^8\text{ м/с}$ ]

5. Уединенный железный шарик облучают электромагнитным излучением с длиной волны  $200\text{ нм}$ . До какого максимального потенциала зарядится шарик? [1,85 В]

6. Лазер мощностью  $16\text{ мВт}$  испускает  $4 \cdot 10^{16}$  фотонов каждую секунду, которые вызывают фотоэффект на пластинке с работой выхода электронов  $1,25\text{ эВ}$ . Определить потенциал, до которого зарядится пластинка. [1,25 В]

7. При поочередном освещении поверхности металла светом с длинами волн  $0,35$  и  $0,54\text{ мкм}$  обнаружено, что соответствующие максимальные скорости фотоэлектронов отличается друг от друга в  $n = 2$  раза. Найти работу выхода с поверхности этого металла. [1,9 эВ]

8. Какая доля энергии фотона израсходована на работу вырывания фотоэлектрона, если красная граница фотоэффекта  $\lambda_{\text{кр}} = 310\text{ нм}$ , а максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов равна  $4\text{ эВ}$ ? [0,5]

9. При освещении катода светом с длиной волны, равной сначала  $207\text{ нм}$ , а затем  $270\text{ нм}$ , задерживающее напряжение изменилось в 2 раза. Определите красную границу фотоэффекта. [388 нм]

10. При исследовании фотоэффекта с поверхности цинка установлено, что при изменении длины волны падающего света в 1,4 раза для прекращения фотоэффекта необходимо увеличить задерживающее напряжение в 2 раза. Определите длину волны в первом эксперименте. [133 нм]

11. При освещении фотоэлемента монохроматическим светом с длиной волны  $\lambda_1 = 0,4\text{ мкм}$  он заряжается до разности потенциалов  $U = 2\text{ В}$ . Определите, до какой разности потенциалов зарядится фотоэлемент при освещении его монохроматическим светом с длиной волны  $\lambda_2 = 0,3\text{ мкм}$ . [3 В]

12. Катод фотоэлемента освещается монохроматическим светом с длиной волны  $\lambda = 310\text{ нм}$ . При ее изменении на 25% задерживающее напряжение уменьшилось на  $0,8\text{ В}$ . По этим экспериментальным данным рассчитайте постоянную Планка. [ $6,6 \cdot 10^{-34}\text{ Дж}\cdot\text{с}$ ]

13. Увеличение частоты вызывающего фотоэффект фотона в 1,1 раза ведет к увеличению максимальной скорости выбитого электрона в 1,1 раза. Определите отношение работы выхода к энергии фотона. [0,5]

### 1.3. Фотоны. Давление света

1. Монохроматическое излучение с длиной волны, равной 500 нм, падает нормально на плоскую зеркальную поверхность и давит на нее с силой 10 нН. Определить число фотонов, ежесекундно падающих на эту поверхность. [ $3,77 \cdot 10^{18}$ ]

2. Точечный источник света потребляет 100 Вт и равномерно испускает свет во все стороны. Длина волны испускаемого при этом света 589 нм. КПД источника 0,1%. Вычислить число фотонов, выбрасываемых источником за 1 с. [ $3 \cdot 10^{17} \text{ с}^{-1}$ ]

3. Импульс лазерного излучения длительностью 0,13 с и энергией  $\varepsilon = 10$  Дж сфокусирован в пятно диаметром  $d = 10$  мкм на поверхность с коэффициентом отражения  $\rho = 0,5$ . Найти среднее давление такого пучка света. [ $5 \text{ МПа}$ ]

4. Параллельный пучок монохроматических лучей с длиной волны 0,5 мкм падает нормально на зачерненную поверхность и производит давление  $10^{-5}$  Па. Определить концентрацию электронов в потоке и его интенсивность, т.е. число частиц, падающих на единичную поверхность в единицу времени. [ $2,52 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-3}$ ;  $7,56 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ ]

5. Пучок энергии, излучаемый электрической лампой, равен 600 Вт. На расстоянии  $R = 1$  м от лампы перпендикулярно к падающим лучам расположено круглое плоское зеркало диаметром  $d = 2$  см. Принимая, что зеркало полностью отражает падающий на него свет, определить силу  $F$  светового давления на зеркальце. [ $0,1 \text{ нН}$ ]

6. Параллельный пучок монохроматического света с длиной волны 662 нм падает на зачерненную поверхность и производит на нее давление  $P = 0,3$  мкПа. Определить концентрацию  $n$  фотонов в световом пучке. [ $n = 10^{12} \text{ м}^{-3}$ ]

7. Свет с длиной волны 700 нм нормально падает на зеркальную поверхность и производит на нее давление  $P = 0,1$  мкПа. Определить число фотонов  $n$ , падающих за время  $t = 1$  с на площадь  $1 \text{ см}^2$  этой поверхности. [ $n = 5,3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ]

8. Определить энергию, массу и импульс фотона, соответствующего рентгеновскому излучению с длиной волны  $\lambda = 0,001$  мкм. [ $\varepsilon = 1,23 \cdot 10^3 \text{ эВ}$ ;  $m = 2,210 \cdot 10^{-33} \text{ кг}$ ;  $P = 6,6 \cdot 10^{-25} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$ ]

9. Какую длину волны должен иметь фотон, чтобы его масса была равна массе покоящегося электрона? [ $0,243 \text{ нм}$ ]

10. Плоская световая волна интенсивностью  $I = 0,1$  Вт/см<sup>2</sup> падает под углом  $\alpha = 30^\circ$  на плоскую отражающую поверхность с коэффициентом отражения  $\rho = 0,7$ . Определите нормальное давление оказываемое светом на эту поверхность. [ $4,25 \text{ мкПа}$ ]

### 1.4. Эффект Комптона

1. Поток жестких рентгеновских лучей ( $\lambda = 24$  пм) при соударении со свободным электроном передал ему 9% своей энергии. Определить длину волны рассеянного рентгеновского излучения. [ $26,4 \text{ пм}$ ]

2. Изменение длины волны рентгеновских лучей при комптоновском рассеянии равно 2,4 пм. Вычислить угол рассеяния и величину энергии, переданной при этом электрону отдачи, если длина волны рентгеновских лучей до взаимодействия 10 пм. [ $24,3 \text{ эВ}$ ]

3. Какая доля энергии фотона приходится при эффекте Комптона на электрон отдачи, если рассеяние фотона происходит на угол  $180^\circ$ ? Энергия фотона до рассеяния равна 0,255 МэВ. [ $0,5$ ]

4. Узкий пучок монохроматического рентгеновского излучения падает на рассеивающее вещество. При этом длины волн излучения, рассеянного под углами, равными  $60^\circ$  и  $120^\circ$ , отличаются друг от друга в  $n = 2$  раза. Считая, что рассеяние происходит на свободных электронах, найти длину волны падающего излучения. [ $1,2 \text{ пм}$ ]

5. Фотон с длиной волны, равной 6,0 пм, рассеялся под прямым углом на покоившемся свободном электроне. Найти частоту рассеянного фотона и кинетическую энергию электрона отдачи. [ $\nu = 3,55 \cdot 10^{20} \text{ с}^{-1}$ ;  $T = 60 \text{ эВ}$ ]

6. Фотон с энергией 0,46 МэВ рассеялся под углом  $120^\circ$  на покоившемся свободном электроне. Определить относительное изменение частоты фотона. [ $0,57$ ]

7. Определить угол  $\theta$ , под которым был рассеян гамма-квант с энергией  $\varepsilon = 1,02$  МэВ при эффекте Комптона, если кинетическая энергия электрона отдачи  $T = 0,51$  МэВ. [ $60^\circ$ ]
8. Найти энергию налетающего фотона, если известно, что при рассеянии под углом  $90^\circ$  на покоившемся свободном электроне последний приобрел энергию 300 кэВ. [ $0,57$  МэВ]
9. Фотон с энергией, превышающей в  $n=2$  раза энергию покоя электрона, испытал лобовое столкновение с покоившейся свободным электроном. Найти радиус кривизны траектории электрона отдачи в магнитном поле  $B = 0,12$  Тл. Предполагается, что электрон отдачи движется перпендикулярно к направлению поля. [ $3,4$  см]
10. Фотон с энергией  $\varepsilon = 0,55$  МэВ рассеялся на покоившемся свободном электроне, в результате чего его длина волны изменилась на 3,0 пм. Найти угол, под которым вылетел комптоновский электрон. [ $31^\circ$ ]
11. Фотон с энергией  $\varepsilon_1$ , равной энергии покоя электрона, испытывает комптоновское рассеяние на свободном электроне. Определить: а) максимально возможное изменение длины волны фотона; б) максимальную энергию и импульс электрона отдачи; в) энергию и импульс электрона отдачи при условии, что фотон рассеивается под углом  $90^\circ$ . [а)  $4,8 \cdot 10^{-6}$  мкм; б)  $0,34$  МэВ,  $3,63 \cdot 10^{-22}$  кг м/с; в)  $0,256$  МэВ,  $3 \cdot 10^{-22}$  кг м/с]
12. Угол рассеяния фотона  $\theta = 90^\circ$ . Угол отдачи электрона  $\varphi = 30^\circ$ . Определить энергию падающего фотона. [ $0,37$  МэВ]
13. На какой угол рассеялся гамма-квант с энергией  $0,8$  МэВ в результате столкновения с покоившемся электроном, если известно что: а) длина волны рассеянного кванта равна комптоновской длине волны электрона; б) скорость электрона отдачи составляет 0,6 с? [а)  $51^\circ$ ; б)  $28,5^\circ$ ]
14. На какой угол был рассеян при эффекте Комптона  $\gamma$ -квант с энергией  $\varepsilon_\phi = 1,53$  МэВ, если кинетическая энергия электрона отдачи  $T = 0,51$  МэВ? [ $42,7^\circ$ ]
15. Рентгеновский фотон с энергией  $\varepsilon_\phi = 20$  кэВ претерпевает комптоновское рассеяние на свободном электроне на угол  $\varphi = 90^\circ$ . Чему равна энергия электрона отдачи? [ $756$  эВ]
16. Рентгеновское излучение с длиной волны  $\lambda = 10$  пм рассеивается свободными электронами. Определите максимальную длину волны рентгеновского излучения в рассеянном пучке. [ $12,4$  пм]

## 2. ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА ЧАСТИЦ

### 2.1. Волны де Бройля

1. Какую кинетическую энергии необходимо сообщить протону, чтобы его дебройлевская длина волны стала равной: а) 1 А, б) комптоновской длине волны? [ $0,082$  эВ;  $382$  МэВ]
2. Определить длины волн де Бройля  $\alpha$ -частицы и протона, прошедших одинаковую ускоряющую разность потенциалов  $U=1$  кВ. [ $032$  нм,  $0,9$  нм]
3. Найти кинетическую энергию, при которой дебройлевская длина волны электрона равна его комптоновской длине волны? [ $T = (\sqrt{2} - 1)mc^2 = 0,21$  МэВ]
4. Электрон движется по окружности радиусом  $r = 0,5$  см в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 8$  мТл. Определить длину волны де Бройля электрона. [ $\lambda = 0,1$  нм]
5. Скорость тепловых нейтронов, средняя кинетическая энергия которых близка к средней энергии атомов газа при комнатной температуре, равна 2,5 км/с. Найти длину волны де Бройля для таких нейтронов. [ $\lambda = 160$  нм]
6. Насколько нужно увеличить кинетическую энергию  $T$  нерелятивистской частицы, чтобы дебройлевская длина волны уменьшилась вдвое? Вычислите это изменение для нерелятивистского электрона, имеющего  $\lambda=1$  А. [ $\Delta T = 3T$ ;  $\Delta T = 460$  эВ]
7. Какую энергию необходимо сообщить электрону, чтобы его дебройлевская длина волны уменьшилась от 100 до 50 пм? [ $T = 0,45$  кэВ]

8. Какую дополнительную энергию необходимо сообщить электрону с импульсом 15,0 кэВ/с (с - скорость света), чтобы его длина волны стала равной 50 пм?

$$[\Delta E = (2\pi^2\hbar^2/m\lambda^2) - (p/2m) = 0,38\text{кэВ}]$$

9. При увеличении энергии электрона на  $\Delta E = 200$  эВ его дебройлевская длина волны изменилась в  $n = 2$  раза. Найти первоначальную длину волны электрона.

$$[\lambda = \pi\hbar\sqrt{2(n^2 - 1)/(m\Delta E)} = 0,15\text{ нм}]$$

10. Протон обладает кинетической энергией  $T = 1$  кэВ. Определить дополнительную энергию  $\Delta T$ , которую необходимо ему сообщить для того, чтобы длина волны де Бройля уменьшилась в три раза. [8кэВ]

11. Найти длину волны де Бройля для электрона, движущегося со скоростью равной 0,8 скорости света. Учесть зависимость массы от скорости. [1,82 нм]

12. Параллельный пучок электронов нормально падает на щель, ширина которой равна  $b = 0,06$  мм. Определить скорость этих электронов, если известно, что на экране, отстоящем от щели на расстоянии  $L = 40$  мм, ширина центрального дифракционного максимума  $\Delta x = 10$  мкм. [1 Мм/с]

13. Параллельный пучок электронов нормально падает на щель, ширина которой равна  $b = 0,10$  мм. На экране, отстоящем от щели на расстоянии  $L = 0,5$  м, ширина центрального дифракционного максимума  $\Delta x = 10$  мкм. Определить какую ускоряющую разность потенциалов прошли электроны. [1,5 В]

14. Пучок летящих параллельно друг другу электронов, имеющих скорость  $v = 1,0 \cdot 10^6$  м/с, проходит через щель шириной  $b = 0,1$  мм. Найти ширину  $\Delta x$  центрального дифракционного максимума, наблюдаемого на экране, отстоящем от щели на расстоянии  $L = 10,0$  см. [ $\Delta x = 1,5$  мкм]

15. Пучок электронов падает нормально на поверхность монокристалла никеля. В направлении, составляющем угол  $55^\circ$  с нормалью к поверхности, наблюдается максимум отражения четвёртого порядка при скорости электронов  $v = 8 \cdot 10^6$  м/с. Пренебрегая преломлением электронных волн в кристалле, вычислите межплоскостное расстояние, соответствующее данному отражению. [ $d = 2,1$  А]

16. Узкий пучок летящих параллельно друг другу электронов, имеющих скорость  $v$ , проходит через поликристаллическую никелевую фольгу и попадает на расположенный за ней на расстоянии  $L = 10$  см экран. Найти радиусы двух первых дифракционных колец, получающихся на экране за счёт отражения электронов от кристаллических плоскостей, отстоящих друг от друга на расстоянии  $d = 0,215$  нм, при  $v = 1,0 \cdot 40^7$  м/с. [ $r_1 = 35$  мм;  $r_2 = 82$  мм]

17. Фотоэффект вызывается фотонами с длиной волны  $\lambda = 0,3$  нм. Работа выхода с поверхности данного металла равна 2,5 эВ. Какую минимальную длину волны де Бройля имеют фотоэлектроны? [19 нм]

## 2.2. Соотношение неопределенностей Гейзенберга

1. Исходя из того, что радиус атома водорода имеет значение порядка 0,1 нм, оцените скорость движения его электрона. [1 Мм/с]

2. Электрон с кинетической энергией  $T = 15$  эВ находится в металлической пылинке диаметром  $d = 1$  мкм. Оценить относительную неточность  $\Delta v/v$ , с которой может быть определена скорость электрона. [ $\Delta v/v = 10^4$ ]

3. Во сколько раз дебройлевская длина волны частицы меньше неопределенности её координаты, которая соответствует относительной неопределенности импульса в 1%? [в 160 раз]

4. Предполагая, что неопределенность координаты движущейся частицы равна дебройлевской длине волны, определить относительную неточность  $\Delta p/p$  импульса этой частицы. [ $\Delta p/p = 0,16$ ]

5. Оценить наименьшие погрешности, с которыми можно определить скорость электрона и протона, локализованных в области размером 1 мкм. [ $\Delta v_1 = 200$  м/с;  $\Delta v_2 = 0,1$  м/с]

6. Положение свободного электрона определено с точностью до 1 мкм. Чему равна неопределенность в его скорости? [100 м/с]

7. Используя соотношение неопределенностей, оценить ширину одномерного потенциального ящика, в котором минимальная энергия электрона 10 эВ. [0,12 нм]

8. Альфа-частица находится в бесконечно глубоком, одномерном, прямоугольном потенциальном ящике. Используя соотношение неопределенностей, оценить ширину ящика, если известно, что минимальная энергия частицы 8 МэВ. [6·10<sup>-15</sup> м]

9. Приняв, что минимальная энергия E нуклона в ядре равна 10 МэВ, оценить, исходя из соотношения неопределенностей, линейные размеры ядра. [ $l = 2\hbar/\sqrt{2mE} = 2,9 \cdot 10^{-13}$  м.]

10. Используя соотношение неопределенностей, оценить низший энергетический уровень электрона в атоме водорода. Принять линейные размеры атома  $l \approx 0,1$  нм. [ $E_{\min} = 2\hbar^2/(ml^2) = 15$  эВ]

11. Частица массой m находится в прямоугольной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками. Ширина ямы равна l. При каких значениях кинетической энергии T относительная неопределенность  $\Delta T/T$  будет меньше 0,01? [ $T > (200\hbar^2/(ml^2))$ ]

12. Электрон с кинетической энергией T=10 эВ локализован в области размером l = 1,0 мкм. Оценить относительную неопределенность скорости электрона. [ $\Delta v/v = 2\hbar/(2ml^2 T_k)^{1/2} = 1,3 \cdot 10^{-4}$ ]

13. Можно считать, что электрон в атоме водорода заключен в сферической области вокруг ядра радиусом  $r = 0,05$  нм. С помощью соотношения неопределенностей оцените кинетическую энергию электрона. [150 эВ]

14. Свободно движущаяся нерелятивистская частица имеет относительную неопределенность кинетической энергии порядка  $1,6 \cdot 10^{-4}$ . Оцените, во сколько раз неопределенность координаты такой частицы больше ее дебройлевской длины волны. [ $2 \cdot 10^3$ ]

15. Электрон находится в одномерной прямоугольной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками. Ширина ямы равна l. Оценить с помощью соотношения неопределенностей силу давления электрона на стенки этой ямы, при минимально возможной его энергии. [ $F \approx (4\hbar^2)/(ml^3)$ ]

16. Среднее время жизни атома в возбужденном состоянии составляет  $\Delta t \approx 10^{-8}$  с. При переходе атома в нормальное состояние испускается фотон, средняя длина волны которого равна 400 нм. Оценить ширину  $\Delta \lambda$  излучаемой спектральной линии. [ $8,5 \cdot 10^{-15}$  м]

17. Среднее время жизни атома в возбужденном состоянии составляет  $\Delta t \approx 10^{-8}$  с. При переходе атома в нормальное состояние испускается фотон, средняя длина волны которого равна 600 нм. Оценить относительную ширину  $\Delta \lambda/\lambda$  излучаемой спектральной линии. [ $3 \cdot 10^{-8}$ ]

18. Используя соотношение неопределенностей, оценить ширину энергетического уровня в атоме водорода, находящегося: а) в основном состоянии; б) в возбужденном состоянии. Время жизни атома в возбужденном состоянии равно  $10^{-6}$  с. [а) 0; б) 0,1 мкэВ]

19. Чему равна предельная резкость  $\Delta \omega/\omega$  спектральной линии с длиной волны  $\lambda = 500$  нм допускаемая принципом неопределенностей, если считать, что средняя продолжительность возбужденного состояния атомов  $\Delta t = 10^{-8}$  с. [ $\Delta \omega/\omega \approx 2,6 \cdot 10^{-8}$ ]

### 3. УРАВНЕНИЕ ШРЕДИНГЕРА

#### 3.1. Частица в одномерной потенциальной яме

1. Временная часть уравнения Шредингера имеет вид:  $i\hbar \cdot \frac{d\psi}{dt} = E\psi$ . Найти решение уравнения. [ $\psi = Ce^{-i(Et)/\hbar}$ ]

2. Электрону в потенциальном ящике шириной  $d$  отвечает волновой вектор  $k = \frac{\pi n}{d}$  (где  $n = 1, 2, 3, \dots$ ). Используя связь энергии электрона  $E$  с волновым вектором  $k$ , получить выражение для собственных значений энергии  $E_n$ . [ $E_n = \frac{\pi^2 \cdot \hbar^2 \cdot n^2}{2md^2}$ ]

3. Собственная функция, описывающая состояние частицы в потенциальном ящике, имеет вид  $\psi(x) = C \sin(\pi n x / d)$ . Используя условия нормировки, определить постоянную  $C$ . [ $C = \sqrt{2/d}$ ]

4. В потенциальной яме бесконечной глубины движется электрон. Во сколько раз изменится минимальное значение кинетической энергии электрона, если ширина потенциальной ямы уменьшится вдвое? [*увеличится в 4 раза*]

5. Электрон находится в потенциальном ящике шириной  $d = 0,5$  нм. Определить наименьшую разность  $\Delta E$  энергетических уровней электрона. [ $4,48$  эВ]

6. Вычислить энергию, которая необходима, чтобы перевести частицу, находящуюся в одномерной прямоугольной потенциальной яме шириной  $d = 0,1$  нм с первого энергетического уровня на второй. Задачу решить для электрона и для частицы с массой  $10$  г. [ $112,5$  эВ;  $10,27 \cdot 10^{-20}$  эВ].

7. Какого размера должна быть одномерная прямоугольная потенциальная яма с бесконечно высокими стенками, чтобы локализованная в ней частица имела на самом глубоком уровне энергию  $E = 1$  эВ. Задачу решить для электрона и протона. [ $d = \pi \hbar / \sqrt{2mE}$ ;  $d_1 = 6 \cdot 10^{-10}$  м;  $d_2 = 0,14 \cdot 10^{-10}$  м]

8. Электрон находится в одномерной прямоугольной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками. Найти ширину ямы, если разность энергии между уровнями с  $n_1 = 2$  и  $n_2 = 3$  составляет  $\Delta E = 0,3$  эВ. [ $2,5$  нм]

9. Частица находится в одномерной прямоугольной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками. Найти массу частицы, если ширина ямы  $d$  и разность энергий энергетических уровней  $n_1$  и  $n_2$  равна  $\Delta E$ . [ $m = \frac{\hbar^2 \cdot \pi^2 (n_2^2 - n_1^2)}{2I^2 \Delta E}$ ]

10. Частица массой  $m$  находится в основном состоянии в одномерной прямоугольной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками. Максимальное значение плотности вероятности местонахождения частицы равно  $P$ . Найти ширину ямы и энергию частицы в данном состоянии. [ $I = 2/\omega_m$ ;  $E = \pi^2 \hbar^2 \omega_m / 8m$ ]

11. Частица в потенциальном ящике шириной  $d$  находится в возбужденном состоянии ( $n=2$ ). Определить, в каких точках интервала ( $0 < x < d$ ) плотность вероятности нахождения частицы имеет максимальное и минимальное значения. [*максимум при  $x_1 = d/4$ ,  $x_3 = 3d/4$ ; минимум при  $x_2 = d/2$* ]

12. Электрон находится в потенциальном ящике шириной  $d$ . В каких точках интервала ( $0 < x < d$ ) плотность вероятности нахождения электрона на первом и втором энергетических уровнях одинакова? Вычислить значение плотности вероятности для этих точек. [ $x_1 = d/3$ ;  $x_2 = 2d/3$ ;  $|\psi(x)|^2 = 3d/2$ ]

13. Частица в бесконечно глубоком, одномерном, прямоугольном потенциальном ящике находится в низшем возбужденном состоянии. Какова вероятность обнаружения частицы в крайней четверти ящика? [ $0,33$ ]

14. В прямоугольном потенциальном ящике шириной  $d$  находится частица в низшем возбужденном состоянии. Определить вероятность нахождения частицы в интервале  $d/4$  равноудаленном от стенок ящика. [ $0,091$ ]

15. Частица в бесконечно глубоком, одномерном, прямоугольном потенциальном ящике находится в основном состоянии ( $n=1$ ). Какова вероятность обнаружения частицы в крайней трети ящика? [ $0,2$ ]

### 3.2. Прохождение частицы через потенциальный барьер

1. Электрон с энергией  $E = 25$  эВ встречает на своём пути потенциальный барьер высотой  $U=9$  эВ. Определить коэффициент преломления волн де Бройля на границе барьера. [ $n = (1-U/E)1/2 = 0,8$ ]

2. Определить коэффициент преломления  $n$  волн де Бройля для протонов на границе низкого потенциального барьера. Кинетическая энергия протонов равна 16 эВ, а высота  $U$  потенциального барьера равна 9 эВ. [ $n = (1+U/E)1/2 = 1,25$ ]

3. Электрон обладает энергией  $E=10$  эВ. Определить во сколько раз изменяется его скорость  $v$  и длина волны де Бройля при прохождении через бесконечно протяженный потенциальный барьер высотой  $U=6$  эВ. [ $0,632; 1,58$ ]

4. На пути электрона с дебройлевской длиной волны  $\lambda = 0,1$  нм находится бесконечно протяженный низкий потенциальный барьер высотой  $U = 120$  эВ. Определить длину волны де Бройля  $\lambda_2$  после прохождения барьера.

$$[\lambda_2 = \lambda_1 / \left[ (1 - m \cdot U \cdot \lambda_1^2) / (2\pi^2 \cdot h^2) \right]^{1/2} = 218 \text{ нм}]$$

5. Пучок электронов с энергией  $E = 25$  эВ встречает на своем пути протяженный потенциальный барьер высотой  $U = 9$  эВ. Определить коэффициент отражения  $R$  и коэффициент пропускания  $D$  волн де Бройля для данного барьера.

$$[R = 1/81; D = 80/81]$$

6. Моноэнергетический поток электронов ( $E=100$  эВ) падает на низкий прямоугольный потенциальный барьер бесконечной ширины. Определить высоту потенциального барьера  $U$ , если известно, что 4 % падающих на барьер электронов отражается. [ $U = 55,6$  эВ]

7. Кинетическая энергия электрона в два раза превышает высоту  $U$  потенциального барьера бесконечной ширины. Определить коэффициент отражения  $R$  и коэффициент прохождения  $D$  электронов на границе барьера. [ $R = 0,0295; D = 0,97$ ]

8. Частица массой  $m$  падает на прямоугольный потенциальный барьер высотой  $U$ . Энергия частицы равна  $E$ , причем  $E < U$ . Найти эффективную глубину  $x_{\text{эф}}$  проникновения частицы под барьер, то есть расстояние от границы барьера до точки, в которой плотность вероятности нахождения частицы уменьшается в  $e$  раз. Вычислить  $x_{\text{эф}}$  для электрона, если  $U-E = 1$  эВ. [ $0,1$  нм]

9. Электрон проходит через прямоугольный потенциальный барьер шириной  $d = 0,5$  нм. Высота  $U$  барьера больше энергии электрона ( $E=10$  эВ) на 1%. Вычислить коэффициент прозрачности  $D$ . [ $0,2$ ]

10. Ширина прямоугольного потенциального барьера равна  $d = 0,2$  нм. Полная механическая энергия налетающего на него электрона на 1 эВ меньше высоты барьера. Во сколько раз изменится вероятность прохождения электрона через барьер, если разность энергий возрастает в 10 раз? [*уменьшится в 79 раз*]

11. Электрон с энергией  $E = 9$  эВ движется в положительном направлении оси  $x$ . При какой ширине потенциального барьера коэффициент прозрачности  $D = 0,1$ , если высота барьера равна  $U = 10$  эВ? [ $d = 0,22$  нм]

12. Прямоугольный потенциальный барьер имеет ширину  $d = 0,1$  нм. При какой разности энергий  $U-E$  вероятность прохождения электрона через барьер равна 0,99? [ $(U-E) = 10^{-4}$  эВ]

13. Ядро испускает  $\alpha$ -частицы с энергией  $E = 5$  МэВ. В грубом приближении можно считать, что  $\alpha$ -частицы проходят через прямоугольный потенциальный барьер высотой  $U = 10$  МэВ и шириной  $d = 5 \cdot 10^{-13}$  м. Найти коэффициент прозрачности  $D$  барьера для  $\alpha$ -частиц. [ $D = 0,89$ ]

14. Электрон проходит через прямоугольный потенциальный барьер шириной  $d = 0,5$  нм. Высота  $U_0$  барьера больше энергии  $E$  электрона на 1%. Вычислите коэффициент прозрачности барьера, если энергия электрона: 1)  $E = 10$  эВ; 2)  $E = 100$  эВ. [ $0,2; 6,5 \cdot 10^{-3}$ ]

15. Электрон встречает на своем пути прямоугольный потенциальный барьер шириной 0,1 нм. На сколько высота барьера больше энергии электрона, если коэффициент прозрачности равен 0,001?

**Вопросы к семинарским занятиям:**

1. Природа межатомных сил и потенциалы межатомных взаимодействий.
2. Классификация твердых тел по типам связи. Энергия связи кристалла.
3. Ионные кристаллы, основные свойства. Ионные радиусы.
4. Ковалентные кристаллы, основные свойства. Гибридные орбитали.
5. Молекулярные кристаллы. Силы Ван-дер-Ваальса.
6. Энергия решетки ионных кристаллов. Постоянная Маделунга.
7. Основные понятия симметрии. Оси, плоскости. Точечные группы. Симметрия кристаллов и их физические свойства.
8. Сингонии. Кристаллический класс. Пространственные группы.
9. Упругость кристалла. Закон Гука. Вид тензора упругости кристаллов и изотропных тел.
10. Дифракция рентгеновских лучей. Формула Брегга-Вульфа.
11. Формула Лауэ.
12. Обратная решетка и ее свойства. Построение зоны Бриллюэна.
13. Колебания одноатомной цепочки. Граничные условия.
14. Колебания двухатомной линейной цепочки. Акустические и оптические колебания многоатомной линейной цепочки.
15. Колебания трехмерных решеток. Число ветвей. Плотность колебательных состояний.
16. Колебания кристаллической решетки. Нормальные колебания. Нулевые колебания. Фононы.
17. Общая модель твердого тела. Вид гамильтониана.
18. Адиабатическое приближение.
19. Одноэлектронное приближение (приближение самосогласованного поля).
20. Теорема Блоха. Функции Блоха. Выбор волновых функций.
21. Модель свободных электронов. Квазиволновой вектор.
22. Модель почти свободных электронов. Модель Кронига-Пенни.
23. Приближение сильно связанных электронов. Дисперсионная зависимость в кубическом кристалле в приближении сильно связанных электронов.
24. Свойства электрона в периодическом поле. Эффективная масса электрона в кристаллах.
25. Заполнение электронных зон в кристалле. Плотность состояний
26. Распределение Ферми-Дирака. Уровень Ферми.
27. Поверхность Ферми и ее вид для разных концентраций электронов.
28. Проводники, диэлектрики и полупроводники.
29. Понятия о дырках в полупроводниках. Масса и заряд дырок.
30. Собственная и примесная проводимость полупроводников.
31. Локализованные состояния в твердом теле. Общий подход. Примесные состояния. Доноры и акцепторы.
32. Статистика электронов в полупроводниках. Положение уровня Ферми.
33. Двухчастичные состояния. Экситоны Гросса-Ваннье-Мотта.
34. Системы с пониженной размерностью. Квантовые ямы, нити, точки. Квантовые размерные эффекты.
35. Электронный спектр и плотность состояний в 3D, 2D, 1D, 0D системах.
36. Нанокристаллы. Экситонные состояния в системах с пониженной размерностью.
37. Экспериментальные проявления сверхпроводимости. Изотопический эффект. Основные представления микротемории СП.
38. Электрон-фононное взаимодействие в СП. Куперовские пары.

## Раздел 7. Элементы физики атомного ядра и элементарных частиц

Опыты Резерфорда. Ядерная модель атома. Атом водорода. Водородоподобные атомы. Квантовые постулаты Бора. Атом водорода по теории Бора. Пространственное квантование. Магнитный момент атома. Опыты Штерна и Герлаха. Спин электрона. Атом водорода по теории Шредингера. Многоэлектронные атомы. Принцип Паули. Электронные оболочки атомов. Заполнение электронных оболочек. Периодическая система элементов Д.И. Менделеева. Молекулы. Молекулы водорода. Обменное взаимодействие. Физическая природа химической связи. Электронные термы двухатомной молекулы. Молекулярные спектры. Рентгеновское излучение. Характеристические рентгеновские спектры. Закон Мозли. Спонтанное и вынужденное излучение. Лазеры. Элементы нелинейной оптики.

Строение атомного ядра. Модели ядер. Ядерные силы. Масс-спектрометры\*. Парамагнитный ядерный резонанс. Радиоактивность. Закон радиоактивного распада. Радиоактивное превращение ядер. Ядерные реакции и их основные типы. Искусственная радиоактивность\*. Цепная реакция деления. Ядерный реактор. Коэффициент размножения нейтронов. Термоядерный синтез. Водородно-углеродистый цикл. Энергия звезд\*. Проблема управляемых термоядерных реакций. Экологические вопросы современной энергетики\*.

Иерархия структур материи. Частицы и античастицы. Модели элементарных частиц. Фотоны, лептоны, адроны (мезоны, барионы, гипероны). Фундаментальные взаимодействия. Систематика элементарных частиц. Современные методы ускорения частиц. Космические лучи.

Вещество и поле. Иерархия структур материи: кварки, ядра атомов, атомы, молекулы, макроскопические состояния вещества (газы, жидкости, твердые тела, плазма). Планеты. Звезды. Галактики. Горячая модель и эволюция Вселенной. Незавершенность физики и будущее естествознания

### Задачи для самостоятельного решения и контрольных заданий

#### АТОМНАЯ ФИЗИКА АТОМ ВОДОРОДА ПО КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ:

1. Собственная волновая функция, описывающая основное состояние электрона в атоме, имеет вид  $\psi(r) = C \cdot e^{-r/a}$ , где  $C$  - некоторая постоянная. Найти из условия нормировки постоянную  $C$ .

Ответ:  $C = 1 / \sqrt{\pi a^3}$ .

2. В основном состоянии атома водорода волновая функция электрона имеет вид  $\psi(r) = C \cdot e^{-r/a}$ , где  $C$  - некоторая постоянная. Определить расстояние  $r$ , при котором вероятность нахождения электрона максимальна.

Ответ:  $r = \pi \cdot \epsilon_0 \cdot h^2 / (m \cdot e^2)$ .

3. Вычислить для атомарного водорода длины волн первых трех линий серии Бальмера.

Ответ: 657, 487, 434 нм.

4. Определить квантовое число  $n$  возбужденного состояния атома водорода, если известно, что при переходе в основное состояние атом излучил два фотона с  $\lambda_1 = 656,3$  нм и  $\lambda_2 = 121,6$  нм.

Ответ:  $n = 3$ .

5. Найти квантовое число  $n$ , соответствующее возбужденному состоянию иона  $He^+$ , если при переходе в основное состояние этот ион испустил последовательно два фотона с длинами волн 108,5 и 30,4 нм.

Ответ:  $n = 5$ .

6. В спектре атомарного водорода известны длины волн трех линий, принадлежащих одной и той же серии: 97,26; 102,58; 121,57 нм. Найти длины волн других линии в данном спектре, которые можно предсказать с помощью этих трех линий.

Ответ: 1,88; 0,657; 0,486 мкм.

7. Определить длину волны  $\lambda$  спектральной линии атомарного водорода, частота которой равна разности частот следующих двух линий серии Бальмера:  $\lambda_1 = 486,1$  нм,  $\lambda_2 = 410,2$  нм. Какой серии принадлежит эта линия?

Ответ:  $\lambda_3 = 2,63$  мкм,  $n_2 = 4$  (серия Брекета).

8. Определить для атома водорода и иона  $He^+$  :

- энергию связи электрона в основном состоянии;
- потенциал ионизации;
- первый потенциал возбуждения;
- длину волны головной линии серии Лаймана..

Ответ:

	Есв, эВ	$\Psi_i, В$	$\Psi, В$	$\lambda, нм$
H	13,6	13,6	10,2	121,5
He	54,5	54,5	40,8	30,4

9. Сколько спектральных линий будет испускать атомарный водород, который возбуждают:

- на 4 энергетический уровень;
- на 10 энергетический уровень;
- на  $n$ -й энергетический уровень?

Ответ: а) 6; б) 45; в)  $n(n-1)/2$ .

10. Найти скорость фотоэлектронов, вырываемых электромагнитным излучением с длиной волны  $\lambda = 18,0$  нм из ионов  $He^+$ , которые находятся в основном состоянии и покоятся.

Ответ:  $v = 2,3 \cdot 10^6$  м/с.

11. Покоившийся атом водорода испустил фотон, соответствующий головной линии серии Лаймана. Какую скорость приобрел атом?

Ответ:  $v = 3,25$  м/с.

12. Покоившийся ион  $He^+$  испустил фотон, соответствующий головной линии серии Лаймана. Этот фотон вырвал фотоэлектрон из покоящегося атома водорода, который находился в основном состоянии. Найти скорость фотоэлектрона.

Ответ:  $v = 3,1 \cdot 10^6$  м/с.

13. Вычислить:

- спиновой момент импульса для электрона и величину проекции этого момента на направление внешнего магнитного поля;
- спиновой магнитный момент электрона и проекцию магнитного момента на направление внешнего поля;
- отношение магнитного момента к механическому моменту для электрона.

Ответ:

а)  $|L_s| = 0,915 \cdot 10^{-34}$  Дж·с;  $L_{sh} = \pm 0,527 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.

б)  $P_{ms} = \mu_B \sqrt{3} = 1,61 \cdot 10^{-23}$  Дж/Тл;  $P_{msH} = \mu_B = 0,927 \cdot 10^{-23}$  Дж/Тл.

в)  $P_{ms} / L_s = e/m = 1,76 \cdot 10^{11}$  1/(Тл·с).

14. Атом водорода, находившийся первоначально в основном состоянии, поглотил квант света с энергией  $\epsilon = 10,2$  эВ. Определить изменение момента импульса  $\Delta L$  орбитального движения электрона. В возбужденном атоме электрон находится в  $p$ -состоянии.

Ответ:  $\Delta L = 1.49 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.

15. Используя векторную модель атома, определить наименьший угол  $\alpha$ , который может образовать вектор  $L$  момента импульса орбитального движения электрона в атоме с направлением внешнего магнитного поля. Электрон в атоме находится в d-состоянии.

Ответ:  $\alpha = 35^\circ 20'$ .

16. Момент импульса орбитального движения электрона в атоме водорода  $L = 1,83 \cdot 10^{-34}$  Дж·с. Определить магнитный момент  $P_m$ , обусловленный орбитальным движением электрона.

Ответ:  $P_m = 1.61 \cdot 10^{-23}$  Дж/Тл.

17. Определить возможные значения магнитного момента  $P_m$ , обусловленного орбитальным движением электрона в возбужденном атоме водорода, если энергия возбуждения  $\varepsilon = 12,09$  эВ.

Ответ: 0;  $1,31 \cdot 10^{-23}$  Дж/Тл;  $2,23 \cdot 10^{-23}$  Дж/Тл.

18. Электрон в возбужденном атоме водорода находится в 3p-состоянии. Определить изменение магнитного момента, обусловленного орбитальным движением электрона при переходе атома в основное состояние.

Ответ:  $\Delta P_m = -\mu_B \sqrt{2} = -1.31 \cdot 10^{-23}$  Дж/Тл.

## 2. РЕНТГЕНОВСКИЕ СПЕКТРЫ

1. При увеличении напряжения на рентгеновской трубке от 16 до 24 кВ длина волны коротковолновой границы сплошного рентгеновского спектра изменилась на 0.26 А. Определить по этим данным числовое значение постоянной Планка.

Ответ:  $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.

2. С какой скоростью подлетает электроны к антикатоде рентгеновской трубки, если длина волны коротковолновой границы сплошного рентгеновского спектра оказывается равной 0.157 А?

Ответ:  $v = 0,5 \cdot c$  (с-скорость света).

3. Найти длину волны коротковолновой границы сплошного рентгеновского спектра, если скорость электронов, подлетающих к антикатоде трубки,  $v = 0.85 \cdot c$ , где  $c$  - скорость света.

Ответ:  $\lambda_{\min} = h / mc(\gamma - 1) = 2.8$  пм, где  $\gamma = 1 / (1 - (v/c)^2)^{1/2}$ .

4. При увеличении напряжения на рентгеновской трубке в  $n = 1.5$  раза длина волны коротковолновой границы сплошного рентгеновского спектра изменилась на  $\Delta \lambda = 26$  пм. Найти первоначальное напряжение на трубке.

Ответ:  $U = (hc/e\Delta\lambda) (1 - 1/n) = 16$  кВ.

5. Найти длину волны  $\lambda$ , определяющую коротковолновую границу непрерывного рентгеновского спектра, если известно, что уменьшение приложенного к рентгеновской трубке напряжения на  $\Delta U = 23$  кВ увеличивает искомую длину волны в 2 раза.

Ответ:  $\lambda = 27$  пм.

6. Вычислить наибольшую длину волны  $\lambda_{\max}$  в K-серии характеристического рентгеновского спектра скандия.

Ответ:  $\lambda_{\max} = 304$  пм.

7. При исследовании линейчатого рентгеновского спектра некоторого элемента было найдено, что длина волны  $\lambda$  линии  $K\alpha$  равна 76 пм. Какой это элемент?

Ответ: Ниобий ( $Z = 41$ ).

8. Найти постоянную экранирования  $b$  для L-серии рентгеновских лучей, если известно, что при переходе электрона в атоме вольфрама с M- на L-слой испускаются рентгеновские лучи с длиной волны  $V = 14$  пм.

Ответ:  $b = 5.5$ .

9. Какую наименьшую разность потенциалов  $U_{\min}$  нужно приложить к рентгеновской трубке, антикатод которой покрыт ванадием ( $Z = 23$ ), чтобы в спектре рентгеновского излучения появились все линии К-серии ванадия? Граница К-серии ванадия  $\lambda = 226$  пм.

Ответ:  $U = 5.5$  кВ.

10. Определить энергии  $\varepsilon$  фотона, соответствующего линии  $K\alpha$  в характеристическом спектре марганца ( $Z = 25$ ).

Ответ:  $\varepsilon = 5.9$  кэВ.

11. Определить скорость релятивистских электронов, вырванных с L-слоя атома молибдена при освещении рентгеновскими лучами с длиной волны  $\lambda = 0.2$  А. Длина волны линии молибдена  $5.395$  А.

Ответ:  $v = 1.2 \cdot 10^8$  м/с.

12. С помощью закона Мозли определить: а) энергию фотона, соответствующего  $K\alpha$ -линии характеристического рентгеновского спектра, излучаемого вольфрамом при бомбардировке его быстрыми электронами; б) разность энергий связи  $K\alpha$  и  $L\alpha$  электронов ванадия.

Ответ: а)  $54.4$  кэВ; б)  $5$  кэВ.

13. Разность длин волн между  $K\alpha$ -линией и коротковолновой границей сплошного рентгеновского спектра равна  $0.84$  А. Чему равно напряжение на рентгеновской трубке с никелевым ( $Z = 28$ ) антикатодом?

Ответ:  $15$  кВ.

14. При увеличении напряжения на рентгеновской трубке от  $10$  до  $20$  кВ интервал длин волн между  $K\alpha$ -линией и коротковолновой границей сплошного спектра увеличивается в  $3$  раза. Из какого металла сделан антикатод трубки?

Ответ: медь ( $Z = 29$ ).

### Вопросы к семинарским занятиям:

1. Радиус, заряд и состав атомного ядра.
2. Дефект массы и энергия связи ядра.
3. Ядерные силы. Модели ядра.
4. Капельная модель ядра.
5. Оболочечная модель ядра.
6. Виды радиоактивного излучения.
7. Закон радиоактивного распада.
8. Ядерные реакции и их основные виды.
9. Космическое излучение.
10. Частицы и античастицы.
11. Классификация элементарных частиц.

## 2.2 Критерии оценки качества освоения дисциплины

Качество освоения дисциплины оценивается по степени успешности ответов на семинарских занятиях, качества выполнения практических заданий, лабораторных практикумов и результатов прохождения тестирования.

Алгоритм оценивания ответов на семинарских занятиях таков. Развернутый ответ студента должен представлять собой связное, логически последовательное сообщение на заданную тему.

### Критерии оценивания:

- 1) полноту и правильность ответа;
- 2) степень осознанности, понимания изученного;
- 3) языковое оформление ответа.

Оценка **«Отлично»** ставится, если:

1) студент полно излагает материал, дает правильное определение основных понятий;

2) обнаруживает понимание материала, может обосновать свои суждения, применить знания на практике, привести необходимые примеры не только из учебника, но и самостоятельно составленные;

3) излагает материал последовательно и правильно с точки зрения норм литературного языка.

**«Хорошо»** – студент дает ответ, удовлетворяющий тем же требованиям, что и для отметки «5», но допускает 1–2 ошибки, которые сам же исправляет, и 1–2 недочета в последовательности и языковом оформлении излагаемого.

**«Удовлетворительно»** – студент обнаруживает знание и понимание основных положений данной темы, но:

1) излагает материал неполно и допускает неточности в определении понятий или формулировке правил;

2) не умеет достаточно глубоко и доказательно обосновать свои суждения и привести свои примеры;

3) излагает материал непоследовательно и допускает ошибки в языковом оформлении излагаемого.

Оценка **«Неудовлетворительно»** ставится, если студент обнаруживает незнание большей части соответствующего вопроса, допускает ошибки в формулировке определений и правил, искажающие их смысл, беспорядочно и неуверенно излагает материал. Оценка **«Неудовлетворительно»** отмечает такие недостатки в подготовке, которые являются серьезным препятствием к успешному овладению последующими знаниями и умениями.

Критерии оценки тестовых заданий, выполняемых студентами:

«Отлично»	Выполнение более 90% тестовых заданий
«Хорошо»	Выполнение от 65% до 90% тестовых заданий
«Удовлетворительно»	Выполнение более 50% тестовых заданий
«Неудовлетворительно»	Выполнение менее 50% тестовых заданий

Критерии оценки знаний обучающихся при выполнении лабораторных практикумов:

Оценка «5» ставится в том случае, если:

– лабораторная работа подготовлена к выполнению, обучаемый знает цель лабораторной работы;

– задания решены без ошибок с первого раза, правильно выбраны решения заданий;

– правильно выполнены расчёты, обучающийся понимает, что они значат;

– полно даны ответы на письменные и устные контрольные вопросы;

– отчёт оформлен аккуратно, сделаны выводы.

Оценка «4» ставится в том случае, если

– лабораторная работа подготовлена к выполнению, обучаемый знает цель лабораторной работы;

– задания решены с ошибками, потребовалась дополнительная помощь преподавателя, правильно выбраны методики решения заданий;

– расчёты выполнены с консультацией преподавателя;

– полно даны ответы на письменные и устные контрольные вопросы;

– отчёт оформлен аккуратно, сделаны выводы.

Оценка «3» ставится в том случае, если

– лабораторная работа подготовлена к выполнению, обучаемый знает цель лабораторной работы;

– задания выполнены с ошибками, потребовалась дополнительная помощь преподавателя, правильно выбраны методики решения заданий;

- с ошибками выполнены расчёты, даже с консультацией преподавателя или обучающийся не может объяснить, как выполнялись расчеты;
  - даны ответы на письменные и устные контрольные вопросы.
  - отчёт оформлен небрежно, сделаны выводы.
- Оценка «2» ставится в том случае, если
- лабораторная работа подготовлена к выполнению, обучаемый не знает цель лабораторной работы;
  - задачи решены с ошибками, потребовалась дополнительная помощь преподавателя, неверно выбраны методы решения задач;
  - не выполнены расчёты;
  - не даны ответы на устные контрольные вопросы;
  - отчёт оформлен небрежно, выводы не сделаны.

Критерии оценки знаний обучающихся при выполнении практических заданий:

**Оценка «отлично»** – ставится, если студент демонстрирует знание теоретического и практического материала по теме практической работы, определяет взаимосвязи между показателями задачи, даёт правильный алгоритм решения, определяет междисциплинарные связи по условию задания. А также, если студент имеет глубокие знания учебного материала по теме практической работы, показывает усвоение взаимосвязи основных понятий используемых в работе, смог ответить на все уточняющие и дополнительные вопросы.

**Оценка «хорошо»** – ставится, если студент демонстрирует знание теоретического и практического материала по теме практической работы, допуская незначительные неточности при решении задач, имея неполное понимание междисциплинарных связей при правильном выборе алгоритма решения задания. А также, если студент показал знание учебного материала, усвоил основную литературу, смог ответить почти полно на все заданные дополнительные и уточняющие вопросы.

**Оценка «удовлетворительно»** – ставится, если студент затрудняется с правильной оценкой предложенной задачи, дает неполный ответ, требующий наводящих вопросов преподавателя, выбор алгоритма решения задачи возможен при наводящих вопросах преподавателя. А также, если студент в целом освоил материал практической работы, ответил не на все уточняющие и дополнительные вопросы.

**Оценка «неудовлетворительно»** – ставится, если студент дает неверную оценку ситуации, неправильно выбирает алгоритм действий. А также, если он имеет существенные пробелы в знаниях основного учебного материала практической работы, который полностью не раскрыл содержание вопросов, не смог ответить на уточняющие и дополнительные вопросы.

### **3. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

#### **3.1 Теоретические вопросы и практические задания для проведения зачета и экзамена**

##### **Вопросы для подготовки к зачету**

1. Система отсчета. Траектория, дина пути, вектор перемещения.
2. Скорость. Ускорение и его составляющие (тангенциальная, нормальная).
3. Угловая скорость и угловое ускорение. Связи между угловыми и линейными характеристиками движения материальной точки по окружности.
4. Первый закон Ньютона. Инерциальные системы отсчета. Второй закон Ньютона. Масса, сила.
5. Третий закон Ньютона. Закон сохранения импульса.

6. Энергия, работа, мощность. Кинетическая и потенциальная энергия.
7. Закон сохранения энергии.
8. Момент инерции. Кинетическая энергия вращения.
9. Момент силы. Уравнение динамики вращательного движения твердого тела.
10. Момент импульса. Закон сохранения момента импульса.
11. Закон всемирного тяготения. Сила тяжести и вес. Невесомость.
12. Работа в поле тяготения. Космические скорости.
13. Давление в жидкости. Закон Паскаля и закон Архимеда.
14. Уравнение неразрывности.
15. Уравнение Бернулли.
16. Гармонические колебания и их характеристики.
17. Дифференциальное уравнение гармонических колебаний. Векторные диаграммы
18. Гармонический осциллятор. Пружинный, физический и математический маятники.
19. Сложение гармонических колебаний одного направления и одинаковой частоты.
20. Свободные затухающие колебания и их характеристики.
21. Вынужденные колебания. Амплитуда и фаза вынужденных колебаний. Резонанс.
22. Волновые процессы. Продольные и поперечные волны.
23. Гармоническая волна и ее характеристики. Уравнение бегущей волны.
24. Опытные законы идеальных газов (Бойля-Мариотта, Гей-Люссака, Авогадро, Дальтона).
25. Уравнение Клапейрона-Менделеева.
26. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеальных газов.
27. Закон Максвелла о распределении молекул идеального газа по скоростям и энергиям теплового движения.
28. Барометрическая формула. Распределение Больцмана.
29. Число степеней свободы молекул. Закон равномерного распределения энергии по степеням свободы молекулы.
30. Первое начало термодинамики.
31. Работа газа при изменении его объема. Теплоемкость.
32. Круговой процесс (цикл). Обратимые и необратимые процессы. Второе начало термодинамики.
33. Тепловые двигатели и холодильные машины. Цикл Карно и его к.п.д. для идеального газа.
34. Закон Кулона. Напряженность электростатического поля. Принцип суперпозиции электростатических полей.
35. Теорема Гаусса для электростатического поля.
36. Циркуляция вектора напряженности электростатического поля. Потенциал электростатического поля. Связь напряженности с потенциалом. Эквипотенциальные поверхности.
37. Поляризация диэлектриков. Поляризованность диэлектрика. Поверхностные связанные заряды. Напряженность поля в диэлектрике.
38. Электрическое смещение. Теорема Гаусса для электростатического поля в диэлектрике.
39. Равновесие зарядов на проводнике. Проводник во внешнем электрическом поле.
40. Емкость уединенного проводника. Конденсаторы.
41. Энергия заряженного уединенного проводника. Энергия заряженного конденсатора. Энергия электростатического поля.
42. Магнитное поле и его характеристики.
43. Магнитное поле движущегося заряда. Закон Био-Савара-Лапласа.
44. Действие магнитного поля на движущийся заряд. Сила Лоренца. Закон Ампера.
45. Циркуляция вектора  $\mathbf{B}$ . Теорема Гаусса для поля  $\mathbf{B}$ .
46. Намагничивание вещества. Напряженность магнитного поля. Магнитная восприимчивость и магнитная проницаемость. Вычисление поля в магнетиках.

47. Виды магнетиков. Диа- и парамагнетизм. Ферромагнетики и их свойства.
48. 15. Явление электромагнитной индукции. Закон Фарадея. Правило Ленца.
49. 16. Индуктивность контура. Самоиндукция.
50. Взаимная индукция. Трансформаторы.
51. Энергия магнитного поля.
52. Вихревые электрические поля. Ток смещения.
53. Уравнения Максвелла для электромагнитного поля.

### **Вопросы для подготовки к экзамену**

1. Предмет физики. Физическая модель. Классическая механика. Кинематика. Система отсчета. Методы задания материальной точки. Связь координатного и векторного методов. Описание движения в классической механике.
2. Криволинейное движение. Средняя и мгновенная скорость. Равнопеременное движение. Неравномерное криволинейное движение. Радиус кривизны. Тангенциальное и нормальное ускорения.
3. Силы в механике. Правило сложения сил, действующих на материальную точку. Инерция тел. Мера инертности тела. Законы Ньютона. Импульс тела. Импульс силы.
4. Механическая система. Внутренние и внешние силы. Закон сохранения импульса механической системы. Центр масс механической системы и закон его движения.
5. Инерциальные системы отсчета. Преобразование координат Галилея. Инвариантность законов Ньютона. Механический принцип относительности.
6. Неинерциальные системы отсчета. Силы инерции.
7. Элементы теории относительности. Постулаты Эйнштейна. Преобразования Лоренца.
8. Следствия из преобразований Лоренца. Интервал времени между двумя событиями. Длина отрезка.
9. Релятивистский импульс. Основной закон динамики в специальной теории относительности. Взаимосвязь массы и энергии.
10. Работа и мощность. Работа упругой и гравитационной сил. Консервативные силы.
11. Работа и мощность. Работа однородной силы тяжести. Потенциальная энергия. Связь потенциальной энергии с консервативной силой, действующей на материальную точку.
12. Кинетическая энергия поступательного движения и ее связь с работой внешних и внутренних сил.
13. Полная энергия механической системы. Закон сохранения механической энергии. Абсолютно упругий и неупругий удар.
14. Диссипативные силы. Работа диссипативных сил. Закон сохранения и превращения энергии. Абсолютно упругий и неупругий удар.
15. Абсолютно твердое тело - физическая модель. Поступательное и вращательное движение твердого тела. Угловая скорость и угловое ускорение. Связь угловых и линейных величин.
16. Момент инерции точки относительно вращения - мера инертности во вращательном движении. Определение момента инерции однородного стержня относительно оси, проходящей через центр масс.
17. Теорема Штейнера. Работа и кинетическая энергия вращательного движения.
18. Равнодействующая сила. Момент силы. Вывод основного закона динамики вращательного движения. Момент импульса. Закон сохранения момента импульса механической системы.
19. Стационарное течение вязкой жидкости.
20. Статистический и термодинамический методы изучения строения вещества. Термодинамическая система. Термодинамические параметры. Молярная масса. Число Авогадро. Равновесные состояния и квазиравновесные процессы.

21. Идеальный газ - физическая модель. Уравнение Клапейрона-Менделеева. Изопроцессы. Закон Дальтона.
22. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеальных газов. Связь давления и температуры. Физический смысл давления и температуры.
23. Распределение молекул газа по скоростям и энергия тепловое движение. Опыт Штерна. Распределение молекул в поле силы тяжести. Барометрическая формула. Средняя длина свободного пробега молекул. Эффективный диаметр молекулы.
24. Явление переноса: теплопроводность, вязкость и диффузия. Коэффициенты диффузии, внутреннего трения и теплопроводности в газе.
25. Число степеней свободы молекулы. Распределение энергии по степеням свободы молекулы. Внутренняя энергия идеального газа.
26. Количество теплоты. Теплоемкость газа. Работа газа при изменении его объема.
27. Первое начало термодинамики. Энтропия. Ее статистический смысл. Изменение энтропии при квазиравновесных процессах. Невозможность создания вечного двигателя первого рода.
28. Применение первого начала термодинамики для изохорического процесса.
29. Применение первого начала термодинамики для изобарического процесса. Молярная и удельная теплоемкость при  $p = const$ . Уравнение Майера.
30. Применение первого начала термодинамики для изотермического процесса. Работа газа при изотермическом процессе.
31. Адиабатический процесс. Уравнение Пуассона.
32. Второе начало термодинамики. Круговые процессы. Цикл Карно и его КПД. Тепловая машина, КПД. Холодильная машина.
33. Силы и потенциальная энергия межмолекулярного взаимодействия. Реальные газы. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Изотермы реального газа. Фазовые переходы первого и второго рода.
34. Характеристика жидкого состояния веществ. Граница раздела фаз. Поверхностное натяжение. Давление под изогнутой поверхностью жидкости. Формула Лапласа.
35. Закон Кулона. Напряженность и потенциал электростатического поля.
36. Диэлектрики в электрическом поле. Электрическое поле диполя. Сегнетоэлектрики.
37. Теорема Гаусса в интегральной форме и ее применение для расчета электрических полей.
38. Постоянный электрический ток. Сила и плотность тока. Закон Ома в интегральной и дифференциальной формах.
39. Магнитное взаимодействие постоянных токов. Закон Ампера.
40. Движение зарядов в электрических и магнитных полях. Классификация магнетиков. Доменная структура ферромагнетиков.
41. Магнитное поле в веществе. Магнитное поле и магнитный дипольный момент кругового тока. Классификация магнетиков. Доменная структура ферромагнетиков.
42. Гармонические колебания и их характеристики. Дифференциальное уравнение гармонических колебаний. Пружинный маятник.
43. Физический и математический маятники.
44. Электрический колебательный контур. Незатухающие электромагнитные колебания.
45. Энергия гармонических колебаний. Затухающие колебания (механические и электромагнитные).
46. Волны. Механизм образования механических волн в упругой среде. Продольные и поперечные волны. Уравнение бегущей волны. Характеристики волны. Волновое уравнение
47. Энергия волны. Интенсивность звуковой волны. Акустическое давление. Уровень интенсивности.
48. Поглощение волн. Закон Бугера. Физические причины поглощения звука в среде.
49. Интерференция волн. Образование стоячих волн. Уравнение стоячей волны и его анализ.

50. Электромагнитные волны, их основные свойства. Энергия электромагнитных волн. Поток энергии, вектор Умова-Пойнтинга.
51. Электромагнитные волны, их основные свойства. Энергия электромагнитных волн. Поток энергии, вектор Умова-Пойнтинга. Излучение диполя.
52. Нелинейные колебания.
53. Световые волны. Интерференция света. Геометрическая и оптическая разность хода. Условия максимума и минимума интерференций. Интерферометры.
54. Двойное лучепреломление. Поляроиды и поляризационные призмы. Закон Малюса. Искусственная оптическая анизотропия.
55. Интерференция при отражении и прохождении света через тонкую пленку или пластинку.
56. Волновое уравнение. Фазовая скорость и дисперсия волн.
57. Естественный и поляризованный свет. Поляризация света при отражении. Закон Брюстера.
58. Экспериментальные предпосылки возникновения квантовой теории.
59. Законы излучения нагретых тел.
60. Формула Планка. Фотоны.
61. Эффект Комптона.
62. Волна де Бройля.
63. Уравнение Шредингера.
64. Движение квантовой частицы в прямоугольной потенциальной яме.
65. Вещный фотоэффект и его законы. Фотоны. Уравнение Эйнштейна. Многофотонный фотоэффект.
66. Квантовая гипотеза и формула Планка.
67. Тепловое излучение. Закон Кирхгофа. Распределение энергии в спектре абсолютно черного тела. Закон Стефана-Больцмана. Закон смещения Вина. Оптическая пирометрия.
68. Волновое уравнение. Фазовая скорость и дисперсия волн.
69. Состав атомного ядра. Характеристики ядра: заряд, масса, энергия связи нуклонов. Радиоактивность.
70. Виды и законы радиоактивного излучения. Ядерные реакции. Деление ядер. Синтез ядер. Детектирование ядерных излучений.
71. Понятие о дозиметрии и защите. Естественная и искусственная радиоактивность.
72. Элементарные частицы. Фундаментальные взаимодействия и основные классы элементарных частиц.
73. Частицы и античастицы. Лептоны и адроны. Кварки. Электрослабое взаимодействие.
74. Гипотеза де Бройля. Принцип неопределенности Гейзенберга.
75. Квантово-механическое описание атомов.
76. Структура энергетических зон в металлах, полупроводниках и диэлектриках. Проводимость металлов.
77. Основы физики атомного ядра.

### 3.2 Показатели, критерии и шкала оценивания ответов на зачете / экзамене

Зачет			
Оценка «зачтено» (отлично)	Оценка «зачтено» (хорошо)	Оценка «зачтено» (удовлетворительно)	Оценка «не зачтено» (неудовлетворительно)
– систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам дисциплины, а также по	– достаточно полные и систематизированные знания по	– Достаточный минимальный объем знаний	– фрагментарные знания по дисциплине;

<p>основным вопросам, выходящим за пределы учебной программы;</p> <p>– точное использование научной терминологии систематически грамотное и логически правильное изложение ответа на вопросы;</p> <p>– безупречное владение инструментарием учебной дисциплины, умение его эффективно использовать в постановке научных и практических задач;</p> <p>– выраженная способность самостоятельно и творчески решать сложные проблемы и нестандартные ситуации;</p> <p>– полное и глубокое усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой по дисциплине;</p> <p>– умение ориентироваться в теориях, концепциях и направлениях дисциплины и давать им критическую оценку, используя научные достижения других дисциплин;</p> <p>– творческая самостоятельная работа на практических/семинарских/лабораторных занятиях, активное участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий;</p> <p>– высокий уровень сформированности</p>	<p>дисциплине;</p> <p>– умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях дисциплины и давать им критическую оценку;</p> <p>– использование научной терминологии, лингвистически и логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы;</p> <p>– владение инструментарием по дисциплине, умение его использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач;</p> <p>– усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой по дисциплине;</p> <p>– самостоятельная работа на практических занятиях, участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий;</p> <p>– средний уровень сформированности заявленных в рабочей программе</p>	<p>по дисциплине;</p> <p>– усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой;</p> <p>– умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по дисциплине и давать им оценку;</p> <p>– использование научной терминологии, стилистическое и логическое изложение ответа на вопросы, умение делать выводы без существенных ошибок;</p> <p>– владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в решении типовых задач;</p> <p>– умение под руководством преподавателя решать стандартные задачи;</p> <p>– работа под руководством преподавателя на практических занятиях, допустимый уровень культуры исполнения</p>	<p>– отказ от ответа (выполнения письменной работы);</p> <p>– знание отдельных источников, рекомендованных учебной программой по дисциплине;</p> <p>– неумение использовать научную терминологию;</p> <p>– наличие грубых ошибок;</p> <p>– низкий уровень культуры исполнения заданий;</p> <p>– низкий уровень сформированности заявленных в рабочей программе компетенций.</p>
--	---	---	---

заявленных в рабочей программе компетенций.	компетенций.	заданий; – достаточный минимальный уровень сформированности заявленных в рабочей программе компетенций.	
---	--------------	--	--

<b>Экзамен</b>				
<b>Критерии / Баллы</b>	<b>Оценка «5»</b>	<b>Оценка «4»</b>	<b>Оценка «3»</b>	<b>Оценка «2»</b>
Полнота и правильность ответа	Обучающийся полно излагает материал, дает правильное определение основных понятий	Обучающийся достаточно полно излагает материал, однако допускает 1-2 ошибки, которые сам же исправляет, и 1-2 недочета в последовательности и языковом оформлении излагаемого.	Обучающийся демонстрирует знание и понимание основных положений данной темы, но излагает материал неполно и допускает неточности в определении понятий или формулировке правил	Обучающийся демонстрирует незнание большей части соответствующего вопроса
Степень осознанности, понимания изученного	Обучающийся демонстрирует понимание материала, может обосновать свои суждения, применить знания на практике, привести необходимые примеры не только из учебника, но и самостоятельно составленные	Обучающийся присутствуют 1-2 недочета в обосновании своих суждений, количество приводимых примеров ограничено	Обучающийся не умеет достаточно глубоко и доказательно обосновать свои суждения и привести свои примеры	Обучающийся допускает ошибки в формулировке определений и правил, искажающие их смысл
Языковое	Обучающийся	Обучающийся	Обучающийся	Обучающийся

оформление ответа	излагает материал последователь но и правильно с точки зрения норм литературног о языка	излагает материал последователь но, с 2-3 ошибками в языковом оформлении	излагает материал непоследоват ельно и допускает много ошибок в языковом оформлении излагаемого материала	беспорядочно и неуверенно излагает материал
----------------------	---	--	--	--